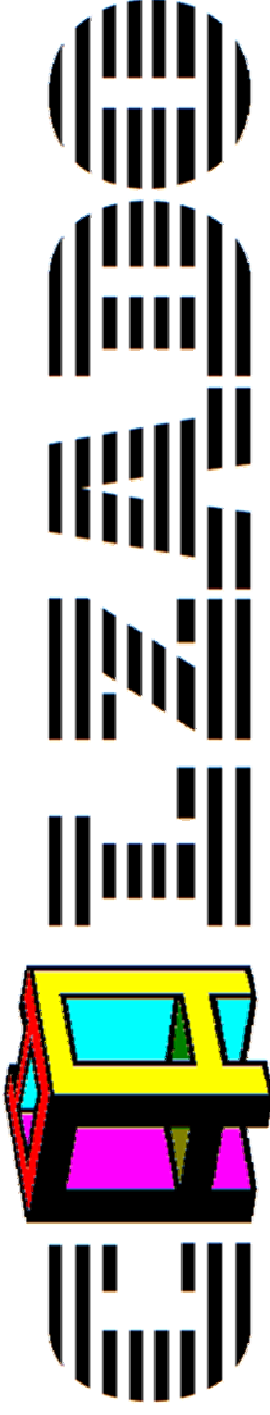
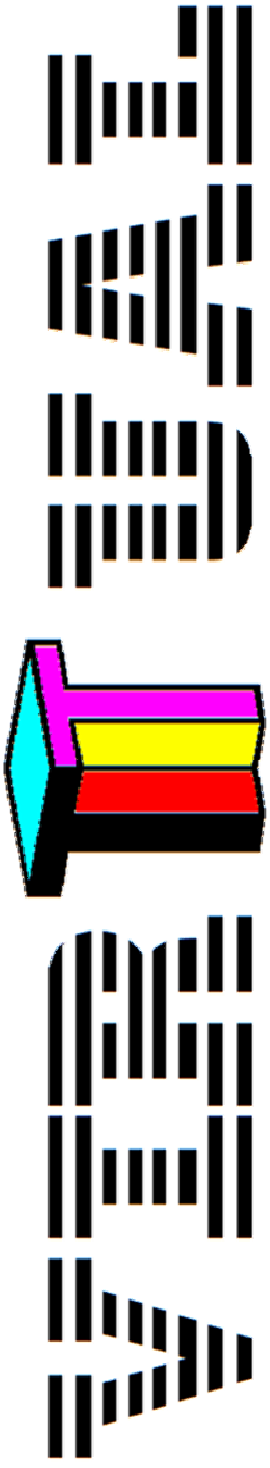




PREDICCIÓN DEL CONFORT A PARTIR DE PROTOTIPOS VIRTUALES DE



CALZADO Y MODELOS DE INGENIERÍA ASISTIDA POR ORDENADOR



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROYECTOS

PREDICCIÓN DEL CONFORT A PARTIR DE PROTOTIPOS VIRTUALES DE CALZADO Y MODELOS DE INGENIERÍA ASISTIDA POR ORDENADOR

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

JOSE CARLOS OLASO MELIS

Directores:

Dr. MIGUEL ÁNGEL ARTACHO RAMÍREZ

Dr. JUAN CARLOS GONZALEZ GARCÍA

Valencia, Marzo 2010

*A mis padres,
a Blanca y a Leo*

AGRADECIMIENTO MUY ESPECIAL

Considero esta tesis tanto mía como de Blanca. No existiría tesis sin el apoyo, el cariño y la comprensión de Blanca, pero tampoco habría nada por lo que mereciera la pena vivir.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis es también la consecución de una serie de circunstancias a las cuales han contribuido especialmente los dos directores de la misma. Me gustaría mostrar el agradecimiento debido a ambos. En primer lugar a **Miguel Ángel Artacho**, tanto por sus enseñanzas y Guía desde el punto de vista técnico y científico, como por su apoyo y entusiasmo durante todo el desarrollo del trabajo. Él ha conseguido que el día a día de la tesis fuera divertido y fructífero técnica y emocionalmente, aspectos que cuando convergen hacen de un trabajo un placer. Y en segundo lugar a **Juan Carlos González** por sus consejos y enseñanzas durante el desarrollo de la tesis, pero sobre todo a lo largo de todo mi desarrollo profesional en el IBV, así como por la comprensión y apoyo que me ha brindado en todo momento. Escribiendo estas líneas materializo la admiración que siento por ambos.

A continuación me gustaría agradecer al grupo de **indumentaria** del IBV en general, y en particular a **Sandra, Sergio, Roberto y Sara** por su gran ayuda en el trabajo técnico y de gestión desarrollado en la tesis. A **Sandra y Sergio**, que pusieron la primera piedra del trabajo más técnico, a **Roberto** por sus consejos y mirada crítica, y a **Sara**, que aunque menos visible, me ha ayudado a través de su trabajo de gestión.

Además me gustaría agradecer su apoyo a distintas personas que, aunque indirectamente, han participado apoyándome durante el desarrollo de la tesis.

En primer lugar a **mi familia** por el ánimo y cariño a raudales vertidos sobre mí, que me ha permitido seguir adelante con la tarea. Especialmente mi **padre**, por la constancia de la que sólo él es capaz preguntando cada día por la tesis, a mi **madre**, que me dió el último empujón cuando había cosas mucho más importantes en que pensar, y a mis hermanos, **Juan y Leyla**, que siempre han estado ahí para ayudarme.

En segundo lugar a la **familia Peñín Llobell** por el apoyo mostrado durante el desarrollo de la tesis, especialmente a **Ange** por arroparme con su cariño cuando más lo necesité, a **Alberto** por sus constantes ánimos, y a mis sobrinos **Pau y Alba** que, aunque inconscientemente, en su momento supusieron un aliciente para seguir adelante.

En tercer lugar a los **amigos** más implicados en mi día a día: Oscar, Iñaqui, Anita, Enric, Fredi, Maria, Javi y Quique. Ellos consiguen llenar mi vida de momentos que hacen que valga la pena, contribuyendo de esta manera indudable a la consecución de la tesis.

Para acabar, agradecer a todo el personal del **IBV** su apoyo durante la realización de la tesis.

“Si las puertas de la percepción fueran abiertas el hombre percibiría todas las cosas tal como son, infinitas. Pues el hombre se ha encerrado en sí mismo hasta ver todas las cosas a través de las estrechas rendijas de su caverna”

William Blake. Las bodas del cielo y el infierno (1793)

RESUMEN

El confort del calzado es uno de los aspectos más importantes para los fabricantes y diseñadores de calzado ya que está directamente relacionado con el éxito en la venta del producto y con la salud del usuario. A pesar de ello, y por diversas causas, el análisis del confort que es capaz de proveer un diseño de calzado sigue siendo una asignatura pendiente del desarrollo del producto de las empresas, si es que se lleva a cabo. La causa principal es la ausencia de una herramienta capaz de llevar a cabo un test de confort de manera fiable, rápida y abordable en materia de conocimiento y costes para las empresas.

El objetivo principal de esta tesis es el desarrollo de una aplicación informática, fundamentada en modelos matemáticos asistidos por ordenador alimentados mediante datos reales, capaz de simular ensayos funcionales en diseños virtuales de calzado, y relacionar dichos resultados con la percepción del confort de los usuarios. Dicha herramienta permite detectar y eliminar errores en el diseño del calzado (que influyen en el confort) desde fases tempranas de desarrollo del producto, aumentando así el confort percibido por los usuarios del calzado, así como la eficacia del proceso de diseño.

El trabajo ha tenido lugar en tres grandes bloques. En primer lugar se estudió la relación entre la percepción de las propiedades funcionales asociadas a la interacción usuario-calzado y el confort global percibido. Para ello se llevaron a cabo ensayos con maquinaria para caracterizar las propiedades del calzado y ensayos con usuarios para caracterizar su percepción a partir del uso del calzado. Este análisis permitió obtener un modelo del confort global a partir de las propiedades funcionales, además de identificar las propiedades funcionales relevantes en el confort. A continuación se desarrollaron y validaron modelos virtuales de los ensayos de cuantificación de las propiedades funcionales capaces de evaluar el comportamiento de un calzado a partir de su diseño CAD y las propiedades de sus materiales y componentes (aproximación CAT). Finalmente, se implementó en una aplicación informática el modelo de percepción del confort y los modelos de las propiedades funcionales. Además, se desarrolló e implementó el software, las bases de datos necesarias para configurar los ensayos virtuales y las rutinas necesarias para alimentar el modelo de confort.

Las aportaciones principales de la tesis derivan de la aplicación de un enfoque multidimensional aplicado al estudio de la relación entre propiedades funcionales y confort, y de la consideración de las requerimientos específicos (capacidades y necesidades) de los diseñadores como usuarios de la herramienta CAE. Como resultado, el trabajo desarrollado ha permitido obtener un modelo capaz de predecir el confort percibido por los usuarios a partir de medidas objetivas sobre el diseño virtual del calzado, y una aplicación informática que integra dicho modelo y que permite considerar las necesidades de confort del usuario desde el primer momento del proceso de diseño, eliminando la necesidad de fabricar prototipos físicos.

El trabajo desarrollado deja abierto el camino de nuevas líneas de investigación como la aplicación de la metodología validada en la tesis en distintas tipologías de usuario, calzado y condiciones de contorno, o el análisis de la influencia de los aspectos psicológicos (p.e. preferencia estética) de los usuarios en su percepción del confort, y combinarlos con las propiedades funcionales en un nuevo modelo de confort con una mayor capacidad predictiva. Finalmente, el análisis de la acogida de la herramienta desarrollada en el entorno industrial podría aportar nuevas mejoras de la aplicación informática, principalmente en cuanto a su usabilidad y adaptabilidad a los métodos de trabajar de los profesionales del sector.

RESUM

El confort del calçat és un dels aspectes més importants per als fabricants i dissenyadors de calçat ja que està directament relacionat amb l'èxit en la venda del producte, així com amb la salut del usuari. A pesar d'això, per diverses causes, l'anàlisi del confort d'un disseny de calçat segueix sent un assignatura pendent del desenvolupament del producte de les empreses, si és que es porta a terme. La causa principal és l'absència d'una eina capaç de dur a terme un test de confort de manera fiable, ràpida i abordable en matèria de coneixement i costos per a les empreses. L'objectiu principal d'aquesta tesi és el desenvolupament d'una aplicació informàtica, fonamentada en models matemàtics assistits per ordinador alimentats mitjançant dades reals, capaç de simular assajos funcionals en dissenys virtuals de calçat, i relacionar aquests resultats amb la percepció del confort dels usuaris. Aquesta eina permet detectar i eliminar errors en el disseny del calçat (amb influència en confort) des de fases primerenques del process de desenvolupament del producte, augmentant així el confort percebut pels usuaris del calçat, així com l'eficàcia del procés de disseny.

El treball ha tingut lloc en tres grans blocs. En primer lloc es va estudiar la relació entre la percepció de les propietats funcionals associades a la interacció usuari-calçat i el confort global percebut. Amb aquest objectiu es van portar a terme assajos amb maquinària per a caracteritzar les propietats del calçat i assajos amb usuaris per a caracteritzar la seva percepció a partir de l'ús del calçat. Aquest anàlisi va permetre obtenir un model del confort global a partir de les propietats funcionals, a més d'identificar les propietats funcionals rellevants en el confort. A continuació es van desenvolupar i van validar models virtuals dels assajos de quantificació de les propietats funcionals capaces d'avaluar el comportament d'un calçat a partir del seu disseny CAD i les propietats dels seus materials i components (aproximació CAT). Finalment, es va implementar en una aplicació informàtica el model de percepció del confort i els models de les propietats funcionals. A més, es va desenvolupar i va implementar el software, les bases de dades necessàries per a configurar els assajos virtuals i les rutines necessàries per a alimentar el model de confort.

Les aportacions principals de la tesi deriven de l'aplicació d'un enfocament multidimensional aplicat a l'estudi de la relació entre propietats funcionals i confort, i de la consideració del requeriments específics (capacitats i necessitats) dels dissenyadors com usuaris de l'eina CAE. Com resultat, el treball desenvolupat ha permès obtenir un model capaç de predir el confort percebut pels usuaris a partir de mesures objectives sobre el disseny virtual del calçat, i una aplicació informàtica que integra aquest model i que permet considerar les necessitats de confort de l'usuari des del primer moment del procés de disseny, eliminant la necessitat de fabricar prototips físics.

El treball desenvolupat deixa obert el camí de noves línies d'investigació com l'aplicació de la metodologia validada en la tesi en diferents tipologies d'usuari, calçat i condicions de contorn, o l'anàlisi de la influència dels aspectes psicològics (p.e. preferència estètica) dels usuaris en la seva percepció del confort, i combinar-los amb les propietats funcionals en un nou model de confort amb una major capacitat predictiva. Finalment, l'anàlisi de l'acollida de l'eina en l'entorn industrial desenvolupada podria aportar noves millores de l'aplicació informàtica, principalment quant al seu us i adaptabilitat als mètodes de treballar dels professionals del sector.

ABSTRACT

Comfort is one of the most important aspects for footwear manufacturers and designers since it is directly related to selling success and users' health. In spite of this, and for diverse causes, the analysis of the comfort generated by a specific footwear design is a task within the product development process which remains unresolved. The main cause is the absence of a tool able to develop comfort tests in a reliable and fast way, affordable for the companies in terms of knowledge and costs.

The main objective for this thesis is the development of a software application, based in computer assisted mathematical models fed by real data, able to perform virtual functional tests on virtual footwear designs, and relate the result of these tests with users' comfort perception. Such tool allows detecting and eliminating footwear design errors (with influence in comfort) from the early steps of the product development processes, increasing in that way the perceived comfort when using the footwear, as well as the efficiency of the product design process.

The work has been divided into three main workpackages. First, a study was carried out analyzing the relation between users' perception of the functional properties defining the user-footwear interaction and the users' perception of global comfort. With that aim, tests with machines were performed to characterize footwear functional properties, and questionnaires with users were carried out to characterize their perception when using the footwear. This analysis permitted, on one hand, obtaining a predictive model of global comfort from footwear functional properties measured with machines, and on the other, identifying the relevant functional properties for comfort perception. Next, work continued with the development of mathematical models of virtual functional tests, able to quantify the functional properties of footwear from CAD footwear designs and materials' and components' properties obtained through real tests (CAT approach). Finally, the global comfort model and the virtual functional tests models were implemented in a software application. In addition, it was implemented and coded the specific algorithms, the databases necessary to configure the virtual tests and the routines to feed the comfort model.

The main contributions of this thesis come from the application of a multidimensional approach to the study of the relations between the functional properties and comfort perception, and from the consideration of the specific requirements (capacities and needs) of the designers as users of the CAE tool. As a result, the developed work has permitted obtaining a model able to predict comfort perceived by the users from objective measures of a CAD footwear design, and a software application integrating this model, thus allowing considering users' comfort needs from the beginning of the design process, eliminating the necessity of manufacturing physical prototypes.

The developed work opens the way to new research and development lines as the application of the methodology validated in this thesis to different footwear and user typologies and environmental conditions, or the analysis of the psychological aspects in comfort perception (e.g. aesthetical preferences), and combine them with the functional properties in a new comfort model with increased predictive capacity. Finally, the analysis of the integration of the developed tool in the industrial environment could provide new clues for the improvement of the tool, mainly regarding its usability and adaptability to the daily tasks of the professionals of the footwear sector.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	3
1.1.	CUESTION A INVESTIGAR	3
1.2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
2.	JUSTIFICACIÓN	9
3.	OBJETIVOS	11
4.	HIPÓTESIS	13
5.	ESTADO DEL ARTE	15
5.1.	APLICACIONES INFORMÁTICAS DE APOYO AL DISEÑO DE CALZADO	15
5.1.1.	PRODUCTOS CAD PARA DISEÑO DE CALZADO	16
5.1.2.	TECNOLOGÍAS CAE Y CAT	18
5.2.	CONFORT EN EL CALZADO	20
5.2.1.	DEFINICION DE CONFORT	20
5.2.2.	FACTORES RELEVANTES PARA EL CONFORT EN EL CALZADO	21
5.2.2.1.	Confort biomecánico	22
5.2.2.2.	Confort fisiológico	25
5.2.2.3.	Confort psicológico	25
5.3.	PROPIEDADES FUNCIONALES BIOMECÁNICAS Y FISIOLÓGICAS DEL CALZADO	26
5.3.1.	FLEXIBILIDAD	26
5.3.1.1.	Factores que influyen la flexibilidad	27
5.3.1.2.	Influencia del calzado en la flexibilidad	28
5.3.2.	ABSORCIÓN DE IMPACTOS	29
5.3.2.1.	Factores que influyen en la amortiguación de impactos	32
5.3.2.2.	Influencia del calzado en la amortiguación de impactos	33
5.3.3.	DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PLANTARES	35
5.3.3.1.	Factores que influyen en la distribución de presiones	38
5.3.3.2.	Influencia del calzado en la distribución de presiones	39
5.3.4.	AJUSTE	41
5.3.4.1.	Factores que influyen en el ajuste	41
5.3.4.2.	Influencia del calzado en el ajuste	46
5.3.5.	CONFORT TÉRMICO	50
5.3.5.1.	Factores que influyen en el confort térmico	54
5.3.5.2.	Influencia del calzado en el confort térmico	55
5.3.6.	FRICCIÓN	58
5.3.6.1.	Factores que influyen en la fricción	59
5.3.6.2.	Influencia del calzado en la fricción	60
5.4.	CUANTIFICACIÓN DEL CONFORT Y DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES	62
5.4.1.	EVALUACIÓN DEL CONFORT	63
5.4.2.	FLEXIBILIDAD	64
5.4.2.1.	Test con usuarios para la flexibilidad	64
5.4.2.2.	Test con maquinaria para la flexibilidad	64
5.4.3.	ABSORCIÓN DE IMPACTOS	67
5.4.3.1.	Test con usuarios para la absorción de impactos	67
5.4.3.2.	Test con máquinas para la absorción de impactos	67
5.4.4.	DISTIBUCIÓN DE PRESIONES	69
5.4.4.1.	Test con usuarios para la distribución de presiones	69
5.4.4.2.	Test con máquinas para la distribución de presiones	70
5.4.5.	AJUSTE	71
5.4.5.1.	Test con sujetos para el ajuste	72
5.4.5.2.	Test con máquinas para el ajuste	73
5.4.6.	CONFORT TÉRMICO	73
5.4.6.1.	Test con sujetos para el confort térmico	74
5.4.6.2.	Test con máquinas para el confort térmico	75
5.4.7.	FRICCIÓN	77
5.4.7.1.	Test con sujetos para la fricción	77
5.4.7.2.	Test con máquinas para la fricción	79
5.5.	MODELOS DE CONFORT A PARTIR DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES	81
5.6.	CONCLUSIONES DEL ESTADO DEL ARTE	84
6.	METODOLOGÍA	87
6.1.	APROXIMACIÓN METODOLÓGICA	87

6.2.	FASES DEL TRABAJO	89
7.	MATERIAL Y MÉTODOS	99
7.1.	FACTORES DE LA INTERACCIÓN USUARIO-CALZADO Y TEST DE LABORATORIO PARA LA EVALUACIÓN DE SUS PROPIEDADES FUNCIONALES (FASE 1)	99
7.2.	DESARROLLO DE UN MODELO DEL LA PERCEPCIÓN DEL CONFORT A PARTIR DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE LA INTERACCIÓN USUARIO-CALZADO (FASE 2)	100
7.2.1.	Proceso de obtención de los modelos de predicción	100
7.3.	DEFINICIÓN DE LA MUESTRA DE SUJETOS	102
7.3.1.	DEFINICIÓN DE LA MUESTRA DE CALZADO	102
7.3.2.	MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA LA OBTENCIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN	103
7.3.3.	METODOLOGÍAS DE EXPERIMENTACIÓN	103
7.3.4.	VALORACIÓN SUBJETIVA DEL CONFORT Y LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DEL CALZADO	104
7.3.5.	VALORACIONES OBJETIVAS DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DEL CALZADO	104
7.3.6.	VALIDACIÓN DEL MODELO DE CONFORT	108
7.4.	DESARROLLO DE LOS MODELOS DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES RELEVANTES PARA EL CONFORT (FASE 3)	108
7.4.1.	ABSORCIÓN DE IMPACTOS Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES	109
7.4.1.1.	Modelización de los materiales de los componentes del calzado	109
7.4.1.2.	Modelización de la geometría de los componentes del calzado	112
7.4.1.3.	Modelización del comportamiento conjunto de los componentes	115
7.4.1.4.	Modelización de la interacción usuario-calzado	115
7.4.1.8.	Implementación de los algoritmos	122
7.4.1.9.	Validación de los modelos	125
7.4.2.	MODELO DEL AJUSTE	126
7.4.2.1.	Definición del alcance del modelo de ajuste	126
7.4.2.2.	Definición de las medidas geométricas del pie y la horma	127
7.4.2.3.	Análisis de los aspectos relevantes en el ajuste	128
7.4.2.4.	Obtención de las secciones del pie y horma	128
7.4.2.5.	Información antropométrica de los pies de la población	134
7.4.2.6.	Modelización de la interacción usuario-calzado	134
7.4.2.7.	Implementación de los algoritmos	135
7.5.	DESARROLLO DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA (FASE 4)	137
7.5.1.	GENERACIÓN DE LAS BASES DE DATOS	139
7.5.2.	IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÓDULOS	140
7.5.2.1.	Módulos de caracterización del calzado	140
7.5.2.2.	Módulos de predicción de las propiedades funcionales	140
7.5.2.3.	Módulos de predicción del confort percibido	141
7.5.3.	INTERFAZ DE USUARIO	141
8.	RESULTADOS	143
8.1.	LA PERCEPCIÓN DE CONFORT DEL USUARIO Y SU RELACIÓN CON LA PERCEPCIÓN DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE LA INTERACCIÓN USUARIO-CALZADO	143
8.1.1.	MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA PERCEPCIÓN DE CONFORT DEL USUARIO A PARTIR DE LA PERCEPCIÓN DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DEL CALZADO	143
8.1.2.	RELACIÓN ENTRE LA PERCEPCIÓN DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES RELEVANTES PARA EL CONFORT Y LA MEDIDA OBJETIVA CON MAQUINARIA ESPECIALIZADA	145
8.1.3.	MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA PERCEPCIÓN DE CONFORT DEL USUARIO A PARTIR DE LA MEDIDA OBJETIVA DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DEL CALZADO CON MAQUINARIA ESPECIALIZADA	149
8.2.	VALIDACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE LOS TEST DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES RELEVANTES PARA EL CONFORT	153
8.2.1.	VALIDACIÓN DEL MÓDULO DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	153
8.2.2.	VALIDACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN	158
8.3.	APLICACIÓN INFORMÁTICA	162
9.	DISCUSIÓN	167
9.1.	APORTACIÓN GLOBAL	167
9.1.1.	ENFOQUE HOLÍSTICO	167
9.1.2.	ENFOQUE CAE-CAT	168
9.2.	APORTACIÓN METODOLÓGICA	168
9.2.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA INTERACCIÓN CALZADO-USUARIO Y SU RELACIÓN CON EL CONFORT PERCIBIDO	169
9.2.2.	MODELOS DE LOS TEST DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES	169
9.2.3.	APLICACIÓN INFORMÁTICA	170
9.2.3.1.	Lenguajes y formatos de archivos	170
9.2.3.2.	Interfaz de usuario y usabilidad	171
9.3.	TAMAÑO DE LAS MUESTRAS: ANÁLISIS POST-HOC DE LA POTENCIA DE TEST	171

9.4.	FACTORES Y CONDICIONES DE CONTORNO RELACIONADOS CON LA PERCEPCIÓN DEL CONFORT	174
9.5.	PROPIEDADES FUNCIONALES RELEVANTES PARA EL CONFORT Y TEST DE MEDIDA OBJETIVA	175
9.6.	DESARROLLO DEL MODELO DE PERCEPCIÓN DEL CONFORT	175
9.6.1.	RELACIÓN ENTRE LA PERCEPCIÓN DE LOS USUARIOS DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES Y DEL CONFORT	176
9.6.2.	RELACIÓN ENTRE LA PERCEPCIÓN Y LA MEDIDA OBJETIVA DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES RELEVANTES PARA EL CONFORT	182
9.6.2.1.	Relación entre la medida subjetiva y objetiva del ajuste	182
9.6.2.2.	Relación entre la medida subjetiva y objetiva de la distribución de presiones	183
9.6.2.3.	Relación entre la medida subjetiva y objetiva de la Amortiguación de impactos	184
9.6.3.	RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS OBJETIVOS RELEVANTES PARA EL CONFORT Y LA PERCEPCIÓN DEL CONFORT GLOBAL	185
9.7.	DESARROLLO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE PROPIEDADES FUNCIONALES A IMPLEMENTAR EN LA APLICACIÓN INFORMÁTICA CAT	187
9.7.1.	TEST VIRTUALES DE ABSORCIÓN DE IMPACTOS, DISTRIBUCIÓN DE ALTAS Y BAJAS PRESIONES	188
9.7.1.1.	Módulo de caracterización mecánica	188
9.7.1.2.	Módulo de predicción	192
9.7.2.	TEST VIRTUAL DE AJUSTE	195
9.7.2.1.	Módulo de medición del ajuste	195
9.7.2.2.	Módulo de predicción del ajuste	196
9.8.	DESARROLLO DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA	197
10.	CONCLUSIONES	199
11.	TRABAJOS FUTUROS	203
12.	REFERENCIAS	207

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de diseño actual	5
Figura 2. Aproximaciones a la evaluación de las propiedades funcionales de un producto durante su proceso de desarrollo.	19
Figura 3. Ángulos de la articulación metatarsofalángica durante el ciclo de marcha	27
Figura 4. Flexión de la articulación metatarsofalángica durante el ciclo de marcha. Las flechas indican la dirección de las fuerzas aplicadas por el pie sobre el suelo.	27
Figura 5. Efecto de la altura de tacón y ángulo de puntera en la flexión	29
Figura 6. Pre-flexión producida por el ángulo de la suela en la puntera.	29
Figura 7. Fuerzas de reacción del suelo durante la marcha erguida.	30
Figura 8. Anatomía trasera del talón mostrando la almohadilla del talón	31
Figura 9. Curva de fuerza-desplazamiento obtenida impactando con un péndulo balístico sobre la almohadilla del talón ($v=0.62$ m/s).	31
Figura 10. Definición del índice de compresibilidad. $CI=(B-D/b-d)/(A-C/a-c)$.	32
Figura 11. Efecto de la copa de la plantilla.	35
Figura 12. Ejemplos de aplicaciones clínicas de distintos sistemas de mejora de las propiedades de absorción de impactos.	35
Figura 13. Elementos anatómicos típicos de las plantillas para la redistribución de las presiones	40
Figura 14. Puntos anatómicos relevantes del pie vistos desde arriba	43
Figura 15. Puntos anatómicos relevantes del lateral del pie	43
Figura 16. Arcos de soporte del pie	45
Figura 17. Diferencias entre las formas de una horma típica (en azul) y el pie en descarga (en gris)	47
Figura 18. Distribución de carga descalzo y con altura de tacón.	47
Figura 19. Efecto del cierre en el ajuste del empeine.	49
Figura 20. Ejemplo de producto de calzado en el mercado que incluye distintos elementos para mejorar el confort térmico(Gore-tex).	56
Figura 21. Flujos de intercambio de calor a través del calzado	57
Figura 22. Esquema de fuerzas que define el coeficiente de fricción	59
Figura 23. Principios cinéticos y cinemáticos que rigen los test de flexibilidad con ángulo de flexión constante	65
Figura 24. Maquinaria tipo utilizada en estos ensayos	66
Figura 25. Acceleration signal registered at the tibia.	67
Figura 26. Test de absorción de impactos del IBV.	68
Figura 27. Medida de la rigidez dinámica en 1 o 2 fases	68
Figura 28. Media del ratio de energía absorbida. $Rde= \text{Energía disipada} / \text{Energía aplicada}$	69
Figura 29. Distribución de presiones en la marcha normal	70
Figura 30. Test de distribución de presiones desarrollado en el IBV	71
Figura 31. Escaneado 3D con biofoot.	73
Figura 32. Pie maniquí utilizado para el estudio de calzado (Kurz, 1994).	76
Figura 33. COC respecto del tiempo después del contacto del tacón con el suelo.	77
Figura 34. Máquina de ensayos de fricción	80
Figura 35. Cadena de relaciones en la interacción entre el usuario y el calzado bajo ciertas condiciones de uso y entorno, caracterizada por las propiedades funcionales de la interacción (ajuste, flexibilidad, etc.), y su influencia en el confort global percibido.	88
Figura 36. Flujos de información entre las tres fases durante el trabajo.	91
Figura 37. Esquema del proceso seguido para analizar la relación de cada propiedad funcional con el confort percibido	101
Figura 38. Histograma de la muestra de sujetos seleccionada para el modelo de confort	102
Figura 39. Ejemplo de ahorros de la suela. Los ahorros de la suela son huecos implementados en la zona del talón principalmente con el objetivo de ahorrar material de suela. Existen infinitas posibilidades en cuanto a las geometrías de los huecos dependiendo del fabricante.	113
Figura 40. Capas de la suela de un calzado	114
Figura 41. Simplificaciones geométricas llevadas a cabo para la modelización del conjunto suela (plantilla + palmilla de montaje + suela)	114
Figura 42. Reacción vertical del suelo durante un ciclo de marcha	115
Figura 43. Punto de impacto medio en el calzado	117

Figura 44. Curva fuerza – deformación que se obtiene en los ensayos de absorción de impactos.	117
Figura 45. Energía aplicada y Energía absorbida	118
Figura 46. Máquina INSTRON 8501 utilizada para el ensayo de distribución de presiones.	119
Figura 47. Punto de aplicación bajo la cabeza del primer metatarsiano para el test de distribución de altas presiones	120
Figura 48. Punto de aplicación bajo la cabeza del primer metatarsiano para el test de distribución de bajas presiones	122
Figura 49. Funcionamiento global de las herramientas absorción de impactos, distribución de altas presiones y distribución de bajas presiones.	123
Figura 50. Funcionamiento detallado del Módulo de ajuste.	124
Figura 51. Funcionamiento detallado del Módulo de Predicción.	125
Figura 52. Secciones claves del pie para la cuantificación del ajuste	129
Figura 53. Definición de los puntos anatómicos clave sobre el pie	131
Figura 54. Puntos clave sobre la horma definiendo secciones clave de la horma.	132
Figura 55. Secciones relevantes y sus puntos identificativos sobre la horma	133
Figura 56. Posición de las distintas secciones de la horma desde el punto más trasero del talón.	134
Figura 57. Secciones de la horma sobre el plano XY.	134
Figura 58. Funcionamiento detallado del Módulo de ajuste.	135
Figura 59. Funcionamiento detallado del Módulo de medición de las hormas.	136
Figura 60. Funcionamiento detallado del Módulo de Predicción.	137
Figura 61. Gestión de la información de banco de ensayos virtuales para calzado.	138
Figura 62. Modelos significativos de predicción de la percepción de confort del usuario a partir de la percepción de las propiedades funcionales del calzado	144
Figura 63. Relaciones analizadas entre la percepción de las propiedades funcionales relevantes para el confort y la medida objetiva con maquinaria especializada	146
Figura 64. Modelo relacionando la percepción de la dureza de la suela delantera con la deformación máxima (mm) a bajas presiones medida objetivamente	147
Figura 65. Modelo relacionando la percepción de la dureza del tacón con la deformación máxima (mm) a altas presiones medida objetivamente	147
Figura 66. Modelo relacionando la percepción de la amortiguación de impactos con la Rigidez dinámica medida objetivamente	148
Figura 67. Modelo relacionando la percepción de la longitud con el ratio horma / pie medido objetivamente en esa sección	148
Figura 68. Modelo relacionando la percepción del ajuste en la línea de flexión con el ratio horma / pie medido objetivamente en esa sección	149
Figura 69. Modelo analizados de la percepción de confort del usuario a partir de la medida objetiva de las propiedades funcionales del calzado con maquinaria especializada	150
Figura 70. Relación entre la percepción del confort y la predicción del mismo obtenida a partir de las medidas objetivas de las propiedades funcionales.	153
Figura 71. Media del ajuste (R^2) para los tres test (Absorción de impactos, distribución de altas presiones, distribución de bajas presiones) de las plantillas.	156
Figura 72. Media del ajuste (R^2) para los tres test (Absorción de impactos, distribución de altas presiones, distribución de bajas presiones) de las suelas.	157
Figura 73. Modelo con mejor ajuste para cada test (tabla) y nivel de ajuste alcanzado (R^2) por los modelos (figura) para los materiales ensayados	158
Figura 74. Ratios de Deformación máxima reales y virtuales de cada calzado obtenida en los ensayos de distribución de bajas presiones.	160
Figura 75. Ratios de Deformación máxima reales y virtuales de cada calzado obtenida en los ensayos de distribución de altas presiones.	160
Figura 76. Rigidez reales y virtuales de cada calzado obtenida en los ensayos de absorción de impactos.	161
Figura 77. Pantalla principal de la aplicación informática	163
Figura 78. Pantalla del asistente en que se configura el usuario y las condiciones de uso.	164
Figura 79. Pantalla del asistente en que se configuran los test de absorción de impactos y distribución de altas y bajas presiones identificando el material y el espesor, así como el test de ajuste definiendo los percentiles de cada sección para los que se quiere ajustar el calzado	165

Figura 80. Pantalla del asistente en que se confirma que existe la información suficiente para efectuar los test	166
Figura 81. Pantalla del asistente en que se muestran los resultados de los test y la evaluación del confort efectuada.	166
Figura 82. Diferencia media de las valoraciones de confort específicas para diferentes propiedades funcionales del calzado respecto de una condición de control. Extraído de Mündermann et al. (2002)	178
Figura 83. Distribución espacial de los mecanorreceptores y sus áreas receptoras en la planta del pie de adultos (Kennedy and Inglis, 2002), en el lado lateral y dorsal del pie (Trulsson, 2001), y su supuesto rol en la percepción táctil (Purves et al, 2001)	179
Figura 84. Límite de presiones para la percepción del dolor en distintas zonas de la zona plantar González et al. (1999)	180
Figura 85. Esquema conceptual de la deformación que tiene lugar por un disco de material al aplicarle una carga vertical: se produce una deformación en la dirección de aplicación de la carga, pero además en las direcciones horizontales que consumen energía.	191
Figura 86. Modelo unidimensional de comportamiento de calzado completo	193
Figura 87. Secciones de la horma que extraer el módulo de medida	196
Figura 88. Pie y horma alineados	196

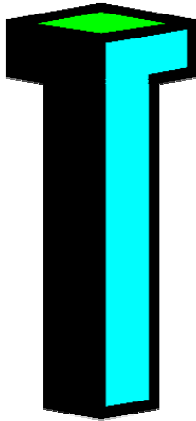
ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Consecuencias de la situación global del mercado del calzado	4
Tabla 2. Herramientas disponibles en el mercado para la digitalización de hormas y desarrollo de diseños de calzado.....	17
Tabla 3. Diferentes aspectos que influyen el confort percibido.....	22
Tabla 4. Valores típicos de fuerzas de impacto y aceleraciones para la marcha.....	30
Tabla 5. Categorías distintas de materiales viscoelásticos usados en la industria del calzado.....	34
Tabla 6. Presiones máximas (en kPa) en diferentes regiones del pie a tres velocidades de marcha (Rosenbaum et al., 1994).	37
Tabla 7. Tiempo en que se producen las presiones máximas expresado como porcentaje de la fase de apoyo del ciclo de marcha (Clarke, 1980).	37
Tabla 8. Calor producido en diferentes actividades	51
Tabla 9. Formas por las que el cuerpo gana y pierde calor	51
Tabla 10. Porcentajes de área de las diferentes partes del cuerpo respecto a la superficie corporal	54
Tabla 11. Resultados aproximadas de estos test para distintos tipos de calzado.....	66
Tabla 12. Intervalos de clasificación para el confort a partir de resultados de flexibilidad	66
Tabla 13. Picos en COC, ensayos de marcha normal de hombres adultos.	78
Tabla 14. Coeficientes mínimos requeridos para cumplir las especificaciones de seguridad.....	79
Tabla 15. Estudios de la relación entre las propiedades funcionales y el confort.....	82
Tabla 16. Características de los factores de interacción y las condiciones de contorno seleccionadas para la tesis.....	100
Tabla 17. Tipos de modelos matemáticos considerados.....	103
Tabla 18. Pregunta usada para recoger la percepción subjetiva del usuario de del confort global percibido con el uso del calzado	104
Tabla 19. Centros tecnológicos de investigación que cooperaron en la definición de los test de laboratorio para la cuantificación de las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado	105
Tabla 20. Medidas objetivas de cada test funcional y las preguntas usadas para recoger la percepción subjetiva del usuario de dichas propiedades funcionales del calzado	107
Tabla 21. Descripción de los test llevados a cabo para la cuantificación objetiva de las propiedades funcionales	108
Tabla 22. Modelos viscoelásticos lineales.	110
Tabla 23. Modelos no-lineales.....	111
Tabla 24. Coeficientes para el modelo general	112
Tabla 25. Caracterización de las Fuerza aplicada durante el test de absorción de impactos	116
Tabla 26. Caracterización de las Fuerza aplicada durante el test de distribución de altas presiones.....	119
Tabla 27. Caracterización de las Fuerza aplicada durante el test de distribución de bajas presiones.....	121
Tabla 28. Medidas a considerar en la cuantificación del ajuste	129
Tabla 29. Puntos anatómicos sobre el pie.....	130
Tabla 30. Puntos clave sobre la horma.....	132
Tabla 31. Definición de las medidas de la horma para una talla 42 de hombre. Los datos son el resultado de la media de la base de datos 3D del IBV.....	133
Tabla 32. Resumen del modelo de regresión obtenido relacionando la percepción del confort con las percepciones de la DUREZA de la suela DELANTERA.	144
Tabla 33. Resumen del modelo de regresión obtenido relacionando la percepción del confort con las percepciones de la DUREZA de la suela TRASERA.	145
Tabla 34. Resumen del modelo de regresión obtenido relacionando la percepción del confort con las percepciones de la AMORTIGUACION DE IMPACTOS.	145
Tabla 35. Resumen de los modelos de regresión obtenidos para los aspectos funcionales.....	146
Tabla 36. Resumen del modelo de regresión obtenido relacionando la percepción del confort con la medidas objetiva de la DISTRIBUCIÓN DE BAJAS PRESIONES.	150
Tabla 37. Resumen del modelo de regresión obtenido relacionando la percepción del confort con la medidas objetiva de la DISTRIBUCIÓN DE ALTAS PRESIONES.	151
Tabla 38. Resumen del modelo de regresión obtenido relacionando la percepción del confort con la medidas objetiva de la AMORTIGUACION DE IMPACTOS.	151
Tabla 39. Resultados de los ensayos para la validación del modelo de de confort.....	152

Tabla 40. Resultados de la validación del modelo de confort a partir de las medidas objetivas de las propiedades funcionales.	152
Tabla 41. Media del ajuste (R^2) para la distribución de bajas presiones.	154
Tabla 42. Media del ajuste (R^2) para la distribución de altas presiones.	155
Tabla 43. Media del ajuste (R^2) para la Absorción de impactos.	155
Tabla 44. Media del ajuste (R^2) para los tres test (Absorción de impactos, distribución de altas presiones, distribución de bajas presiones).....	156
Tabla 45. Ensayos de distribución de bajas presiones reales y virtuales de cada calzado.	159
Tabla 46. Ensayos de distribución de altas presiones reales y virtuales de cada calzado.	160
Tabla 47. Ensayos de absorción de impactos reales y virtuales de cada calzado.....	161
Tabla 48. Correlaciones y errores entre las medidas reales y las predicciones virtuales.....	162
Tabla 49. Muestra de sujetos considerada en distintos estudios de la percepción del confort y las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado	171
Tabla 50. Valores mínimos detectables en los análisis estadísticos para una potencia de test mayor o igual que 0.8. En todos los casos el nº de datos corresponde al nº de calzados considerados en el análisis	173
Tabla 51. Correlaciones entre las percepciones de flexión, amortiguación de impactos y la distribución de altas y bajas presiones.....	178
Tabla 52. Variables subjetivas y objetivas analizadas de la propiedades funcionales	182
Tabla 53. Correlaciones entre las medidas objetivas de amortiguación de impactos y la distribución de altas y bajas presiones.....	185
Tabla 54. Modelos de la percepción del confort asociado al ajuste (adaptado de Witana et al. 2004) ..	186
Tabla 55. Modelo de la percepción del ajuste obtenido por Witana et al. (2004).....	187
Tabla 56. Parámetros modelados de los test relevantes para el confort percibido.....	188
Tabla 57. Modelos que mejor y que peor ajustaron.	190

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CUESTION A INVESTIGAR



El auge de las **nuevas tecnologías** de las últimas décadas ha hecho que se abra el abanico de posibilidades en materia de nuevas herramientas enfocadas a la integración de métodos y técnicas de diseño en las primeras fases del desarrollo de producto. En los últimos años se han desarrollado numerosas aplicaciones informáticas con el objetivo de facilitar el diseño y fabricación de calzado, existiendo aplicaciones informáticas para el diseño de hormas, para el diseño de componentes, e incluso para el diseño del calzado completo.

Aunque el avance representado por estas herramientas de software es notable en cuanto a la reducción del coste y plazo en el proceso de desarrollo, adolece de un aspecto fundamental: no incluyen **criterios de diseño** capaces de informar al diseñador de la bondad de su diseño con respecto al **confort y la ergonomía del producto**. Esto representa un problema fundamental en el proceso de diseño de un calzado, pues obliga al diseñador a la fabricación y ensayo de cada prototipo para conocer el nivel de satisfacción en cuanto al confort que será capaz de proveer su nuevo diseño.

El presente trabajo se planteó con el objetivo de investigar la posibilidad de establecer las bases de conocimiento para dotar a los diseñadores de una aplicación informática para evaluar en las primeras fases de diseño la capacidad de un nuevo diseño de calzado de satisfacer las necesidades del usuario en materia de confort sin la necesidad de fabricarlo.

Para la consecución de este objetivo deben ser investigadas una serie de cuestiones:

- Las propiedades funcionales dependen de una serie de **factores** que definen la interacción entre usuario y calzado (p.ej. edad y género del usuario, el entorno, superficie, actividad desarrollada, diseño del calzado). Además, estos factores tienen influencia demostrada en el confort percibido por los usuarios. Es necesario pues investigar, por una parte, **cada uno de los factores en profundidad** para caracterizar su influencia en cada una de las propiedades funcionales del calzado, y por la otra, la **interacción entre los factores**, ya que es su acción conjunta la que define finalmente el confort percibido a través del rendimiento funcional.
- Las propiedades funcionales de un calzado son aquéllas que definen su rendimiento funcional. Aunque existe un acuerdo implícito en cuales son (ajuste, absorción de impactos, distribución de presiones, flexibilidad, confort térmico, fricción, peso), existen numerosos puntos por aclarar para entender hasta qué punto son importantes en la percepción del confort. Por una parte, es necesario analizar y seleccionar la más óptima de las **metodologías existentes para caracterizar dichas propiedades funcionales** desde un punto de vista objetivo y, por la otra, es necesario un conocimiento en profundidad de la **percepción que los**

usuarios tienen de dichas propiedades funcionales para comprender cómo la percepción subjetiva de las mismas influye en la percepción del confort.

- La **percepción del confort** de los usuarios en su interacción con el calzado no es un asunto cerrado desde el punto de vista científico. Existe consenso en la naturaleza multifactorial del confort, pero es necesario un análisis en profundidad de la relación entre el confort y el rendimiento funcional de un calzado para identificar de qué manera las propiedades funcionales del calzado definen el confort percibido por los usuarios.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los **problemas de confort derivados del uso de calzados de baja calidad** son conocidos: hallux valgus (comúnmente conocido como juanetes), ampollas, rozaduras, dolores de espalda, etc (Thompson y Coughlin, 1994; Piqué-Vidal, 2000; Mann y Coughlin, 1993). Muchos de estos problemas de salud son fruto del uso continuado de calzados poco confortables que, por ejemplo, crean sobre-presiones en determinadas zonas, no absorben los impactos correctamente, etc. Estos desajustes funcionales a la larga derivan en patologías del pie. Para la reducción de dichos problemas de confort es vital para las empresas fabricantes de calzado seguir una política que asegure la **calidad ergonómica de sus productos**.

Sin embargo, la empresa de calzado pertenece a un sector industrial tradicional que está sufriendo la globalización del mercado. Esta **situación global del mercado** provoca que (Tabla 1):

SE AUMENTEN...	SE REDUZCAN...
<ul style="list-style-type: none"> • La demanda de nuevos productos. • El número de variantes de un producto. • El número de clientes, proveedores y puntos de venta. • La complejidad del producto. • La automatización de los procesos. • La especialización de los técnicos. • Los problemas de coordinación y comunicación. 	<ul style="list-style-type: none"> • El ciclo de vida del producto. • Los plazos de lanzamiento. • El tamaño de las series. • El presupuesto para fabricación.

Tabla 1. Consecuencias de la situación global del mercado del calzado

Lo que tiene su reflejo en los problemas que ahogan a las empresas de los sectores tradicionales, como el calzado, al que cada vez se les exige más:

- Reducción del tiempo de diseño.
- Reducción de los costes en general.
- Aumento de la calidad de los productos y servicios.

Una de las causas principales de esta problemática podría resolverse optimizando el desarrollo del producto con el que operan las empresas. Actualmente el **proceso de diseño** del calzado funciona, a grandes rasgos, siguiendo el siguiente diagrama de flujo secuencial (Figura 1):

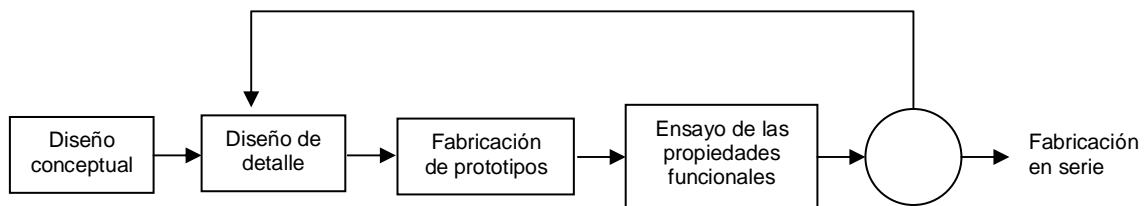


Figura 1. Proceso de diseño actual

Dicho proceso de **Ingeniería Secuencial**, aunque no requiere mucho esfuerzo de gestión, se caracteriza por:

- Cada etapa de la secuencia no se inicia hasta que acaba la anterior, lo que ralentiza el proceso de desarrollo de los productos considerablemente.
- El coste del producto se incrementa debido a que no se tiene en cuenta los procedimientos operativos y recursos de fabricación desde el principio al ser, como su propio nombre indica, un proceso secuencial.
- Las modificaciones finales son frecuentes y muy costosas, llevando al conocido como “síndrome del muro” (Capuz et al. 2002) consistente en un bloqueo del flujo del proceso de desarrollo justo antes de la etapa de fabricación en serie debido a los problemas que se encuentran en los ensayos de los prototipos funcionales.

Por tanto, competir en un mercado global se traduce, entre otras cosas, en la necesidad de reducir los costes del proceso de diseño desde sus primeras fases de desarrollo sin bajar la calidad del producto, lo cual no puede llevarse a cabo a través de los métodos secuenciales aplicados actualmente por la mayoría de las empresas del sector del calzado.

La reducción de costes en el proceso de diseño conlleva el peligro de rebajar el nivel de control de la calidad de los productos, pues es en estas fases iniciales de diseño cuando se caracterizan las propiedades funcionales del calzado, que van a definir cómo interactúa con el usuario. Otro aspecto a considerar es la dificultad que tienen los diseñadores para conocer la repercusión de las decisiones que toman a la hora de establecer los parámetros de diseño del calzado en las primeras fases de su desarrollo. Este es un problema serio, pues es en esas fases tempranas cuando se definen las propiedades funcionales del calzado, comprometiéndose así el modo con el que se va a producir la interacción final con el usuario.

De entre todas estas etapas, la que presenta mayores costes en tiempo y materiales es la **fabricación de prototipos**, de manera que si se rebajan sus costes tiene un gran impacto sobre el coste total del proceso de desarrollo. El objetivo de esta etapa es obtener un prototipo funcional del producto concebido para poder evaluar sus propiedades, esto es, su capacidad de satisfacer las expectativas que el usuario tiene acerca del producto. Para ello, y partiendo de un diseño de detalle del prototipo que indica la geometría, los materiales y la construcción de cada uno de los componentes

del producto, se fabrica una primera versión del calzado diseñado que presente las propiedades funcionales del producto acabado.

Esta fase es forzosamente obligatoria para comprobar las propiedades funcionales de un calzado, para lo cual se han de **fabricar prototipos**, lo que conlleva unos costes de mano de obra elevados y un retraso en el proceso de diseño. Además, muchos de los componentes a incluir en nuevo diseño son productos originales que no se venden en el mercado y que, por tanto, deben fabricarse artesanalmente. La fabricación artesanal de componentes no siempre es posible llevarla a cabo por la propia empresa debido a la falta de instalaciones, fundamentalmente en pequeñas y medianas empresas. Esto obliga a la subcontratación de dicho servicio lo que incrementa mucho más los costes de fabricación de prototipos, y además puede acarrear problemas de plazos debido a que se pierde el control del proceso al externalizarlo.

A continuación de la fabricación de prototipos, se procede a la fase de **ensayo de las propiedades funcionales** de los prototipos construidos. La fase consiste en diversos ensayos que cuantifican el nivel de cumplimiento de unas propiedades funcionales que ha de satisfacer el calzado para cubrir las necesidades de los usuarios. Entre estas propiedades se encuentra la absorción de impactos, la distribución de presiones, la flexibilidad, el ajuste, la fricción y el confort térmico. Para la cuantificación de dichas propiedades existen actualmente una serie de protocolos que se basan en el ensayo de las muestras de calzado a través de unas máquinas especialmente elaboradas para ello. La mayoría de estos protocolos y maquinaria de ensayo no están estandarizados (a excepción de algunos test), y generalmente han sido desarrollados por institutos tecnológicos que ofrecen el servicio de ensayo a las empresas fabricantes de calzado. La situación descrita entraña la siguiente problemática:

En la gran mayoría de empresas, la fase de ensayo consiste, o bien en en pruebas propias con grupos de usuarios seleccionados sin rigurosidad científica, o bien se subcontrata a institutos tecnológicos debido a que las instalaciones necesarias para ensayar presentan costes muy elevados y el conocimiento requerido para la interpretación de los resultados de los ensayos es amplio. Esto aumenta los costes del proceso de diseño, al ser un servicio que requiere un alto grado de especialización.

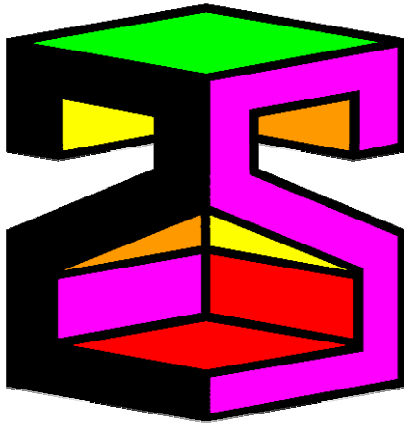
La externalización del proceso de ensayo, al igual que en el caso de la fabricación, fuerza la pérdida del control del proceso lo que abre la puerta a mayores retrasos.

Finalmente, si los resultados de los ensayos son satisfactorios se pasa a la fase de fabricación. Sin embargo, en el caso de que el diseño no cumpla con las expectativas, el proceso comienza de nuevo, volviendo a la fase de diseño de detalle, para llevar a cabo cambios en el diseño que mejoren el comportamiento del calzado frente a las condiciones de uso establecidas. A continuación se vuelve a fabricar el nuevo prototipo y se vuelve a ensayar.

Este bucle contiene una serie de problemas, que se traducen en un incremento, generalmente importante, de los costes de tiempo y dinero, pues es posible que se tengan que desarrollar varias iteraciones hasta conseguir un diseño satisfactorio. Por tanto, este proceso de diseño se basa en una metodología de prueba-error, siendo además la experiencia la única fuente de información con la que los diseñadores cuentan para mejorar el diseño una vez ha sido rechazado. Esto hace que las modificaciones del diseño necesarias para cumplir las propiedades funcionales tengan

lugar, salvo en problemas muy claros cuando el proceso esté desarrollándose con el asesoramiento de expertos, sin información clara del posible resultado, y que por tanto el número de ciclos necesario para conseguir un producto satisfactorio aumente a más de dos en la mayoría de las ocasiones.

2. JUSTIFICACIÓN



El **confort del calzado** es uno de los aspectos más importantes tanto para los fabricantes de calzado (Chen *et al.*, 1994) como para los diseñadores (Miller *et al.*, 2000). Esto es debido a que el confort percibido por los usuarios está relacionado directamente con el éxito en la compra del producto, y también con la salud a medio y largo plazo del usuario.

El análisis del confort percibido por los usuarios al utilizar un calzado determinado ha sido abordado en la bibliografía con distintos enfoques (Hertzberg, 1972 Slater, 1985; Zhang *et al.*, 1996; De looze *et al.*, 2003). Sin embargo, dichas aproximaciones presentan una serie de limitaciones que justifican la realización de esta tesis:

- La mayoría de los estudios del confort se centran en la percepción subjetiva del usuario, sin profundizar en su relación con las propiedades funcionales de la interacción pie-calzado que la causan (Miller *et al.* 2000). Una correcta aproximación debería tratar de extraer la relación entre las propiedades funcionales de interacción y el confort percibido por el usuario, considerando tanto las medidas objetivas relativas a la interacción como las de la percepción humana (Mündermann *et al.* 2002).
- La mayoría de los análisis del confort del calzado existentes en el estado del arte se centran en una propiedad funcional concreta (p.e. el ajuste Au and Goonetilleke, 2007), sin proporcionar una visión general de la interacción al dejar de lado el resto de propiedades funcionales. Una aproximación unilateral presenta problemas en la comprensión de los efectos del calzado en el confort percibido debido a su naturaleza multidimensional (Miller *et al.*, 2000), que exige una aproximación multifactorial.
- Las herramientas CAE existentes en la actualidad para el diseño del calzado no incluyen, en ninguno de los casos, un módulo capaz de predecir el confort asociado a un determinado diseño. Dicha herramienta sería de importancia capital para las empresas fabricantes de calzado por el ahorro en costes y tiempo que conllevaría el poder ensayar directamente prototipos virtuales sin tener que desarrollar prototipos reales.

Referente al análisis de las **propiedades funcionales** del calzado, el estado del arte presenta diversos estudios que adolecen de una serie de puntos que justifican la realización de esta tesis:

- En la mayoría de las ocasiones, las propiedades funcionales del calzado han sido estudiadas por separado, lo que conlleva una pérdida de perspectiva, ya que una aproximación unidimensional no permite extraer la interacción entre todas ellas que, al fin y al cabo, es la que determina el confort percibido por el usuario.

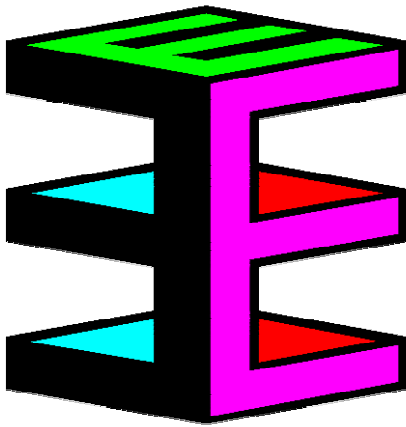
- Estudiar el rol que ejerce cada propiedad funcional en la generación del confort es muy importante pues permite a los diseñadores centrar sus esfuerzos en potenciar aquellas propiedades que maximicen el confort percibido por los usuarios.
- La compra de un calzado de calle se caracteriza por ser un proceso rápido, en el que el potencial comprador debe tomar la decisión de adquirir un producto a partir de los estímulos que éste le provee. Entender cómo las propiedades funcionales son percibidas por los usuarios en dicho proceso es muy relevante, tanto desde el punto de vista del usuario (para maximizar el ratio de acierto en encontrar calzado que satisfaga sus necesidades), como desde el punto de vista de los fabricantes (que desean aumentar sus ventas).

El estado actual de la técnica de las empresas de calzado, en las que se comienzan a utilizar aplicaciones informáticas de diseño para la conceptualización y definición de nuevos productos, no permite abordar la problemática descrita en el punto anterior mediante el uso de las nuevas tecnologías. En esta tesis se planteó el desarrollo de una aplicación informática para la reducción de costes en el proceso de diseño capaz de evaluar la calidad ergonómica del diseño del calzado a partir de prototipos virtuales en las primeras fases de desarrollo del producto. Dicha herramienta se concibe como una ayuda a los diseñadores, que les permitirá mantener la competitividad de sus productos a través de dos mecanismos principalmente:

- La reducción de plazos en el proceso de diseño, al eliminar la necesidad de fabricación de prototipos reales y el ensayo de sus propiedades funcionales con maquinaria especializada; y de costes, al eliminar la necesidad de adquirir materiales para la fabricación de prototipos y los costes de ensayo de los prototipos.
- El aumento de la calidad ergonómica de los productos diseñados desde el punto de vista de satisfacer las necesidades de confort de los usuarios, debido a que la herramienta permite ensayar desde las primeras fases de desarrollo las propiedades funcionales de los nuevos prototipos virtuales.

La herramienta CAE desarrollada permite un **diseño integral de producto** basado en la aplicación de la **ingeniería concurrente** (también llamada por muchos autores ingeniería simultánea por basarse en la ejecución de las actividades de diseño en paralelo), que aporta los siguientes beneficios:

- Reducción de los errores de diseño al mantener el control de calidad del producto desde el principio de su concepción y desarrollo del producto, sin la necesidad de fabricar prototipos y analizar sus propiedades funcionales.
- Reducción de tiempos de introducción en el mercado, con los consecuentes beneficios.
- Una vez lanzados a fabricación, la producción progresa rápidamente, puesto que el producto está bien definido, documentado y controlado, lo que permite identificar cualquier problema y solventarlo eficientemente.



3. OBJETIVOS

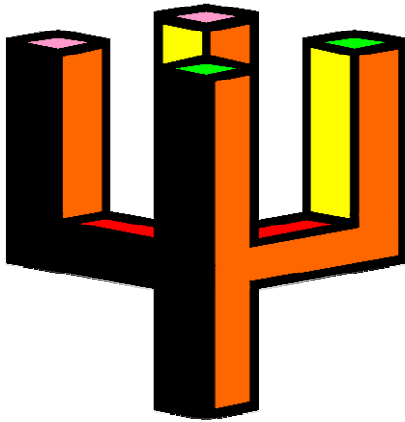
El **objetivo principal** de esta tesis es el desarrollo de una aplicación informática bajo un marco CAT (Computer Aided Testing), fundamentada en modelos matemáticos asistidos por ordenador, capaces de simular ensayos funcionales sobre diseños virtuales de calzado, y relacionar dichos resultados con la percepción del confort de los usuarios.

La consecución de este objetivo permitirá detectar y eliminar errores en el diseño del calzado con influencia en el confort desde fases tempranas de desarrollo del producto, aumentando así el confort percibido por los usuarios y la eficacia del proceso de diseño.

Para ello se definieron los siguientes **objetivos parciales**:

- Identificar las propiedades funcionales que definen la percepción de confort global derivado de la interacción entre el usuario y calzado.
- Identificar los tipos de ensayos con máquinas actualmente presentes en el mercado para la evaluación funcional de calzado, y analizar y adaptar los más adecuados considerando su capacidad de predicción de la interacción calzado-usuario.
- Generar y mejorar las metodologías de análisis de la interacción pie-calzado en los aspectos funcionales que lo necesiten.
- Elaborar modelos CAE capaces de reproducir dichos ensayos virtualmente y ajustar estos modelos para que sus representaciones sean adecuadas y sean capaces de predecir las propiedades funcionales del calzado involucradas en el confort.
- Definir y desarrollar las bases de datos que contengan el conocimiento necesario (patrones biomecánicos, antropométricos y propiedades de materiales de los componentes de calzado) para el desarrollo de ensayos virtuales de aspectos funcionales y de confort.
- Desarrollar un modelo de confort que permita predecir el confort global percibido por los usuarios a partir de los resultados de los ensayos virtuales para cada propiedad funcional del calzado.
- Diseñar, desarrollar y validar una aplicación informática que contenga todo este conocimiento y que por tanto permita evaluar las propiedades funcionales más relevantes, así como el confort, para el diseño virtual de calzado.

4. HIPÓTESIS



La **hipótesis general** que se plantea en este trabajo es que es posible conocer y modelar las características físicas y geométricas del calzado que, conjuntamente con otros factores como el tipo de usuario y otras características del entorno, definen la interacción biomecánica y fisiológica entre el usuario y el calzado; y que, finalmente, esta interacción define en parte el confort percibido por el usuario. Finalmente, el análisis de las relaciones establecidas entre la interacción calzado-usuario y el confort percibido por los usuarios permitirá desentrañar la influencia del diseño del calzado en el confort percibido y desarrollar y evaluar nuevos productos que lo optimicen.

A partir de esta hipótesis general se pueden formular **hipótesis de partida** más específicas que se contrastarán en el trabajo:

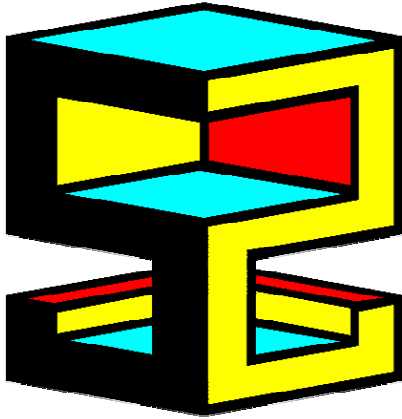
H1: Las propiedades físicas y geométricas del calzado definen, para un determinado tipo de usuario, actividad desarrollada y entorno, la interacción biomecánica y fisiológica del calzado con el usuario. Además, dicha interacción es la que en parte explica la percepción de confort del usuario.

H2: Las propiedades funcionales que actualmente se consideran para cuantificar el rendimiento funcional del calzado no son factores independientes entre sí, sino que, desde el punto de vista perceptivo del usuario, están relacionadas.

H3: No todas las propiedades funcionales utilizadas para cuantificar las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado tienen una influencia significativa en el confort percibido del usuario, y dicha influencia depende en gran medida no sólo del calzado, sino también del sujeto, las condiciones de uso y entorno.

H4: Los test con máquinas existentes actualmente en el mercado, basados en la interacción biomecánica y fisiológica entre los usuarios y el calzado, son capaces de cuantificar las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado. Además, es posible relacionar los resultados de dichos test con la percepción del usuario para predecir el nivel de confort al usar un calzado con determinado diseño.

H5: Es posible, enmarcados en una filosofía CAT que combine ensayos reales de componentes con modelos matemáticos de la interacción entre ellos, desarrollar ensayos virtuales simulando los test de laboratorio con máquinas para predecir el rendimiento funcional y el confort que percibirá un usuario al usar un determinado calzado.



5. ESTADO DEL ARTE

El objetivo principal de esta tesis consiste en el desarrollo de una aplicación informativa de apoyo al diseñador con la capacidad de predecir las propiedades funcionales que un diseño CAD de calzado proporcionaría en su interacción con el usuario, además del confort que éste percibiría. Por lo tanto, el trabajo de investigación necesario para la consecución de los objetivos de esta tesis están vinculados con tres áreas principales de conocimiento:

- el confort percibido a través del uso del calzado
- las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado
- las aplicaciones informáticas de apoyo al diseñador de calzado

En el estado del arte de las **aplicaciones informáticas de ayuda a los diseñadores de calzado** se aborda la aproximación conceptual en que se basan, el nivel de desarrollo al que han llegado estas herramientas en otros sectores, así como el alcance de las mismas en el sector del calzado.

En cuanto a las **propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado**, se describen sus fundamentos biomecánicos y fisiológicos, los aspectos del calzado más importantes para las mismas y que las configuran en su interacción con el usuario, el conocimiento existente acerca de su rol en la generación de confort o disconfort y las distintas metodologías existentes para su cuantificación.

Finalmente, se abordan los estudios del **confort percibido** por los usuarios, incluyendo un análisis del concepto de confort y de cómo se entiende su naturaleza actualmente en la bibliografía, la descripción de las relaciones encontradas entre las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado y el confort percibido, y los modelos desarrollados para su predicción a partir de las mismas.

5.1. APLICACIONES INFORMÁTICAS DE APOYO AL DISEÑO DE CALZADO

Desde la producción artesanal a mitad del siglo XIX, la fabricación del calzado evolucionó en un principio hacia la fabricación por tallas y la personalización, para adaptarse más tarde a las necesidades y a los gustos específicos de los consumidores (Boer et al. 2004). Desde entonces, y según estos mismos autores, la necesidad de sistemas de diseño automatizado más inteligentes con capacidad de simular el comportamiento del producto final, representando así soluciones más completas para la fabricación, está aumentando. Dicho crecimiento es fruto de la demanda, por parte de los usuarios, de nuevas prestaciones del producto, principalmente en personalización (Lee 2006; Leng 2006), pero también fruto del alto ratio de renovación de las colecciones en el mercado (Azariadis et al. 2007). Esta evolución del mercado sirve de estímulo a la industria del calzado que está siendo modernizada a través de la

introducción de la tecnología CAD (Computer Aided Desing) en sus procesos, lo que permite ahorrar tiempo y costes de desarrollo del producto.

A grandes rasgos, el diseño industrial implica la conversión del diseño de concepto en un producto real. Este proceso es realizado por técnicos que aseguran las proporciones y las dimensiones correctas del diseño, eligen cuidadosamente los materiales y optimizan la sencillez de su fabricación. El diseño y la fabricación de un zapato incluye las fases siguientes (Mermet y Roche 1982; Paris y Handley 2004):

1. Diseño creativo del zapato
2. Diseño industrial del zapato
3. Corte del cuero
4. Costura, montaje y acabado del zapato.

Es en las primeras dos fases cuando se define el diseño del zapato. Este proceso se conoce como el diseño conceptual y en detalle del calzado, y tiene lugar generalmente sobre el papel. Sin embargo, en los últimos años numerosas herramientas CAD y de realidad virtual (VR) se han desarrollado para apoyar este proceso (Paris y Handley 2004; Vigano et al, 2004; Leng 2006).

5.1.1. PRODUCTOS CAD PARA DISEÑO DE CALZADO

A principio de la década de los sesenta se acuñó el término CAD para designar herramientas informáticas de apoyo al diseño con un alto grado de interactividad gráfica (Sellgren, 2001). Desde entonces, el desarrollo en robótica de máquinas del control numérico (CNC), de sistemas de fabricación flexibles (FMS), y últimamente de sistemas de fabricación reconfigurables (RMS) ha ido aumentando año tras año el grado de automatización en los procesos de fabricación de las industrias.

Específicamente en el sector del calzado, los sistemas de CAD parten de la introducción de la información geométrica de la horma en el sistema a través de digitalizadores 3D. Una vez capturada la geometría de la horma y almacenada en formato digital, el diseñador comienza a elaborar el nuevo diseño de un zapato sobre dicha horma digital.

Algunas de las herramientas disponibles en el mercado en la industria del calzado para la digitalización de hormas y desarrollo de diseños conceptuales, se muestran en la Tabla 2:

HERRAMIENTA	EMPRESA	LINK
LastElf; ImagineElf	Digital Evolution System	www.desystem.com.tw
RhinoShoe	TDM Solutions	www.rhino3d-design.com/rhinoshoe.htm
RomansCAD	Lectra software	www.lectra.com
Shoemaker	Delcam software	www.footwear-cadcam.com
Shoemaster	CSM 3D	www.shoemaster.co.uk

Forma 3D, Sipeco, etc.	INESCOP	www.inescop.es
---------------------------	---------	--

Tabla 2. Herramientas disponibles en el mercado para la digitalización de hormas y desarrollo de diseños de calzado

Estas aplicaciones ofrecen al diseñador diferentes prestaciones dependiendo de la ayuda que aportan al proceso de diseño, o del nivel de penetración en el proceso de desarrollo del calzado:

- Algunas herramientas permiten el diseño en 3D de calzado virtual y en ocasiones una **simulación visual** más o menos realista del producto acabado (p.ej. ImagineElf).
- Otras permiten la traslación de dicho diseño a especificaciones de fabricación. Entre este tipo de herramientas se encuentran las que permiten desarrollar el **patronaje del corte**, es decir, que son capaces de trasladar el diseño 3D de una horma a un patrón de corte en 2D para su fabricación. Básicamente, el proceso consiste en aplanar el diseño 3D (Azariadis and Aspragathos, 2001; Azariadis and Sapidis, 2004), y la adición o el retiro del material que permita el montaje final del producto (p.ej. RomansCAD). Otras permiten la extracción de moldes para suelas (p.ej. Shoemaker)
- Existen también herramientas que integran la posibilidad de **escalar el diseño a distintas tallas** (p.ej. RhinoShoe, Sipeco), aunque los programas generalmente no incluyen medidas antropométricas para distintas poblaciones que sirvan como referencia, por lo que los criterios utilizados siguen siendo, por lo general, los tradicionales basados en la experiencia del diseñador.
- Finalmente, existen además otras aplicaciones que permiten calcular el **coste de la materia prima** del calzado diseñado (p.ej. RomansCAD).

No cabe duda que la introducción de estas aplicaciones de software CAD en la industria del calzado ha permitido mejorar en los aspectos citados el proceso de desarrollo del producto, reduciendo costes y tiempo (Azariadis et al. 2007). Sin embargo, todas estas herramientas CAD basan la ayuda que aportan al diseñador en el tratamiento de propiedades geométricas del calzado, siendo la única aproximación fuera de este marco la capacidad que ofrecen algunos módulos de modelar el aspecto de distintos materiales para mejorar la presentación del diseño virtual desde el punto de vista estético y aproximarse lo más posible al aspecto de un prototipo real.

A pesar del avance que suponen dichas herramientas, ninguna de las prestaciones mencionadas anteriormente es útil para el análisis de las prestaciones funcionales del calzado, no habiéndose alcanzado ningún progreso significativo hasta el momento en el apoyo al diseño de nuevos conceptos de calzado en este sentido. Los sistemas CAD específicamente desarrollados para el mercado de la fabricación de calzado apoyan los procesos de diseño estético y fabricación, dejando de lado el apoyo al diseño de productos que satisfagan las necesidades funcionales de los usuarios. La capacidad de predicción de la flexibilidad, la rigidez, el ajuste, la absorción de impactos o el confort térmico, y finalmente del confort que es capaz de proporcionar un determinado diseño

calzado no han sido nunca contemplados desde el punto de vista de las tecnologías CAD de apoyo al diseño de calzado.

5.1.2. TECNOLOGÍAS CAE Y CAT

Un producto debe cumplir una serie de requisitos para satisfacer las expectativas de los clientes en términos de funcionalidad, fiabilidad y durabilidad, y todo ello manteniendo un margen entre lo que está dispuesto a pagar el cliente y lo que cuesta el producto de fabricar.

Para asegurar estos requisitos, tradicionalmente la evaluación de prototipos físicos ha desempeñado un papel principal en el análisis y resolución de las debilidades en el diseño de productos, previo a la etapa de producción. Esencialmente, el objetivo de los test con prototipos físicos es el de asegurar el correcto funcionamiento del producto una vez en el mercado.

Durante los últimos años la capacidad de modelización y simulación de sistemas complejos ha crecido enormemente de la mano de los avances tecnológicos, principalmente de la ciencia informática. Las herramientas **CAE (Computer Aided Engineering)** son capaces de crear y manipular modelos analíticos que permiten simular condiciones de uso y por tanto cuantificar las prestaciones de los productos. Gracias a esta aproximación, las herramientas CAE están tomando cada vez mayor relevancia para la industria en distintos sectores como el de la automoción o aeronáutica, pues permite mejorar la calidad del diseño asegurando unas mayores probabilidades de éxito en el mercado eliminando la etapa clásica del proceso de diseño de fabricación y ensayo de prototipos físicos con un alto coste de dinero y tiempo (Sellgren, 2001).

No todos los procesos de diseño de producto son susceptibles de adoptar una tecnología CAE con éxito. Dependiendo de cada caso, es decir, del tipo de producto o propiedad funcional a modelar, tendrá más o menos sentido dar el salto a las tecnologías CAE, o permanecer con el sistema clásico de fabricación y ensayos de prototipos físicos.

Para decidir cuándo es apropiado utilizar la tecnología CAE y cuándo es más apropiado utilizar la prueba física, o cuándo se deben combinar ambas, existen una serie de aspectos que se deben considerar:

- **Profundidad de análisis:** Por una parte, el uso del CAE permite una aproximación sistémica y la optimización multifactorial que, en el mejor de los casos, es incómoda en el dominio físico de la prueba. Siempre que se requiera una comprensión detallada de un sistema, y especialmente cuando el modelo CAD del producto está disponible, es probable que sea más eficiente un acercamiento CAE. Por ejemplo, en el caso del diseño de calzado, la capacidad de absorción de impactos es una propiedad definida principalmente por la combinación de materiales de la suela y plantilla (problema de optimización multifactorial), siendo además posible modelar el calzado sencillamente como un “sándwich” de materiales (modelo CAD disponible), por lo que reúne unas características óptimas para aproximación CAE.
- **Complejidad de modelado:** Algunos sistemas, con los cuales estamos muy familiarizados, en ocasiones son extremadamente difíciles de modelar debido a la

complejidad de los procesos implicados. En tal caso, para poder modelar con la exactitud requerida dichos sistemas se requiere una aproximación tradicional al desarrollo y ensayo con prototipos físicos. En el caso del calzado, las propiedades de fricción representan un sistema que cae dentro de esta categoría por ser extramadamente complejo de modelar.

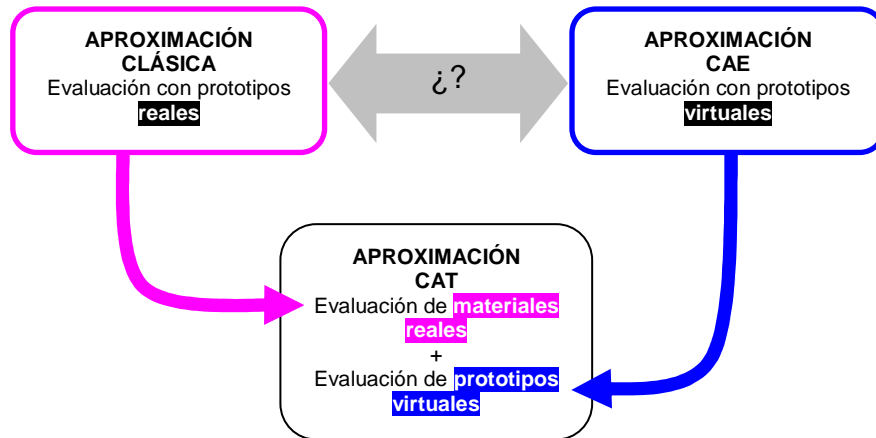


Figura 2. Aproximaciones a la evaluación de las propiedades funcionales de un producto durante su proceso de desarrollo.

A pesar de las diferencias expuestas, la línea que separa ambas aproximaciones, la de la prueba física y la de la prueba virtual, no es absoluta. Actualmente existen aproximaciones en distintos sectores que combinan ambos aspectos con el objetivo de optimizar el proceso de desarrollo. La nueva tecnología **CAT (Computer Aided Testing)**, basada en este nuevo enfoque mixto, se centra en la utilización de resultados de pruebas físicas como entrada a sistemas CAE que proporciona información valiosa respecto a las propiedades del producto (Figura 2). Un ejemplo típico de esta aproximación es la utilización de pruebas físicas para determinar el comportamiento de las partes integrantes de un sistema y la utilización de un modelo matemático virtual del comportamiento del sistema completo, basado en la implementación de las relaciones entre dichas partes integrantes (Wilkinson 2007).

En este nuevo contexto general de aproximación mixta al ensayo de prototipos virtuales y reales, los test con prototipos reales se justifican por las siguientes razones:

- **La identificación de las entradas para el modelo CAE.** Dichas entradas permiten establecer, por ejemplo, las fuerzas, las aceleraciones, las presiones, las temperaturas, etc. Estos datos son utilizados por los equipos del CAE para proporcionar la salida de la simulación que se puede relacionar directamente con el comportamiento esperado del producto
- **La validación del modelo CAE.** Las pruebas físicas proporcionan la información que permite establecer que el modelo predice comportamientos al nivel de exactitud requerido a través de la simulación de los procesos exactos que producen dicho comportamiento.

- **La validación del producto.** Finalmente, los test con prototipos físicos permiten confirmar que el producto alcanza los objetivos de la empresa en términos de funcionalidad, confiabilidad y durabilidad.

Concluyendo, el desarrollo de prototipos físicos y los ensayos de los mismos han sido tradicionalmente parte esencial del desarrollo de productos. Sólo a través de este proceso se podían descubrir las debilidades en el diseño antes de que el producto llegara a las manos de clientes. Sin embargo, durante los últimos veinte años la capacidad de llevar a cabo un detallado análisis de muchos aspectos del diseño a través de las herramientas CAE ha permitido considerar el desarrollo de productos virtuales como una aproximación realista y por tanto válida. Además, el tipo de aproximación mixta, en el que se combinan ensayos virtuales y físicos, ha demostrado que el uso más eficaz de la tecnología es a menudo cuando se reúnen las dos disciplinas (Vandeurzan 2001). De esta manera, parece ser que mientras los modelos CAE son mejores para la comprensión del comportamiento, las interacciones y la sensibilidad del sistema, las pruebas físicas son mejores en la identificación de absolutos de funcionamiento y de la respuesta de sistemas complejos. Las características de ambos tipos de tecnologías fuerzan, en pos de la optimización, a la implementación de una aproximación híbrida en la mayoría de los casos.

Mientras que existen sectores donde la implantación de esta tecnología está extendida (p.e. automoción, aeronáutica, naval, etc.), su implantación en el sector del calzado es inexistente. Las causas parecen ser diversas:

- El bajo nivel tecnológico del sector ralentiza el proceso, haciendo muy difícil la implantación de nuevas herramientas basadas en tecnología.
- El bajo nivel formativo del sector, fundamentado en conocimientos tradicionales basados en la experiencia de los diseñadores y fabricantes.
- La falta de conocimiento científico acerca de la relación entre propiedades del diseño del calzado y el efecto de éstas en su interacción con el usuario.

A pesar de que la tendencia actual del sector del calzado no es ajena a la evolución de las herramientas CAE y CAD de los últimos años, no se conoce actualmente ninguna aproximación en el sector del calzado a una herramienta capaz de evaluar diseños virtuales de calzado, a pesar de la potencia que confiere, antes comentada, la aproximación CAT tanto desde el mundo físico como del virtual.

5.2. CONFORT EN EL CALZADO

5.2.1. DEFINICION DE CONFORT

El confort del calzado es uno de los aspectos más importantes tanto para los fabricantes de calzado (Chen *et al.*, 1994) como para los diseñadores (Miller *et al.*, 2000).

El confort es considerado como un fenómeno de naturaleza multifactorial que ha sido definido en la bibliografía de diferentes maneras como la falta de disconfort (Hertzberg, 1972), un estado placentero psicológico, fisiológico y en armonía física con el entorno (Slater, 1985), o una sensación de relajación y bienestar (Zhang *et al.*, 1996). En un intento de aunar criterios, De looze *et al.* (2003) apunta a tres aspectos

básicos que caracterizan el confort en los que, parece ser, hay acuerdo en la bibliografía:

- Es de naturaleza subjetiva y personal.
- Está influido por factores de distinta naturaleza (física, fisiológica y psicológica).
- Es una reacción frente al entorno.

En los últimos años han tenido lugar una serie de investigaciones en el terreno del confort analizando uno de los aspectos clave sobre la naturaleza del mismo, que es la distinción entre la percepción de confort y la percepción de discomfort. En este sentido, la mayoría de estudios consideran que el confort y el discomfort suelen ser como los extremos opuestos de una misma escala lineal (la ausencia de uno implica la existencia del otro y viceversa). Sin embargo, existen algunos estudios centrados en las diferencias entre confort y discomfort que han encontrado relaciones no lineales entre ellos (Helander, 2003; Helander and Zhang, 1997; Kuijt-Evers et al., 2005; Kuijt-Evers et al., 2004; Monette et al., 1999; Zhang and Helander, 1996). Dichos estudios, que consideran tanto los aspectos físicos como los psicológicos, sugieren que mientras que la percepción de confort está más relacionada con los aspectos psicológicos, como la sensación de bienestar y placer, la percepción de discomfort parece estar más relacionada con aspectos de naturaleza más física, como la sensación de incomodidad o de dolor.

Aunque los estudios centrados a este respecto han sido realizados en sectores distintos del calzado (p.e. mobiliario o herramientas de mano), existen estudios que al aplicar el diferencial semántico a la percepción visual del calzado de calle (Alcántara et al. 2005a, Alcántara et al. 2005b) demuestran que la percepción que los usuarios tienen del confort es muy compleja, interrelacionando aspectos como la percepción estética y la funcionalidad, y que no siempre el concepto comodidad se percibe como opuesto a incomodidad.

Otra de las conclusiones que se pueden extraer de estos estudios (Alcántara et al. 2005a; Alcántara et al. 2005b) es la relación existente entre la percepción de las propiedades funcionales y la percepción del confort: en el mismo eje semántico se alinean las percepciones de “cómodo”, “amoldable”, “anatómico”, “ancho”, “antideslizante”, “ergonómico”, “estable”, “flexible”, entre otras. Este estudio sugiere que la predicción de la percepción del confort de los usuarios pasa por la caracterización de las propiedades funcionales de la interacción entre calzado y usuario.

A continuación se analizan los factores más relevantes para la percepción del confort haciendo especial hincapié en las propiedades funcionales del calzado.

5.2.2. FACTORES RELEVANTES PARA EL CONFORT EN EL CALZADO

Como se ha comentado, el confort es una compleja entidad con múltiples facetas. Para que un calzado se considere confortable debe proporcionar la sensación correcta y además no producir ningún tipo de dolor (Miller *et al.*, 2000; Goonetilleke *et al.*, 2001). El confort en el calzado parece estar relacionado con la fatiga, el desarrollo de lesiones

y el rendimiento, así como con muchas otras propiedades del calzado como el tamaño, la forma, la flexibilidad, el estilo, el peso, el micro-clima dentro del zapato, los materiales, la amortiguación, etc. (Alcántara et al. 2005a; Alcántara et al.2005b).

Según Slater (1985) el confort puede estar influenciado por factores biomecánicos, fisiológicos y psicológicos. A continuación se describen los estudios llevados a cabo analizando la influencia de estos tres factores en el confort.

5.2.2.1. Confort biomecánico

El confort biomecánico es el resultado de una compleja interacción entre el usuario y el entorno, en el que diferentes aspectos del diseño del calzado afectan a la función del pie durante el desarrollo de actividades humanas. Desde el punto de vista de la biomecánica, se puede considerar que existen multitud de aspectos funcionales que lo afectan (Tabla 3):

Aspectos que afectan al CONFORT DEL CALZADO	Absorción de impactos	La forma y tamaño del pie	La fricción con el suelo
La distribución de presiones	La adaptación al movimiento del pie	La fricción entre el calzado y la planta del pie	El rendimiento y la fatiga.

Tabla 3. Diferentes aspectos que influyen el confort percibido

A continuación se repasan los estudios que analizan la influencia en el confort percibido de cada una de las propiedades funcionales biomecánicas de la interacción entre calzado y usuario:

- **Absorción de impactos:** El impacto del talón con el suelo se transmite a través de las articulaciones del tobillo, rodilla y cadera hasta la espina dorsal y la cabeza (Chu y Yazdani-Ardakani, 1986). Existen evidencias experimentales entre impactos repetitivos y desórdenes degenerativos de las articulaciones (Radin, 1980; Broom, 1986; Radin, 1987).

Algunos autores defienden que la capacidad de absorción de impactos del calzado es el factor más importante en la percepción del confort relacionado con la suela, entresuela y plantilla (Wilson, 1993; Turner, 1993). En esta línea, se han obtenido correlaciones entre el uso de suelas demasiado duras con incrementos de dolor en el talón y la zona lumbar (García, 1994). Otros estudios han encontrado correlaciones entre el nivel de amortiguación y la percepción de impactos con las variables mecánicas relacionadas con los impactos (Hennig *et al.*, 1994; Lake *et al.*, 1998; Salter, 1985; Goonetilleke, 1988). Por tanto es muy posible que la amortiguación y la percepción de impactos influyan en el confort.

La efectividad de los materiales usados como plantillas para atenuar la fuerzas de reacción del suelo está bien documentada en la bibliografía (Basford *et al.*, 1988; Johnson, 1994; Tooms *et al.*, 1987; Light *et al.*, 1980). La capacidad de las plantillas de reducir el impacto de talón en las piernas y en la zona baja de la espalda puede

llegar hasta el 50% (Light *et al.*, 1980), además de ser capaz de disminuir los síntomas de dolor de espalda crónico (Wosk *et al.*, 1985) y de degeneración articular (Voloshin *et al.*, 1981). En actividades que requieren permanecer largos tiempos en bipedestación, plantillas acolchadas son recomendadas para reducir el dolor de espalda (Sovel *et al.*, 2001). Finalmente, de igual manera, en otros estudios se sostiene que el uso de plantillas reduce el dolor de espalda, rodilla y piernas así como de pies (Basford *et al.*, 1988; Johnson, 1994; Carley, 1998).

Todos estos estudios demuestran que la capacidad de la absorción de impactos del calzado juega un papel relevante tanto en la salud de los usuarios como en el confort.

- **Distribución de presiones plantares:** Desde el punto de vista de la salud, la distribución de presiones es muy relevante, principalmente para diabéticos. La disminución de su sensibilidad plantar hace muy relevante la capacidad del calzado de distribuir presiones del calzado, pues es clave para evitar la aparición de llagas y ulceraciones.

Varias aportaciones sugieren que para que un calzado sea percibido como confortable ha de producir presiones mínimas y distribuidas uniformemente (sin picos de presión) sobre la planta del pie (Cavanagh, 1980; Chen *et al.*, 1994; Chen *et al.*, 1995; Whittle *et al.*, 1992). Dicho de otra manera, si el calzado no produce irritaciones y mantiene las presiones sobre la planta del pie bajo ciertos umbrales, entonces el calzado puede ser percibido como confortable. En el caso de actividad deportiva, tanto el confort como el riesgo de lesiones dependen en cierta medida de la distribución de presiones, llegando incluso en algunas situaciones a determinar si el calzado es o no el adecuado para la práctica de algunas disciplinas (Schaff *et al.*, 1987).

Por tanto, la distribución de presiones sobre la planta del pie es de gran importancia tanto desde el punto de vista ortopédico y biomecánico, como desde el punto de vista del confort percibido.

- **Ajuste:** Aparentemente el ajuste es un factor decisivo en la decisión de compra, y parece evidente que un ajuste adecuado es uno de los factores más influyentes en la percepción de confort (Nigg, 1986c; Perkins *et al.*, 1993; Audemars *et al.*, 1978; Mayer *et al.*, 1982).

Por ello, se sugiere que para que un calzado sea percibido como confortable debe ajustar su forma de volumen interno al volumen del pie del usuario (Hawes *et al.*, 1994a; Hawes *et al.*, 1994b; Nigg, 1986c). Sin embargo, no está nada claro cómo las dimensiones y forma del calzado y su interacción con el pie afectan al confort subjetivo (Hawes *et al.*, 1994, Miller *et al.*, 2000).

Estudios recientes con distintas tipologías de calzado, como calzados deportivos (Miller *et al.* 2000), calzado urbano de hombre (Witana *et al.* 2004) o calzados de mujer de tacón (Au y Goonetilleke, 2007) se han llevado a cabo para analizar la influencia del ajuste en el confort. Mientras que el estudio de Miller *et al.* (2000) se limita a indicar la importancia del ajuste en el confort percibido, el de Au y Goonetilleke (2007) lo cuantifica basándose en la percepción del ajuste de los usuarios en zonas del calzado, y el de Witana *et al.* (2004), aunque cuantifica el

ajuste en todo el pie, así como en la zona del empeine y los dedos de manera específica, no aborda el problema de cuantificar sus importancias relativas en la percepción global del ajuste, generando una medida del ajuste que no aporta demasiadas pistas para el diseño del calzado.

Dichos estudios sugieren que la importancia del ajuste para el confort percibido es, comparada con el resto de propiedades funcionales, muy grande.

- **Adaptación al movimiento del pie:** La capacidad del pie de ejercer sus funciones depende en gran medida de la adaptación del calzado a sus movimientos (Miller *et al.*, 2000). La construcción del calzado tiene una influencia significativa en la pronación y en la carga del pie (Nigg y Bahlsen., 1988). Además existen estudios que sugieren (Chen *et al.*, 1994) que la flexibilidad y la rigidez a torsión son factores importantes en el calzado deportivo.

Todos estos estudios sugieren que la capacidad del calzado de adaptarse a los movimientos del pie depende de las diferentes propiedades mecánicas de los componentes del calzado (p.e. rigidez de los materiales, morfología de la horma, tipología de su construcción, etc.) y también de la actividad realizada (p.e. correr, andar). Dichas propiedades son las que configuran el calzado para satisfacer las necesidades funcionales del usuario en cada actividad, siendo muy importantes para el confort.

- **Fricción calzado-suelo:** Existen estudios que reflejan la influencia de la fricción tanto en la seguridad como en el confort percibido (Leclercq *et al.* 1994; Leclercq *et al.* 1995; Lund, 1984^a; Lund, 1984^b; Tisserand, 1985). De hecho, está comprobado que dependiendo de la fricción percibida, los humanos adaptan su patrón de marcha para minimizar el riesgo de caída por resbalón (Durá *et al.* 2005). En este sentido, la literatura sugiere que una correcta fricción entre la suela y el pavimento es necesaria para que se mantenga un patrón de marcha normal, y que la fricción debe mantenerse dentro de un determinado rango para asegurar el confort del usuario (Zamora *et al.* 2008).

Por tanto, la literatura sugiere que no sólo el nivel de fricción entre pavimento y calzado tiene una influencia en el confort percibido, sino que también la percepción que el usuario tiene de las propiedades de agarre del pavimento son importantes.

- **Fricción pie-calzado:** Muchas de las lesiones que aparecen en el pie, según Laing & Klenerman (1991), Boulton (1987), Landsman y Sage (1997) debido a los esfuerzos mecánicos que el calzado ejerce sobre la piel y tejido interno de la planta del pie. Existen dos tipos de sollicitaciones mecánicas: una vertical, aplicada normal a la superficie del pie, y otra horizontal aplicada tangencialmente a la planta del pie. Mientras que las sollicitaciones verticales causan heridas por los repetidos ciclos de compresión a los que somete el tejido, los esfuerzos horizontales, también llamados esfuerzos cortantes, causan el deslizamiento entre los tejidos superficiales y los internos.

La combinación de estos dos tipos de esfuerzos puede causar un nivel de fricción entre pie y calzado que cause disconfort, y si no se controla, problemas mucho más

agudos como callosidades, hemorragias, infecciones y finalmente, incluso necrosis en el tejido y amputación.

- **Rendimiento y Fatiga:** Nowroozi *et al.* (1983) cuantificaron el coste energético para distintas velocidades de la marcha y demostraron que el menor consumo energético fue obtenido para la velocidad catalogada por los usuarios como la más confortable. De esta forma se demuestra que el incremento del coste energético al caminar tiene una influencia sobre el confort percibido. En esta línea, también ha sido demostrado que un incremento del peso del calzado aumenta el disconfort al aumentar el consumo energético y por tanto la fatiga (Donn *et al.*, 1989).

Por tanto, el peso del calzado es una característica relevante para el confort percibido, siendo los calzados más pesados menos confortables (García, 1994).

5.2.2.2. Confort fisiológico

Por confort fisiológico se entiende aquel derivado de la interacción física no mecánica entre el usuario y el calzado.

Los aspectos climáticos del calzado, principalmente el aislamiento térmico (intercambio de energías con el medioambiente) y la transpirabilidad (intercambio de vapor de agua entre calzado y entorno), son factores decisivos para el confort fisiológico del usuario (Kurz, 1994; Kawabata *et al.*, 1993).

Estos aspectos climáticos de la interacción pie-calzado, caracterizados por la humedad relativa y la temperatura ambiente, influyen en el confort percibido más a largo plazo que la mayoría de aspectos biomecánicos.

La acumulación de humedad en el interior del calzado combinada con el calor generado por el pie crea un microclima caliente y húmedo que ha sido asociado con la percepción de disconfort (Rissanen, 1997). Dicha influencia puede ir más allá aún, llegando a desestabilizar el sistema biomecánico del pie-calzado provocando un disconfort mecánico (p.ej. la reducción de las características mecánicas de los tejidos causada por la exposición a ambientes de alta humedad o el decrecimiento de atributos sensorimotrices en bajas temperaturas). El disconfort térmico mantenido a largo plazo puede incluso llegar a crear dolor y degradación de los tejidos.

5.2.2.3. Confort psicológico

El disconfort mecánico y fisiológico puede llevar al disconfort psicológico. Un disconfort o un dolor sentido de manera repetitiva puede causar una falta de concentración y estrés mental, lo que llevado al extremo puede generar golpes de calor a causa de la exposición a altas temperaturas (Slater, 1985).

Otros factores como la moda, los prejuicios sociales, etc. pueden llegar a influir en el confort percibido. Por ejemplo, un aspecto del confort relacionado con la moda que afecta mecánicamente, fisiológicamente y psicológicamente es el ajuste del calzado. Un ajuste excesivo entre el pie y el calzado produce tanto un disconfort biomecánico como un disconfort fisiológico por la reducción del flujo sanguíneo y por tanto una reducción del enfriamiento convectivo, que sin embargo es tolerado porque el disconfort biomecánico y fisiológico es incompatible con el disconfort psicológico

derivado de no encajar en un determinado contexto social en que ese tipo de calzado se utiliza.

El calzado que vestimos ha de mostrarnos como deseamos que nos vea la sociedad, y en virtud de esta necesidad psicológica sacrificamos nuestro confort biomecánico y fisiológico llegando incluso a lastimarnos en el proceso (Slater, 1985).

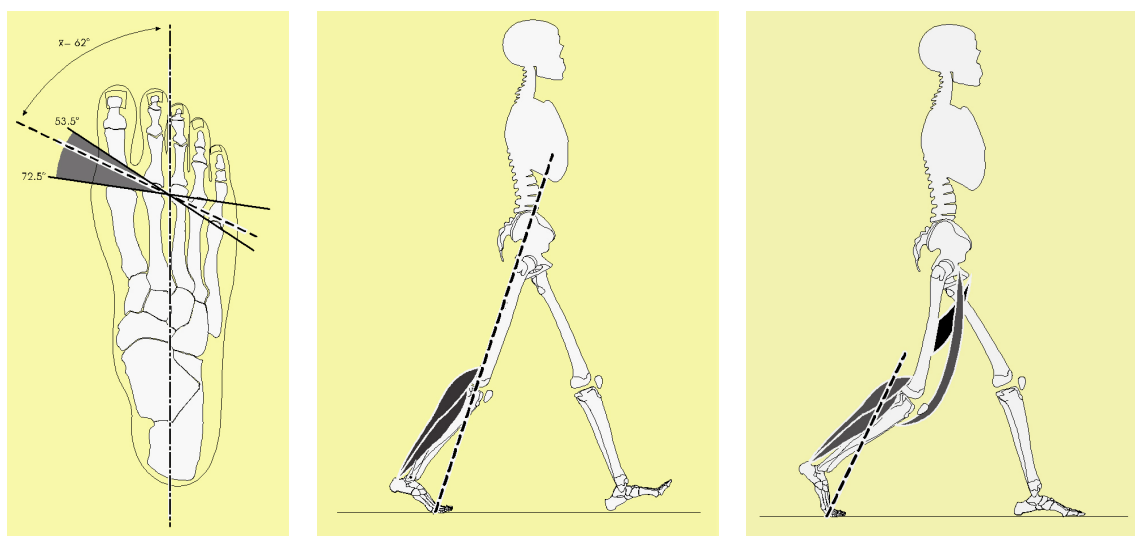
5.3. PROPIEDADES FUNCIONALES BIOMECÁNICAS Y FISIOLÓGICAS DEL CALZADO

5.3.1. FLEXIBILIDAD

Una de las articulaciones más importantes del pie por el grado de flexión que alcanza es la articulación metatarsofalángica. Ésta articulación es importante pues permite a los dedos flexionar. La flexión de los dedos es de suma importancia durante la marcha, pues permite desarrollar una propulsión óptima durante los últimos instantes de apoyo.

Desde el punto de vista cinemático, la articulación metatarsofalángica efectúa dos flexiones principales: en primer lugar efectúa una flexión de entre 20° y 30° hacia el final del apoyo y una flexión de hasta 55° en la fase de preparación del balanceo (Rossi, 1986).

El final del apoyo ocurre aproximadamente entre el 30% y el 50% del ciclo de marcha. El objetivo principal de esta fase es conseguir la aceleración necesaria para propulsar el cuerpo hacia adelante y es consecuencia de la caída del centro de masas hacia adelante conjuntamente con la acción concéntrica del triceps surae (Gage, 1990). Cuando dicha aceleración es alcanzada el cuerpo cae hacia adelante y pivota sobre la articulación metatarsofalángica, que actúa como pivote sobre el suelo. En el plano del suelo, la inclinación del eje formado por las cabezas metatarsales y el sentido de la marcha es de 60° aproximadamente. A continuación el cuerpo pivota sobre la articulación y hacia el final de la fase la flexión dorsal de la articulación metatarsofalángica está inclinada entre 20° y 30° (Figura 3).



(a). Flexión natural

del eje de la articulación metatarsofalángica

(b). Fase de pre-balanceo

(c). Fase final del apoyo.

Figura 3. Ángulos de la articulación metatarsofalángica durante el ciclo de marcha. Extraído de la “Biomecánica de la marcha humana normal y patológica” (1993).

A continuación, el objetivo general de los últimos instantes de apoyo, que ocurren entre el 50% y el 60% del ciclo de marcha, es preparar la fase de oscilación del pie. El contacto inicial del miembro inferior propuesto marca su inicio, así como el inicio de la fase de doble apoyo. Gracias a la descarga que supone la entrada en juego de la pierna opuesta, el momento dorsiflexor sobre el pie disminuye lo que permite a los flexores plantares dominar y por tanto generar una flexión del tobillo y la rodilla que reduce la caída del centro de masa y por tanto el consumo de energía. Durante esta fase la flexión de la articulación metatarsofalángica alcanza los 55º en el plano sagital (Figura 4).

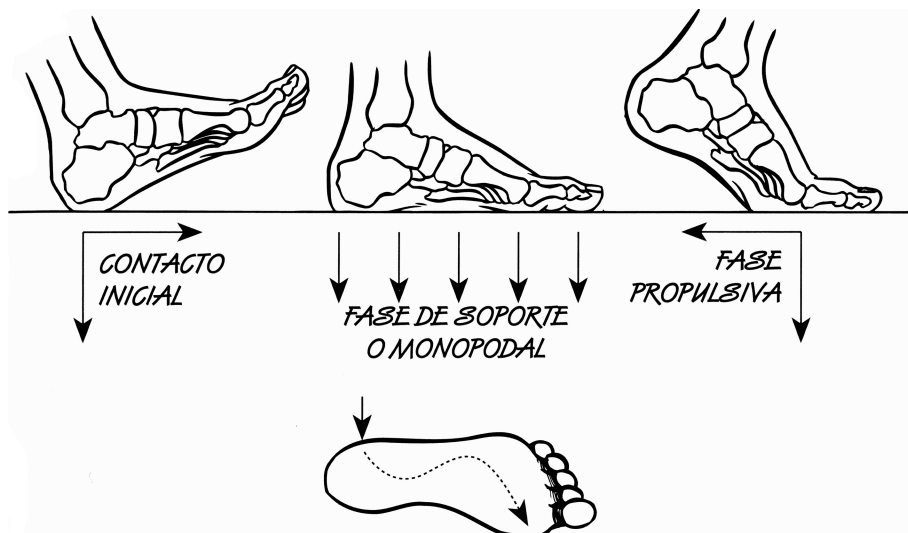


Figura 4. Flexión de la articulación metatarsofalángica durante el ciclo de marcha. Las flechas indican la dirección de las fuerzas aplicadas por el pie sobre el suelo. Extraído de la “Guía de recomendaciones para el diseño del calzado del IBV” (1995).

5.3.1.1. Factores que influyen la flexibilidad

Existen diversos factores que influyen en la flexión del pie durante el ciclo de marcha.

- **Edad:** La edad tiene un efecto directo en la flexibilidad de las articulaciones del cuerpo en general, y las articulaciones del pie no son una excepción. Durante la infancia el pie presenta un grado de flexibilidad muy grande, incluyendo no sólo la articulación metatarsofalángica, sino también el resto de articulaciones, permitiendo al pie desarrollar el rol sensorial que juega durante esta etapa. A medida que el usuario crece, dicho rol sensorial se va perdiendo para adquirir un rol más de estructura sustentante, hasta entrar en edad adulta. A cierta edad la flexibilidad del pie se ha reducido considerablemente, siendo la principal función de la articulación metatarsofalángica la propulsión. Finalmente, durante la 3ª edad

las articulaciones se rigidizan y la articulación metatarsofalángica no es una excepción, lo que influye en su rendimiento.

Esta variación en el rol y la capacidad de las articulaciones del pie hace que la flexibilidad sea una propiedad funcional muy relevante en calzados dirigidos a determinados sectores poblacionales, como la infancia o la 3ª edad, que aseguren el confort de los usuarios.

- **Fisiología específica de cada sujeto:** Existen diferencias muy acusadas de flexibilidad en las articulaciones dependiendo del sujeto que tienen su reflejo en la flexibilidad de la articulación metatarsofalángica. A pesar de ello, la flexión máxima de la articulación metatarsofalángica varía entre 20 y 55º como media dependiendo del usuario adulto (Rossi, 1986), lo que en principio debería ser permitido por cualquier calzado para asegurar el confort.
- **Patrón biomecánico (cadencia y velocidad de marcha):** Normalmente el aumento de la velocidad de marcha conlleva un alargamiento de la zancada, que conlleva a su vez un aumento de la flexión del pie por la articulación metatarsofalángica. Este efecto de aumento de la flexión permite aumentar las fuerzas de propulsión a través del trabajo de las falanges, pero exige una mayor capacidad del calzado de flexionar por la articulación metatarsofalángica para asegurar el confort y el rendimiento funcional.

5.3.1.2. Influencia del calzado en la flexibilidad

La flexibilidad del calzado tiene un claro efecto en la efectividad de la marcha y la percepción del confort, y son numerosos los estudios que se han llevado a cabo relacionándola con el rendimiento del calzado (Miller et al, 2000; Rossi, 1986; Shorten et al. 1988; Stefanyshyn & Nigg, 1997).

En un estudio llevado a cabo por (Shorten et al. 1988) con el objetivo de analizar el efecto de la rigidez del calzado en la flexión de la articulación metatarsofalángica, se obtuvo como resultado flexiones máximas medias de 55'5º para la marcha descalzos, 40'7º con calzado flexible y 35'1º con un calzado más rígido, lo cual implica una reducción de más del 20% en la flexión del pie entre las condiciones calzado-rígido y descalzo.

Estudios previos en el IBV arrojan resultados parecidos de flexión de la articulación con el uso del calzado (una media de 32.7º). Además, el hecho de que al llevar calzados más rígidos se produzcan mayores fuerzas de reacción del suelo durante la fase del despegue sugiere que el momento de flexión es mayor para calzados más rígidos, lo que produciría un mayor consumo energético y por tanto un mayor discomfort, si se considera que, desde el punto de vista energético, estudios previos con atletas muestran que la articulación metatarsofalángica es capaz de absorber grandes cantidades de energía (Stefanyshyn & Nigg, 1997).

Por otra parte, parece ser de suma importancia el ajuste entre los ejes de flexión del calzado y la articulación metatarsofalángica. De hecho, si dicha alineación no es adecuada el usuario trata de flexionar sobre su eje natural pero el calzado no lo permitirá produciendo dolor y discomfort. Por tanto, es necesario para asegurar el confort un correcto ajuste de la posición de ambos ejes de flexión (Miller et al, 2000).

Finalmente, es muy importante el efecto tanto de la altura de tacón (Figura 5) como de la elevación de la puntera (Figura 6), ya que el efecto de estas dos características del calzado es introducir una pre-flexión en la articulación metatarsofalángica, limitando por tanto el rango de flexión de la articulación. Ambos efectos se pueden observar en la figuras. Es frecuente registrar flexiones máximas en la articulación metatarsofalángica de sólo 25° si se ha forzado el pie a tener una inclinación previa de 30° mediante el uso de un tacón excesivo (Rossi, 1986).



Figura 5. Efecto de la altura de tacón y ángulo de puntera en la flexión. Extraído de la "Guía de recomendaciones para el diseño del calzado del IBV" (1995).

Además es posible que la incorporación en calzados de un ángulo de la suela en la puntera sea en parte responsable de un aumento del consumo energético producido en la articulación metatarsofalángica pues a los dedos no se les permite retornar a su posición de reposo (Stefanyshyn & Nigg, 1997). Por otra parte esta conclusión se opone a la encontrada por Cavanagh (1980) que asegura que la inclusión de un ángulo de la suela en la puntera mejora la eficiencia de la marcha durante las fases de propulsión y despegue.

Sea cual sea el caso, un efecto claro del ángulo de la suela en la puntera es la reducción de la necesidad de flexión en la articulación metatarsofalángica, pues introduce una pre-flexión en la articulación de la misma forma que lo hace el tacón.

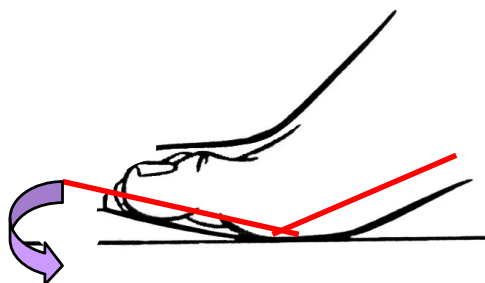


Figura 6. Pre-flexión producida por el ángulo de la suela en la puntera.

A la luz de estos estudios, parece que la geometría y materiales de la suela son aspectos del diseño con mucha influencia en la flexión del calzado. Desde el punto de vista del rendimiento funcional del calzado, existen estudios demostrando que un calzado con poca flexión induce una pérdida del mismo (Stefanyshyn & Nigg, 1997; Shorten et al. 1988), mientras que, desde el punto de vista del confort percibido parece que ocurre lo mismo (Miller et al, 2000).

5.3.2. ABSORCIÓN DE IMPACTOS

La absorción de impactos ha sido relacionada tanto con la percepción de confort como con la salud de los usuarios (Alcántara, 2001; Miller et al. 2000).

Durante la marcha, el primer punto de contacto con el suelo ocurre en el talón, y se conoce como impacto de talón. Estos repetidos impactos de talón en cada paso producen ondas de carga cíclicas de hasta 100 Hz (Collins y Whittle, 1989; Folman et al., 1986; Munro et al., 1975; Perry, 1983; Voloshin y Wosk, 1981) que se transmiten a través de la cadena musculoesquelética desde el talón hasta la cabeza (Light et al., 1980; Voloshin y Wosk, 1981; Voloshin y Wosk, 1982; Wosk y Voloshin, 1981, 1985; Chu y Yazdani-Ardakani, 1986; Collins y Whittle, 1989; Lewis et al., 1991; Shorten y Winslow, 1992; Noe et al., 1993).

El impacto de talón es una fuerza de alta magnitud aplicada en un periodo corto de tiempo (Robbins and Gouw, 1990) durante los 50 ms iniciales de la fase de apoyo del ciclo de marcha. Tiene una duración de entre 5 y 25 ms (Folman et al. 1986; Jorgensen & Bojsen-Moeller, 1989a; Light et al., 1980; Shorten y Winslow, 1992) (Figura 7).

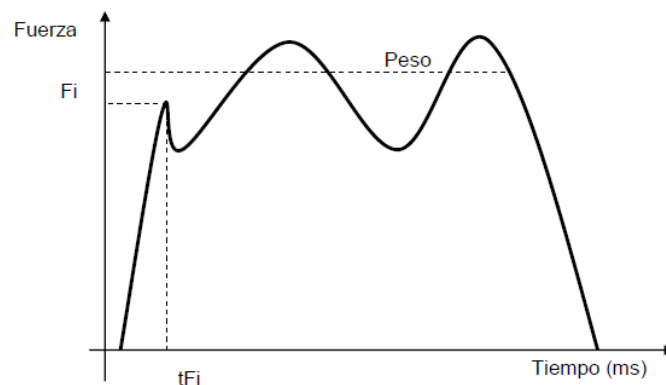


Figura 7. Fuerzas de reacción del suelo durante la marcha erguida.

La magnitud de estas fuerzas varían desde 0.5 a 1.25 veces el peso corporal, (Jefferson et al., 1990; Lewis et al., 1991) y dependen de distintos factores biomecánicos como la velocidad de marcha (Clarke et al, 1985; Shorten y Winslow, 1992), el peso corporal (Shorten y Winslow, 1992) y otros como el género, la edad o la obesidad (Bates et al., 1983). Para la marcha calzada y un impacto de 15 ms de duración, las fuerzas de impacto son típicamente de 0.5 veces el peso corporal, siendo mucho más intensas y cortas para la marcha descalza (Folman et al., 1986) (Tabla 4).

Velocidad (ms-1)	Fmax/ BW	Frecuencia (Hz)	Aceleración tibia (g)	Aceleración cabeza (g)
1.3	0.27 - 0.55	1,6 Hz	2-5	1

Tabla 4. Valores típicos de fuerzas de impacto y aceleraciones para la marcha.

Numerosos estudios con sujetos han correlacionado esta onda de choque producida por el impacto de talón con daño en los tejidos blandos, huesos, miembro inferior, columna vertebral y con degradación de las propiedades biomecánicas del cartílago articular. Por supuesto, esto causa disconfort, además de una gran variedad de problemas de salud comunes como dolor de espalda crónico, tendinitis del tendón de Aquiles, fractura de cartílagos, problemas musculares y, especialmente, fracturas por fatiga y osteoartritis (Jorgensen, 1985; Jorgensen y Bojsen-Moeller, 1989a; Lewis et al., 1991; Light et al., 1980; Milgrom et al., 1985; Nigg, 1986b; Radin y Paul, 1971; Radin et

al., 1973; 1982; Shorten y Winslow, 1992; Voloshin y Wosk, 1981; Voloshin y Wosk, 1982; Voloshin, 1993b).

Por otra parte, existen distintos mecanismos inherentes desarrollados por el ser humano para absorber y reducir impactos. (Chu & Yazdani-Ardakani, 1986; Noe et al., 1993; Voloshin y Wosk, 1981; Voloshin y Wosk, 1982). En 1973 Radin et al. mostraron que la absorción de impactos natural parece proteger las articulaciones de los daños producidos por la aplicación de cargas cíclicas.

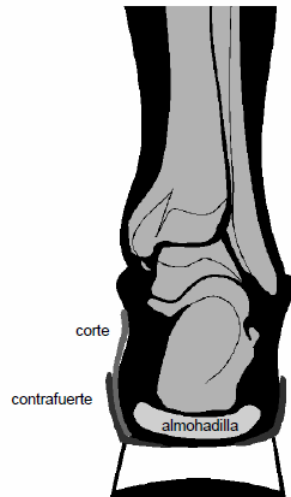


Figura 8. Anatomía trasera del talón mostrando la almohadilla del talón. Extraído de la “Biomecánica de la marcha humana normal y patológica” (1993).

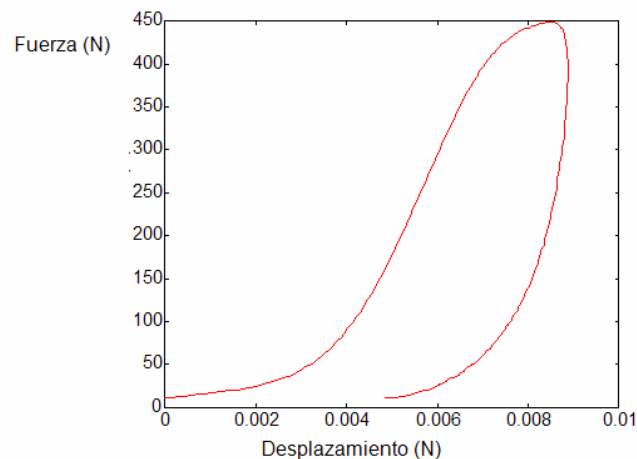


Figura 9. Curva de fuerza-desplazamiento obtenida impactando con un péndulo balístico sobre la almohadilla del talón ($v=0.62$ m/s). Extraída de las bases de datos internas del IBV.

De entre los mecanismos intrínsecos de absorción de impactos quizás el más importante situado en el sistema pie-tobillo sea la **almohadilla del talón**. Esta es una masa flexible de aproximadamente 18mm de espesor (en adultos) localizada entre el calcáneo y la piel de la planta del pie (Figura 8). Esta almohadilla de tejido blando puede llegar a absorber hasta el 90% de la energía del impacto (Chu & Yazdani-Ardakani, 1986, Jorgensen & Bojsen-Moeller, 1989a; Noe et al., 1993).

Su comportamiento mecánico no es lineal y es viscoelástica, es decir que su curva fuerza-desplazamiento depende de la intensidad y velocidad de la carga aplicada, así como de su frecuencia (Figura 9). Esta curva muestra una región de baja rigidez seguida de una zona de alta rigidez, y el desplazamiento aumenta tras alcanzarse la fuerza máxima de aplicación. Tras la aplicación de la carga, en fuerza cero queda una deformación residual que se recupera con el tiempo (Cavanagh & Lafortune, 1984a; Valiant, 1984). Por otra parte, la bibliografía confirma que las propiedades de absorción de impactos de la almohadilla del talón varían mucho de una persona a otra (Jorgensen et al., 1989b), dependiendo en gran medida de las características fisiológicas de cada individuo (Jahss et al., 1992b; Jorgensen et al., 1989b; Kinoshita, et al., 1996; Prichasuck, 1994a; Prichasuck, 1994b). Parece ser que los hombres presentan mayor espesor que las mujeres y que además éste tiende a aumentar con el

peso y la edad (Jorgensen et al., 1989b; Prichasuck et al., 1994a; Prichasuck, 1994b). Sin embargo, no ha sido todavía establecida una relación de sus propiedades de absorción de impactos con características personales como el peso, el género, el historial físico y otros aspectos (Jorgensen et al., 1989b).

5.3.2.1. Factores que influyen en la amortiguación de impactos

Existen diversos aspectos que afectan a la amortiguación de impactos durante el ciclo de marcha (Alcántara, 2001). Estos aspectos se pueden clasificar en intrínsecos y extrínsecos dependiendo de si su origen es inherente al sujeto o no. A continuación se describen algunos de los factores intrínsecos más relevantes:

- **Anatomía:** Grosor, compresibilidad y rigidez de la almohadilla plantar. El espesor medio de la almohadilla plantar varía de entre 12.5 mm a 30 mm (Gooding et al., 1986; Jorgensen, 1985; Jorgensen et al., 1989b; Khuns, 1949; Steinbach y Russell, 1964). Un mayor espesor ha sido relacionado con un fascitis plantar y dolor del talón (Amis et al., 1988; Prichasuck et al., 1994a; Prichasuck, 1994b), y un espesor menor con ulceración en diabetes (Gooding et al., 1986).

La compresibilidad ha sido cuantificada mediante el índice de compresibilidad visual para ser utilizada en valoración clínica (Jorgensen 1985) (Figura 10). Jorgensen (1985) mostró una correlación entre la compresibilidad de la almohadilla talar con la aparición de patología en el tendón de Aquiles. Y Prichasuck et al. (1994a, b) encontraron que el índice de compresibilidad era mayor para gente con problemas de dolor de talón. Finalmente, la rigidez de la almohadilla es su resistencia a la deformación bajo una carga. La naturaleza viscoelástica no lineal de la almohadilla talar hace que su comportamiento dependa de la carga aplicada.

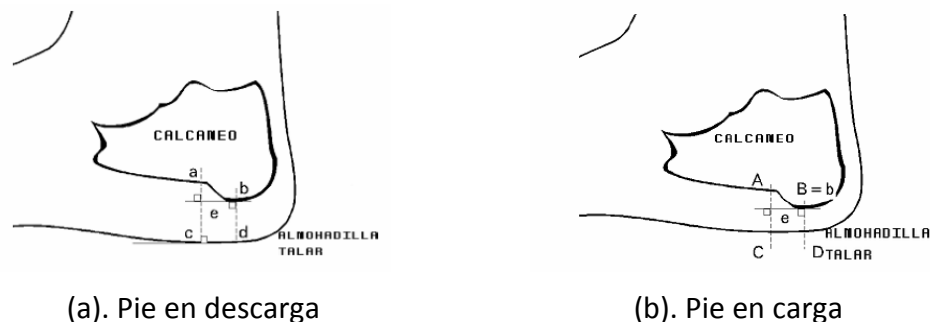


Figura 10. Definición del índice de compresibilidad. $CI=(B-D/b-d)/(A-C/a-c)$. Extraída de Jorgensen (1985).

- **Lesiones o problemas músculoesqueléticos.** El aumento de la rigidez del sistema locomotriz hace que disminuya su capacidad de absorber impactos (Jorgensen, 1985; Noe et al., 1993; Voloshin y Wosk, 1981; Voloshin y Wosk, 1982; Wosk y Voloshin, 1985), de lo que derivan numerosas lesiones y problemas músculoesqueléticos. Jorgensen (1985) relacionó la pérdida de capacidad de absorber impactos con incrementos de cargas en el tendón de Aquiles (Light et al., 1980, Voloshin y Wosk, 1981). Además, las enfermedades degenerativas también disminuyen estas propiedades en las articulaciones.

- **Fatiga:** Existe evidencia experimental de que la fatiga muscular influencia la absorción de impactos y la atenuación. Voloshin (1993a) observó una reducción del 53% en la absorción de impactos tras 24 minutos de carrera continua a una velocidad de 15km/h, mientras que Light et al. (1980) demostraron que la fatiga reduce la capacidad de control muscular y esto hace que la absorción de impactos pierda eficiencia. En la misma línea, Verbitsky et al. (1998) encontraron un aumento de la aceleración de impacto debido a la fatiga. En estas circunstancias, una ayuda externa para la absorción de impactos (p.e. del calzado) es importante.

Por otra parte, el calzado representa uno de los factores extrínsecos más importantes.

5.3.2.2. Influencia del calzado en la amortiguación de impactos

El efecto de un calzado con poca capacidad de amortiguar impactos puede ser muy negativo en el movimiento articular. Es el caso por ejemplo de botas de seguridad y calzados de tacón alto (Voloshin y Loy, 1994). De hecho, caminar con calzados de tacón alto afecta a la capacidad de absorción de impactos resultando en un incremento de las fuerzas del impacto y las aceleraciones (Voloshin y Loy, 1994).

Como se ha visto, el cuerpo humano tiene mecanismos inherentes de absorción de impactos, capaces de atenuar desde un 50% hasta un 90% las ondas de choque que llegan a la rodilla (Cavanagh y Lafortune, 1984; Forner et al., 1995; Light et al. 1980; Noe et al, 1993; Wosk y Voloshin, 1981) y hasta el 98% cuando llega a la cabeza (Forner et al., 1995; Light et al. 1980; Shorten y Winslow, 1992; Voloshin y Wosk, 1981; Wosk y Voloshin, 1981; 1985).

Sin embargo, cuando las cargas sobrepasan los límites fisiológicos de estos mecanismos naturales, normalmente tiene lugar daño musculoesquelético y de tejidos blandos (Jorgensen y Bojsen-Moeller, 1989a; Voloshin y Wosk, 1981; Voloshin y Wosk, 1982; Wosk y Voloshin, 1981) que se pueden traducir en un aumento del disconfort o incluso en aparición de lesiones.

En estos casos es necesaria la aportación de elementos externos de ayuda a la absorción de impactos como ortosis, calzado especial, materiales viscoelásticos, etc. (Jorgensen y Bojsen-Moeller, 1989a; Milgrom et al., 1985; Voloshin y Wosk, 1982; Voloshin, 1993b), especialmente con la presencia de lesiones o problemas musculoesqueléticos (Jorgensen, 1985; Noe et al., 1993; Voloshin y Wosk, 1981; Voloshin y Wosk, 1982; Wosk y Voloshin, 1985), así como la fatiga (Voloshin 1993a; Light et al. 1980; Verbitsky et al 1998).

Existen estudios basados en acelerometría que indican que la transmisión de impactos es reducida por el uso del calzado (Hennig y Lafortune, 1991; Light et al., 1980; Jaasveld et al., 1990; Voloshin y Wosk, 1981; Voloshin, 1993b). De manera similar, Light et al. (1980) mostraron que el uso de calzado reduce las fuerzas de impacto y las ondas de choque durante la marcha, y que además el uso de calzados con talón más duro aumentaba el impacto de talón. En general, el calzado deportivo muestra una capacidad de absorción de impactos mayor que el calzado de calle (Lafortune & Hennig, 1992; Smeathers, 1989; Jaasveld et al., 1990), seguramente debido al uso de materiales y diseño de geometrías más adecuados al tipo de actividad desarrollada.

Los mecanismos para la absorción de impactos de los que se vale el calzado pueden ser de dos tipos: de mejora de las propiedades intrínsecas de los propios mecanismos del sujeto y de refuerzo de dichas propiedades.

- **Mecanismos de mejora:** Estos mecanismos potencian las propiedades de absorción de impactos de los mecanismos naturales del cuerpo humano. El mecanismo natural más conocido, como ya se ha comentado, es la almohadilla talar, y el mecanismo de mejora más común es el confinamiento de la expansión de dicha almohadilla durante la compresión gracias a la geometría de la plantilla y un contrafuerte rígido. Esto hace que todo el tejido de la almohadilla se mantenga bajo el talón durante el impacto, potenciando sus propiedades amortiguadoras. Existen estudios científicos que han demostrado su efectividad en la regeneración de almohadillas lesionadas (Jorgensen & Bojsen-Moeller, 1989a; Jorgensen & Ekstrand, 1988), llegando a aumentar hasta un 50% su absorción de impactos natural (Jorgesen & Bojsen-Moeller, 1989a).
- **Mecanismos de refuerzo:** Los sistemas de refuerzo tratan de incrementar la capacidad de absorción de impactos de los mecanismos naturales. Generalmente se basan en la adición de materiales con alta capacidad de absorción de impactos en la zona del talón. Existen multitud de materiales y estructuras distintas en los calzados comerciales de hoy en día enfocados a este fin.

Los materiales usados son generalmente de naturaleza viscoelástica y no lineal (Whittle, 1997; Rome, 1990), y se pueden dividir en siete categorías distintas (Whittle, 1997) (Tabla 5):

MATERIALES usados son generalmente	Elastómeros de poliuretano (sorbotane, viscolas, etc.)	Espumas de poliuretano (Poron, PPT, etc.)	Espumas de polietileno (evazote, pelite, plastazote, etc.)
Espumas de polivinilo (Implus)	Etileno vinilo acetatos (EVAS)	Espumas sintéticas de goma (neopreno, noeno, spenco)	Siliconas y geles (technogel).

Tabla 5. Categorías distintas de materiales viscoelásticos usados en la industria del calzado

En la industria del calzado se utilizan muy a menudo todos ellos en suelas y plantillas, además de cuero, látex, corcho y mezclas de materiales. Sus propiedades mecánicas en general y su capacidad de absorción de impactos en particular vienen definidas por su composición química y estructura (Whittle, 1997) (Figura 12).

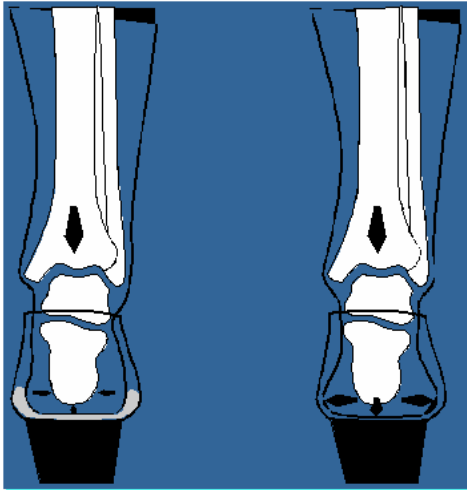


Figura 11. Efecto de la copa de la plantilla. Extraído de la “Guía de recomendaciones para el diseño del calzado del IBV” (1995).



Figura 12. Ejemplos de aplicaciones clínicas de distintos sistemas de mejora de las propiedades de absorción de impacto. Extraído de la “Guía de recomendaciones para el diseño del calzado del IBV” (1995).

Los test de laboratorio indican que la mayoría de los materiales viscoelásticos mejoran la absorción de impactos en distintas condiciones fisiológicas de los sujetos, reduciendo tanto las fuerzas de impacto como la amplitud de las ondas de choque derivadas (Pratt et al., 1990; Voloshin y Wosk, 1982). Por tanto, los materiales viscoelásticos han demostrado su capacidad paliativa de una amplia variedad de males como el dolor de espalda (Voloshin y Wosk, 1981) y el dolor de rodilla derivado de artritis (Radin et al., 1991; Voloshin y Wosk, 1982). Más aún, el uso de insertos viscoelásticos parece haber sido útil en la reducción de fatigas por estrés y patologías directamente relacionadas con la carga vertical, como por ejemplo metatarsalgias, dolor del talón y en el arco (Milgrom et al., 1985; Milgrom et al., 1992). Johnson (1988) midió una reducción de hasta un 30% en el pico de aceleración mediante el uso de calzado. Voloshin y Wosk (1981) mostraron una reducción de las fuerzas de impacto y su transmisión de hasta un 42% con la inclusión de un inserto de arco de un material de este tipo.

Todos estos estudios demuestran que el calzado tiene un efecto importante en la absorción de impactos, generalmente beneficioso. No se ha de obviar sin embargo otros estudios que sugieren que el incremento de la absorción de impactos del calzado hace a los usuarios subestimar la severidad de los impactos, lo que se traduce en lesiones (Miller et al. 2000). Por tanto, la actuación sobre la absorción de impactos del calzado, aún siendo beneficiosa en general, debería hacerse sin perjuicio de la percepción sensorial del impacto (Alcántara, 2001).

5.3.3. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PLANTARES

La distribución de presiones es una característica muy importante para la percepción de confort de los usuarios (Witana et al.2009; Miller et al. 2000), prefiriéndose calzados con firme suave que reparta las presiones evitando puntos de alta presión (Mündermann et al.2002). Es necesario, desde el punto de vista del diseño de calzado,

entender los patrones de distribución de presiones de pies sanos para poder, mediante el diseño de calzado, mejorar el confort de los usuarios. Varios autores han tratado de establecer patrones de distribución de presiones en pies sanos (Clarke, 1980; Soames, 1985; Hennig y Rosenbaum, 1991), mientras que otros han descrito distribuciones de presiones típicas de determinadas patologías (Alexander *et al.*, 1990). Por otra parte, la relación entre presiones plantares y estructura del pie ha sido abordada por Cavanagh *et al.* (1997).

La mayoría de los estudios existentes se centran en el análisis de las presiones bien en bidepestaación, bien durante el ciclo de marcha.

BIPEDESTACIÓN: La proporción de cargas sobre las diferentes regiones de la superficie plantar durante la bipedestación ha sido la forma elegida por diversos autores para describir un pie normal. Existe un acuerdo general al respecto estableciendo que la mayor parte de la carga es soportada por el talón y la región de las cabezas de los metatarsianos. Sin embargo, las proporciones entre éstas como porcentaje de la carga total, la distribución de cargas sobre el antepié y la contribución del mediopié y de los dedos en el soporte de carga dependen mucho de cada individuo.

Algunos estudios sugieren que el reparto de cargas es equitativo entre retropié y antepié (Morton, 1935; Jones, 1941), mientras que otros encuentran una proporción de 5:3 (Burger, 1952). Hutton *et al.* (1976) describieron varias posiciones confortables en bipedestación con el talón soportando entre una y tres veces la carga del antepié, el centro de presiones pasando entre 5 y 15cm por delante de la articulación del tobillo, y los dedos soportando entre el 5 y el 10% de la carga del antepié.

Todos estos estudios definen un patrón general de bipedestación en el que, aunque el reparto de cargas entre retropié, mediopié y antepié varía, parece que existe mayor carga en la zona trasera que en la delantera, siendo ambas superiores a la carga sobre la zona media.

MARCHA: Los estudios de Grundy *et al.* (1975), Cavanagh y Ae (1980), Hutton y Dhanendran (1981), Katoh *et al.* (1983a), y Soames (1985) han sido los que más han contribuido al conocimiento de la distribución de las presiones durante la marcha normal. Los resultados de dichos estudios son consistentes dentro de una variabilidad y muestran un patrón dinámico bastante claro.

En la marcha a pie descalzo, el contacto de talón se inicia en la parte posterolateral del talón (Katoh *et al.*, 1983a), y la presión máxima en la región no se alcanza hasta, aproximadamente, el 25% de la fase de apoyo (Soames, 1985), momento en que talón, parte lateral del mediopié y región metatarsiana están en contacto simultáneamente con el suelo. En el contacto inicial del talón la velocidad del centro de presiones es muy elevada, lo que indica una rápida transferencia de cargas (Cavanagh y Ae, 1980); a continuación se decelera, para acelerarse de nuevo en su paso por el mediopié.

Las presiones en el mediopié son normalmente bajas. A medida que se transfiere el peso corporal desde el retropié hacia el antepié, el centro de presiones recorre la región del mediopié, representando en este momento un valor promedio de las fuerzas de retropié y antepié más que un valor real de presión correspondiente a esta

zona (Cavanagh y Ae, 1980). El tiempo total de contacto de talón y mediopié es, aproximadamente, el 50% de la fase de apoyo.

Las presiones máximas en el antepié no se alcanzan hasta aproximadamente el 80% de la fase de apoyo. Alrededor del 40% de la fase de apoyo, el centro de presiones ya está localizado en el antepié (Cavanagh y Ae, 1980) con una marcada deceleración de la velocidad. Prosiguiendo la fase normal del apoyo, el centro de presiones finalmente migra en dirección medial, a través de las cabezas de los metatarsianos, hasta realizar el despegue (Kato *et al.*, 1983a). Las cabezas de los metatarsianos permanecen en contacto con el suelo entre el 60% y el 80% de la fase de apoyo (Soames, 1985). Existe discrepancia acerca de la aportación al impulso de cada cabeza metatarsal. Mientras que Soames (1985) encontró que las presiones máximas y los mayores impulsos (integral de la presión en el tiempo) ocurrían bajo la cabeza del 3^{er} metatarsiano, Hutton y Dhanendran (1981) encontraron presiones máximas en la cabeza del 1^{er} metatarsiano tres veces superiores a las del resto de metatarsianos.

Los máximos de las presiones y los tiempos en que se producen estos máximos en sujetos normales han sido descritos por Clarke (1980) y Rosenbaum *et al.* (1994) (Tabla 6).

	VELOCIDAD DE MARCHA		
	Lento	Normal	Rápido
Talón	293 ± 79	358 ± 87	493 ± 128
Mediopié	66 ± 52	57 ± 44	44 ± 41
Cabeza 1^o metatarsiano	265 ± 138	299 ± 137	362 ± 165
Cabezas 2^o y 3^o metatarsiano	312 ± 96	343 ± 133	355 ± 152
Dedo gordo	280 ± 110	317 ± 116	413 ± 162

Tabla 6. Presiones máximas (en kPa) en diferentes regiones del pie a tres velocidades de marcha (Rosenbaum *et al.*, 1994).

Clarke (1980) estudió la descripción detallada de los tiempos en que se producen las presiones máximas por regiones, descritos además en relación a los máximos de la fuerza de reacción del suelo (Tabla 7).

Sujetos	Retropié	Mediopié	Cabezas Metas	Dedos
27	14 - 16%	26 - 40%	77 - 79%	83 - 85%

Tabla 7. Tiempo en que se producen las presiones máximas expresado como porcentaje de la fase de apoyo del ciclo de marcha (Clarke, 1980).

En resumen, mientras que la magnitud de las presiones máximas parece ser dependiente del sistema de medida utilizado, hay una tendencia general con respecto a los tiempos en que se producen estos máximos en cada una de las regiones. En el

talón, la presión máxima ocurre antes del 20% de la fase de apoyo; en torno al 25% el antepié inicia su contribución al soporte de carga; alrededor del 50% la carga se concentra principalmente sobre las cabezas de los metatarsianos y en parte sobre los dedos y, aproximadamente, entre el 75-80% se alcanza la presión máxima en las cabezas de los metatarsianos. Por último, el dedo gordo y segundo dedo alcanzan una presión máxima alrededor del 85% de la fase de apoyo.

5.3.3.1. Factores que influyen en la distribución de presiones

Existen distintos factores relacionados con la distribución de presiones:

- **Peso corporal:** Clásicamente, el peso corporal ha sido directamente relacionado con la presencia de presiones máximas elevadas. Cavanagh *et al.* (1991a) demostraron que el peso corporal explica el 14% de la varianza de las presiones máximas tanto en pacientes diabéticos (n = 56) como en sujetos sanos (n = 27). De manera similar, Nyska *et al.* (1995), mientras estudiaban los efectos del calzado en las presiones plantares, comprobaron que los sujetos más pesados tendían a cargar menos el interior de la zona delantera del pie, lo que corresponde con los resultados de Stott *et al.* (1973) y Soames (1985).
- **Rango de movilidad articular:** La limitación de la movilidad articular también ha sido asociada con presiones elevadas. Los pacientes diabéticos presentan movilidad articular limitada tanto en el miembro superior (Rosenbloom *et al.*, 1983) como en el miembro inferior (Fernando *et al.*, 1991). Fernando *et al.* (1991) confirmaron, como previamente había sugerido Donatelli (1985), que la limitación de la movilidad articular reduce la capacidad de absorción de impactos durante la marcha y de esta forma se favorece la aparición de presiones elevadas en la planta del pie (Mueller *et al.*, 1989). Según estos autores, el pie debe ser móvil durante la marcha para posibilitar el movimiento en las articulaciones mayores, específicamente la subastragalina. Esto posibilitará al pie mantener su función de absorción de impactos, ajustarse a superficies irregulares y proporcionar la propulsión necesaria para la marcha.
- **Estructura del pie:** La heterogénea estructura del pie afecta a la distribución de las presiones plantares. Cavanagh *et al.* (1997) realizaron un estudio extenso sobre el papel de la estructura del pie bajo carga en las presiones plantares utilizando medidas radiográficas. Estos autores concluyeron, por una parte, que las medidas referentes al espesor de tejido blando comprimido y al arco plantar eran los predictores más potentes de los máximos de presión bajo el talón y la cabeza del primer metatarsiano. Además, en este estudio se demuestra que un mayor espesor del almohadillado plantar está correlacionado con menores presiones. Por otra parte, una de las regiones en que la presión está altamente influenciada por la estructura del arco longitudinal es el mediopié. La carga total bajo el mediopié es normalmente inferior al 15% del peso corporal, pero puede ser mayor en el caso de pies planos (Stokes *et al.*, 1974). Las presiones en el mediopié son usualmente bajas, aunque Hutton y Dhanendram (1979) registraron un incremento de las mismas con la edad y sugirieron como causante un colapso gradual del arco longitudinal.

- Cinemática de la marcha: La variabilidad en la distribución de presiones inter-sujetos puede ser debida principalmente a diferencias cinemáticas. Cavanagh *et al.* (1997) propusieron que, en el contacto del pie, las variables cinemáticas pueden ser las responsables de la mayor parte de la varianza de los máximos de presión en el talón. Está claro que las condiciones de marcha (velocidad, inclinación, calzado, etc.) alteran la cinemática de la marcha, de esta forma es razonable suponer que modifican también la distribución de presiones.
- Edad: Hennig and Rossenbaum (1991) llevaron a cabo un estudio para analizar la influencia de la edad en la distribución de presiones plantares. En el estudio compararon niños de 1 a 3 años con adultos. Posteriormente Hennig *et al.* (1994) extendió el estudio a niños de entre 6 a 10 años. Sus resultados muestran picos de presión mucho más pequeños para los niños que para los adultos en todas las regiones anatómicas, y atribuyeron este hecho a la presencia de un área de contacto relativa con el peso mucho mayor en niños que en adultos. Por otra parte, Kernozek y LaMott (1994) compararon las presiones plantares entre personas mayores (71-90 años) y jóvenes (18-24 años) caminando descalzos. Los resultados muestran patrones similares para la zona del talón, pero también una mayor carga de presiones plantares en la región del mediopié para los jóvenes y en la región delantera medial para los mayores.
- Patologías: Saltzman *et al.* (1992) en un estudio para determinar la eficacia de un tratamiento para pie de Charcot, registraron en la condición descalza máximos de fuerza en todas las regiones mayores en el pie afectado que en el sano. Martínez Martín *et al.* (1997) estudiaron la distribución de presiones en el antepié normal y patológico y evaluaron el reparto de cargas con dos tipos de plantillas en 358 individuos sanos y 100 pacientes con metatarsalgia. Estos autores encontraron un aumento significativo de la carga sobre el 3^{er} metatarsiano en los pies patológicos

5.3.3.2. Influencia del calzado en la distribución de presiones

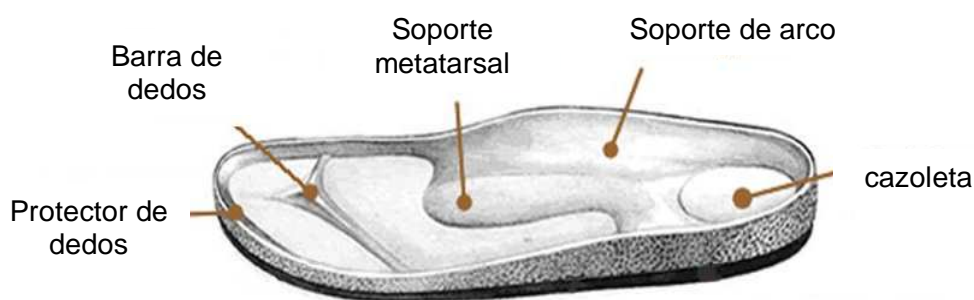
Un factor que afecta a la distribución de presiones plantares es el calzado (incluyendo las ortésis externas) (Figura 13). Una de las demostraciones más directas del efecto del calzado sobre las presiones plantares fue realizada por Perry *et al.* (1995). En este estudio, compararon los máximos de las presiones plantares en varias regiones del pie durante la marcha en tres condiciones (calzado con suela de cuero, calzado deportivo y únicamente con calcetines). Los resultados revelaron valores inferiores de los máximos de presión en la condición de calzado deportivo para la mayoría de regiones en estudio.

Bieber *et al.* (1988) demostraron que el centro de presiones se desplazaba lateralmente con el uso de una ortesis plantar (en posición medial) en sujetos pronadores de retropié. Esto ocurría alrededor del 25% de la fase de contacto de talón, a partir del cual se registraba un decremento en la fuerza de reacción vertical.

La influencia de la utilización de plantillas en la distribución de presiones plantares fue analizada por Bransby-Zachary *et al.* (1990). Los autores estudiaron la presión registrada bajo las cabezas del 1^{er} y 3^{er} metatarsianos observando que con el uso de plantillas absorbentes se reducía la presión en un 17% en el impacto del antepié con el

suelo durante la marcha humana. Johnson (1988) estudió la capacidad amortiguadora de plantillas de diferentes materiales en calzado de entrenamiento y en tres configuraciones de calzado de calle de cuero y tacón de goma: ajustado, holgado y anudado. La utilización de las plantillas redujo significativamente el coeficiente de impacto en todos los casos, llegando a disminuirlo hasta en un 30%. Por su parte Pfeffer et al. (1999) revisaron un total de 236 pacientes con fascitis plantar (160 mujeres y 76 hombres) sometidos a cinco tratamientos diferentes. Un grupo fue tratado sólo con estiramientos y a los otros cuatro grupos, además, se les instauró tratamiento ortopédico mediante (1) talonera de silicona, (2) talonera de fieltro, (3) talonera de caucho o (4) plantilla ortopédica a medida. Sus resultados fueron que los pacientes que usaban inserciones prefabricadas (1, 2 y 3) obtenían porcentajes de mejora más altos que los que sólo realizaban estiramientos y que los que estiraban y usaban plantillas ortopédicas a medida.

Finalmente, el efecto de los soportes de arco longitudinal y de los apoyos retrocapitales sobre las presiones plantares en pies patológicos ya fue analizada por Boulton et al. (1983), Boulton et al. (1984) y por Brown et al. (1996) aunque ellos no llegaron a establecer el efecto de las variables de diseño (Holmes et al. 1990).



Figura

Figura 13. Elementos anatómicos típicos de las plantillas para la redistribución de las presiones. Extraído de la "Guía de recomendaciones para el diseño del calzado del IBV" (1995).

Estos resultados demuestran que el calzado modifica la distribución de presiones plantares, lo que constituye la base científica de muchos desarrollos prácticos en el campo del calzado terapéutico para varios tipos de población (desde corredores de larga distancia hasta pacientes diabéticos). Aunque todavía hoy en día, desde un punto de vista de investigación básica, se desconoce si la imposición de un nuevo patrón de marcha o simplemente el uso de un almohadillado son la clave para identificar qué tipo de calzado terapéutico es efectivo en reducir las cargas y alterar la distribución de presiones.

Por tanto, los estudios citados demuestran que el calzado tiene una influencia muy marcada en los patrones de distribución de presiones plantares, tanto para sujetos sanos y el confort percibido por éstos, como en sujetos patológicos y la patología que sufren.

5.3.4. AJUSTE

El ajuste entre el zapato y el pie es uno de los tipos de interacción entre usuario y calzado más importantes para el confort (Miller et al. 2000; Witana et al. 2004; Au and Goonetilleke, 2007). Básicamente se puede definir como la interacción mecánica entre el dorso del pie y el calzado a lo largo del ciclo de marcha, con todas las implicaciones que esto tiene.

El ajuste viene definido por las diferencias de forma entre el pie y el calzado (Goonetilleke et al. 2000). Dichas diferencias no son estáticas, sino que varían a lo largo del ciclo de marcha dependiendo de múltiples factores. Se ha de considerar que el pie humano es un órgano que por su naturaleza intrínseca presenta variaciones que han de considerarse en el ajuste. De forma global se pueden considerar distintos tipos de ajuste:

El ajuste en descarga: En el que el pie se encuentra en reposo, sin soportar carga.

El ajuste en carga: En el que el sujeto se encuentra en bipedestación estática. La forma del pie cambia automáticamente respecto a la forma en descarga al ajustarse para soportar el peso del sujeto. Dicha variación es tanto en anchura como en longitud, pudiendo llegar a ser bastante cuantiosa (puede llegar a ser de hasta 15mm en longitud o incluso más). Existe una gran variabilidad en cuanto a este efecto, por lo que los pies suelen medirse en esta postura (bipedestación estática) para reducir la variabilidad (Peet, 1988).

El ajuste en marcha: En el que el sujeto se encuentra en movimiento (caminando, corriendo, saltando, etc.), por lo que el ajuste presenta propiedades dinámicas que varían a lo largo del ciclo de movimiento derivadas de los cambios de forma del pie y de cómo el calzado se ajusta a dichos cambios.

El ajuste fisiológico/térmico: En este caso, el ajuste presenta también condiciones dinámicas, y se refiere al ajuste que se da entre el calzado y el pie debido a los cambios de forma del pie por razones fisiológicas. El volumen del pie puede aumentar un 5% a lo largo del día debido a la fatiga. Además, se sabe que en climas calientes y húmedos, tras una larga caminata, el pie puede llegar a dilatarse hasta un 7/8% mientras que se contrae a bajas temperaturas. Un cambio de volumen como los referidos (al menos un 5%) implican un aumento de talla del calzado, por tanto, las condiciones fisiológicas (fatiga) o térmicas (humedad y temperatura) modifican el ajuste (Rossi y Tennant, 1984), y por tanto el confort percibido.

Teniendo en cuenta todas las consideraciones, parece claro que es esencial conocer la estructura morfológica del pie y su biomecánica para asegurar un correcto ajuste (Habe y Haber, 1997). Además existen otros factores, como la actividad que se desarrolla, la edad, etc. que deben considerarse cuando se diseña un calzado para asegurar un correcto ajuste.

5.3.4.1. Factores que influyen en el ajuste

El ajuste entre un pie y un determinado diseño de calzado vendrá determinado principalmente por dos factores físicos: la antropometría y los cambios de la forma del pie derivados de su movimiento durante el desarrollo de una actividad.

Por otro lado, se ha de considerar el aspecto psicológico del ajuste, consistente en que cada usuario tiene una preferencia por un ajuste más o menos holgado o apretado.

A continuación se describen la influencia de los factores fisiológicos de antropometría y la forma dinámica del pie.

ANTROPOMETRÍA

Las estructuras músculoesqueléticas definen una forma del pie que se caracteriza por presentar una gran variabilidad entre sujetos. La antropometría es la ciencia que describe las dimensiones del cuerpo humano y puede dividirse en dos áreas:

- Estructural: Cubre las dimensiones del cuerpo en reposo.
- Funcional: Cubre las dimensiones del cuerpo en movimiento.

La antropometría del pie es de gran relevancia a la hora de definir el ajuste. Hasta el momento, la definición del ajuste ha venido determinada por la relación entre la antropometría del pie en reposo, generalmente en descarga, y una serie de criterios de ajuste que definen las zonas de apriete y las zonas de juego entre el pie y el calzado, dependiendo principalmente de la estructura fisiológica y su movimiento.

Las técnicas para registrar la morfología del pie se basan en la definición de una serie puntos anatómicos relevantes, puntos fácilmente reconocibles por expertos, principalmente protuberancias óseas.

La siguiente lista (Figura 14;Figura 15) recoge los más importantes:

1. Punto medial más protuberante de la 1ª cabeza metatarsal
2. Punto lateral más protuberante de la 5ª cabeza metatarsal
3. Punto distal más protuberante del 2º dedo
4. Punto distal más protuberante del talón.
5. Punto más bajo del maleolo medial
6. Punto más bajo del maleolo lateral
7. Punto lateral más protuberante del 5º dedo
8. Apófisis del estiloide del 5º metatarso.
9. Punto más bajo del escafoides
10. Punto de inserción del tendón de Aquiles en el calcáneo
11. Punto más protuberante del maleolo medial.
12. Punto más protuberante del maleolo lateral.
13. Punto medial más protuberante del talón.
14. Punto lateral más protuberante del talón.
15. Punto de inserción entre el pie y la pierna, donde el extensor del 1er dedo se dobla.

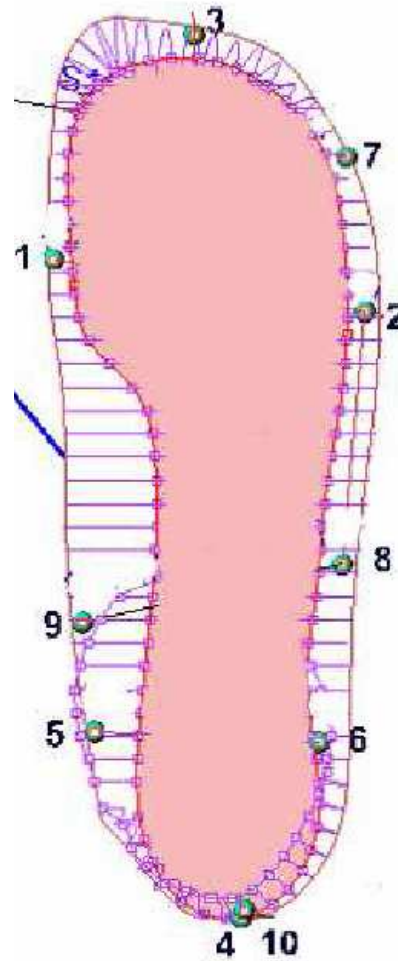


Figura 14. Puntos anatómicos relevantes del pie visto desde arriba.

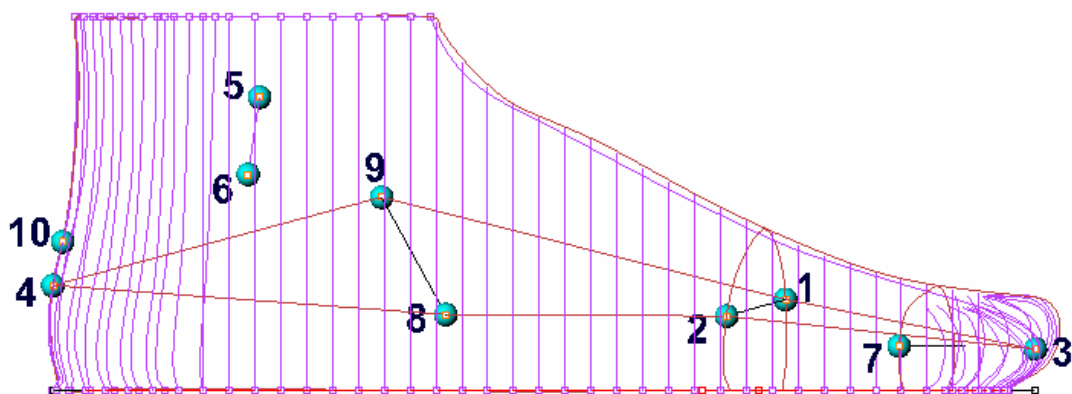


Figura 15. Puntos anatómicos relevantes del lateral del pie

La antropometría de los pies presenta una gran variabilidad entre sujetos. Entre los factores de mayor influencia se encuentran los siguientes:

Género: Está ampliamente demostrado en varios estudios que la forma del pie varía entre hombres y mujeres. Por ejemplo, Wunderlich and Cavanagh (2000) analizaron estas diferencias en un amplia muestra de jóvenes (293 hombres y 491 mujeres) y obtuvieron que los pies variaban no sólo de tamaño sino también de forma, particularmente el arco, el lateral del pie, el primero dedo y la cabeza del primer metatarso.

Edad: Así mismo la edad también influye notablemente en la forma del pie. Pavla Statsná et al (2001) midieron más de 27000 ciudadanos checoslovacos de entre 1 y 65 años, y encontraron diferencias específicas para distintos rangos de edad.

Etnia: La zona geográfica de origen tiene también un papel relevante en la antropometría del pie. R. Hawes et al. (1994a) midieron a 708 norteamericanos caucásicos, y a 513 japoneses y coreanos, todos hombres, y concluyeron que existía diferencias cuantificables entre ambas poblaciones. Por ejemplo, entre otras diferencias, encontraron que el margen anterior del pie oriental produce un ángulo menos acusado con el eje longitudinal del pie que en el caso de los pies occidentales.

Por tanto, todas estas diferencias sugieren que tanto el género, la edad y la etnia deberían ser consideradas como relevantes en la definición del ajuste del calzado.

LA ESTRUCTURA DINÁMICA DEL PIE

La estructura fisiológica del pie es dinámica, y por tanto tiene una clara influencia en el ajuste. A continuación se revisan las partes más importantes de dicha estructura y cómo éstas varían a lo largo del ciclo de marcha.

El pie humano es una compleja estructura tridimensional, conteniendo más de 28 huesos y 57 ligamentos, que se mantiene unida mediante una intrincada red de tendones. Además, estos elementos presentan tal flexibilidad que le confieren a la estructura una movilidad extraordinaria manejada a través de la musculatura. Las funciones básicas del pie asociadas a su estructura son tres:

La habilidad del pie de actuar como **estructura sustentante**

Su dinámica al actuar como **elemento propulsor** del cuerpo

Su rol como órgano sensorial

Estructura del pie: Kapandji (1982) sugiere que el pie como estructura de soporte constituye una bóveda sostenida por tres arcos apoyados en el suelo en tres puntos (Figura 16):

- A. la articulación del primer dedo con el metatarso
- B. la articulación del quinto dedo con el metatarso
- C. la tuberosidad posterior del calcáneo.

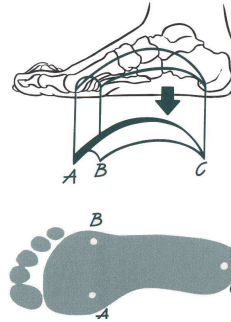


Figura 16. Arcos de soporte del pie. Extraído de la “Guía de recomendaciones para el diseño del calzado del IBV” (1995).

La característica esencial del **arco externo** es su rigidez. Durante la bipedestación la deformación de este arco es mínima mientras que durante la locomoción, la rigidez de este arco es esencial para transmitir el impulso motor de la musculatura posterior de la pierna hacia el antepié.

El arco plantar más importante es el **arco longitudinal interno** del pie. Su característica esencial, al contrario que lo que sucede con el arco externo, es su extraordinaria movilidad. El arco interno del pie constituye un elemento esencial para el mantenimiento del equilibrio durante la bipedestación, contribuyendo mediante su deformación a absorber las rotaciones hacia fuera y hacia adentro de la pierna de apoyo.

El **arco anterior** del pie sólo se aprecia durante el pie en descarga. Cuando se apoya el pie en el suelo y se soporta la carga corporal, el arco anterior se aplasta y se extiende a cada lado del segundo metatarsiano.

Las variaciones de forma que permiten estas estructuras dinámicas (los arcos), unido a la gran variabilidad entre personas, hacen que el pie se expanda o contraiga dependiendo de la fisiología de cada individuo. Por ejemplo, se ha cuantificado que la extensión media del pie adulto entre la posición de descarga y carga varía entre 42 y 84 mm (de media para una talla) dependiendo de la persona.

El ajuste es por tanto un aspecto dinámico que, aunque tradicionalmente se ha medido como fenómeno estático, varía con el movimiento del pie. En términos generales hay tres puntos que deben considerarse respecto al ajuste dinámico del pie:

Antropometría dinámica del pie: A grandes rasgos los momentos o fases de la marcha en los que se producen las mayores variaciones en la forma del pie son:

- Fase de apoyo monopodal. En esta fase existe un momento en el que los tres principales puntos de soporte de la bóveda plantar se hallan en contacto con el suelo. Como consecuencia de la acción del peso corporal y de las fuerzas originadas en el desplazamiento, los arcos que integran la bóveda plantar sufren las mayores deformaciones y el pie alcanza su mayor longitud y anchura.
- Fase de impulsión. En esta fase se llega a una posición de máxima carga sobre el arco anterior que da lugar al ensanchamiento máximo del antepié.

- **Movimiento de arco plantar.** El apoyo del arco longitudinal interno del pie tiene un efecto minimizador de la fatiga muscular. Por eso puede ser de utilidad en aquellos calzados destinados a usuarios que soporten largas permanencias de pie al contribuir al sostenimiento del arco longitudinal y repartir el apoyo plantar en una mayor superficie. Sin embargo, un apoyo del arco longitudinal que limite el descenso fisiológico de la bóveda plantar durante la marcha puede tener consecuencias adversas para la estabilidad y eficiencia del paso.

Articulación metatarsofalángica: Es también de gran importancia un ajuste adecuado que permita la flexión natural de los dedos (articulación metatarsofalángica), sin entorpecerla y así permitir una fase de impulso adecuada.

Movimiento de los dedos: Los dedos tienen un rol activo durante la marcha. Cuando se camina descalzo, los dedos se dorsiflexan para apoyar en el suelo, contribuyendo tanto a la propulsión como al equilibrio. Durante el apoyo monopodal del pie al caminar o correr los dedos se extienden y el pie se alarga ligeramente a medida que soporta el peso del cuerpo. Del mismo modo, cuando se impulsa el cuerpo hacia delante sobre la punta de los pies los dedos se expanden hacia ambos lados.

5.3.4.2. Influencia del calzado en el ajuste

Existen una serie de **requerimientos funcionales de ajuste** que hacen que, contra lo que pueda parecer, el calzado no deba adecuarse a la forma exacta del pie (Witana et al. 2004; Au y Goonetilleke, 2007). Por el contrario, las hormas de calzado son considerablemente más estrechas (en algunas zonas) que el pie (Cheng and Perng 1999), sin que esto cause dolor o molestias debido a la capacidad de la estructura fisiológica del pie y los tejidos blandos y adiposos del mismo de cambiar de forma (Witana et al. 2004) (Figura 17).

Además, en el momento de calzarse no sólo el pie adecua su forma a la del calzado, sino que gracias a la elasticidad de los materiales del corte y la construcción del calzado, éste también varía de forma y volumen para recibir el pie. Como resultado se da una interacción caracterizada por zonas donde no existe apenas presión sobre el pie, y otras zonas específicas del pie (e.g, laterales de la articulación metatarsofalángica) donde aparece una constricción (Olaso et al.2007). Dicha constricción, si el calzado está bien diseñado para un pie específico es beneficiosa, pues provee de un ajuste más firme que mejora la percepción de confort del usuario.

Como se puede comprobar, el dilema básico al que se enfrenta un diseñador de calzado cuando considera el ajuste entre pie y calzado es que el pie es una estructura dinámica y funcional encerrada en un calzado que es básicamente un objeto inerte, cuya forma inicial depende de la horma y los materiales, y durante su uso también de la forma del pie .

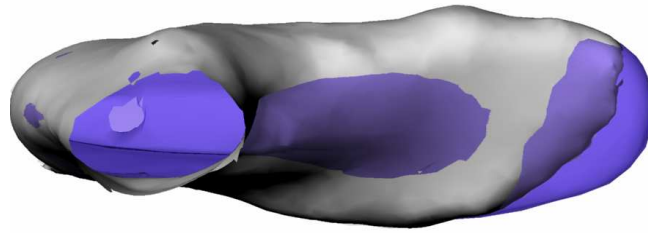


Figura 17. Diferencias entre las formas de una horma típica (en azul) y el pie en descarga (en gris)

A continuación se describen algunos de los aspectos más importantes del calzado con marcada influencia en el ajuste.

ALTURA DE TACÓN

El ajuste del talón tiene una influencia en el ajuste del resto del zapato (Au y Goonetilleke, 2007). La razón es que el pie tiene una posición diferente en zapato de tacón alto frente un zapato de tacón bajo, y también funciona de forma diferente dentro del zapato.

Durante la marcha, el talón se despega del suelo alrededor de 50 mm en cada paso (esta medida depende del patrón de marcha del sujeto), con el perímetro de las articulaciones actuando como soporte en el momento del despegue. La altura de la elevación del talón es proporcional a la longitud del paso, es decir, en pasos más largos la elevación del talón aumenta.

Sin embargo, si se calza un zapato con dos pulgadas de tacón, no hay ninguna razón para que se produzca un despegue del talón durante la marcha porque el zapato ya incluye esa elevación. Por otra parte, aumentando la altura de tacón, se disminuye la zancada, pues el peso del cuerpo no se desplaza del talón a las articulaciones y en su lugar se concentra en el antepié (Figura 18).

Esto marca una diferencia en cómo ajusta el zapato en función de la altura de tacón. En el zapato de tacón se debe permitir la flexión natural del antepié que se produce con cada fase de oscilación del pie durante la marcha. Sin embargo, en zapatos de tacón alto, ni el zapato ni el pie flexionan de forma notable en los metatarsianos, y por ello no hay marcas de flexión.

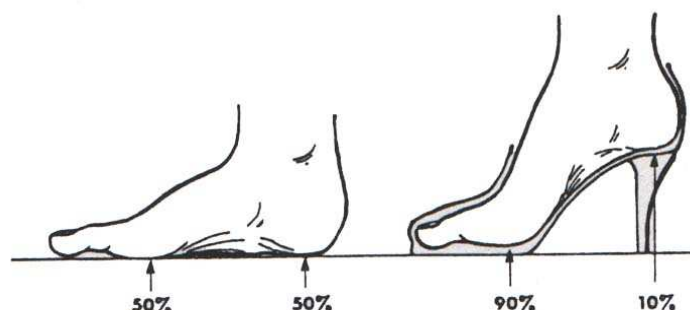


Figura 18. Distribución de carga descalzo y con altura de tacón. Extraído de la "Guía de recomendaciones para el diseño del calzado del IBV" (1995).

Debido a estas diferencias en las posturas del pie en el zapato, el zapato de tacón bajo requiere más espacio para los dedos en el ajuste. Esto se debe a que se produce un movimiento más libre en la transición del talón a los dedos y por este motivo mayor extensión del pie hacia delante en cada paso. En el caso del zapato de tacón alto, el movimiento de los dedos está relativamente restringido. Por este motivo se necesita menor espacio para los dedos para su movimiento de extensión hacia delante.

SISTEMA DE FABRICACIÓN

El sistema de fabricación del calzado influye en el diseño de la horma y según el sistema de fabricación de calzado utilizado, la horma deberá llevar algunas correcciones de forma que el volumen interior del zapato proporcione un ajuste correcto. Un ejemplo de esto es la incorporación de plantillas extraíbles que se introducen en el zapato después de quitar la horma, lo que hace necesario aumentar la altura de ésta.

El sistema de fabricación de calzado influye mucho en la rigidez final del mismo. Esta propiedad afectará al ajuste del calzado. En zapatos con poca flexibilidad en la zona de las articulaciones metatarsófalángicas el movimiento del pie dentro del zapato será distinto al de un zapato que sea muy flexible, y en consecuencia lo será el espacio interior necesario para que el movimiento del pie se realice sin que se generen presiones que produzcan discomfort.

ESTILO DEL ZAPATO

El estilo del corte del zapato también tiene su influencia en el ajuste. Por ejemplo, zapatos de salón que no tienen cierre en el empeine tienen un ajuste más estrecho en el ancho y en la curva trasera del talón, puesto que la sujeción del zapato en el pie se realiza en esta zona. Existen diversos componentes del corte que definen el estilo del calzado con influencia en el ajuste que éste proporciona:

- Diseño de la pala. El diseño del corte o patronaje tiene mucha influencia en el ajuste final del calzado. Un ejemplo es el acordonado de 6 ojales y el acordonado de 3 ojales, montados en la misma horma (Figura 19). La diferencia en los patrones, a pesar de estar hechos en la misma horma, afectará a la forma en que el pie se expande en el zapato e incluso la libertad del empeine.

La pala más corta permite mayor perímetro de entrada que la pala más larga. Sin embargo, no hay una posición precisa o medida que indique dónde debe estar el límite del corte o abertura (escote).

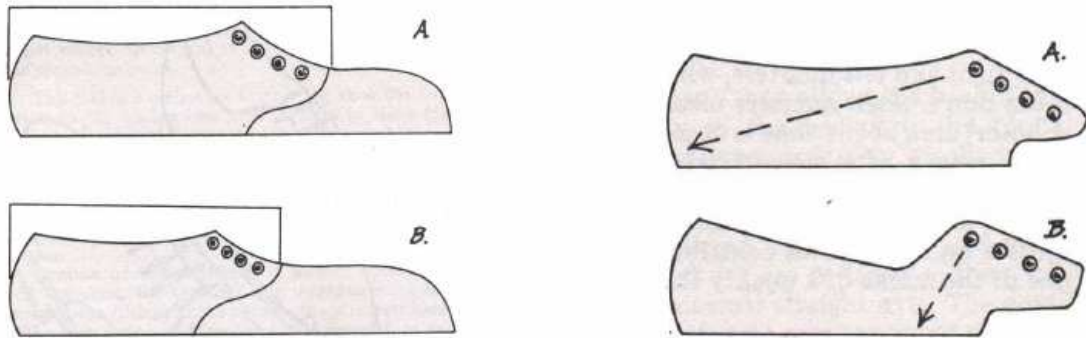


Figura 19. Efecto del cierre en el ajuste del empeine. Extraído de la “Guía de recomendaciones para el diseño del calzado del IBV” (1995).

- **Efecto de la caña:** Ésta es una parte muy importante del patronaje del zapato desde el punto de vista del ajuste, ya que las diferentes tipologías de caña tienen mucha influencia sobre la sujeción del pie. Las líneas superiores están sujetas a muchas variaciones dependiendo principalmente del estilo o tipo de zapato y patrones. Por ejemplo, en algunos zapatos acordonados la sujeción firme al pie se extiende desde los ojales hasta la zona trasera del talón. Sin embargo, en otros la distribución de los ojales revela que el empuje es desde los ojales hacia la zona media del pie (Figura 19).

- **Zapatos abiertos en la trasera:** En el caso de zapatos destalonados a menudo hay una tendencia del talón del pie a sobresalir del asiento del talón, usualmente hacia la zona exterior. Algunas veces esto es causado por la propia antropometría del pie. Los zapatos abiertos en el talón no tienen el beneficio del contrafuerte que mantiene el talón seguro dentro del zapato y ayuda a dirigir el zapato hacia delante.

Debido a que el zapato abierto en la trasera permite al talón despegarse libremente de la zona trasera, el ajuste del pie dentro del zapato depende, en gran medida, de la zona dorsal del antepié y del empeine. Si el zapato es de horma suficientemente recta, el eje del pie estará seguro dentro del zapato. Pero si es una horma curvada entonces el pie puede desplazarse de su eje normal produciéndose el desbordamiento del talón sobre el borde exterior del asiento del talón.

- **El perímetro de entrada:** El escote del zapato es el punto de entrada del pie en el área del antepié. Es una sección muy importante para el ajuste del zapato, especialmente en aquellos estilos como zapatos de salón, mocasines y zapatos acordonados.

Cuando las mujeres llevan zapatos de salón, independientemente de la altura de tacón, es bastante común que la línea del escote (la zona del límite del corte) esté enrojecida por la existencia de una presión excesiva. Esto es un signo obvio de que el zapato ha sido originariamente ajustado con un espacio de entrada insuficiente traduciéndose en un esfuerzo para sujetar el zapato al pie.

Como el pie normalmente se expande después de largo tiempo permaneciendo en bipedestación o andando a lo largo del día, la línea de presión del límite de la entrada del zapato aumenta. Si son suficientemente severos o prolongados, puede cortar la circulación sanguínea hacia los dedos y causar sensación de disconfort y entumecimiento u hormigueo, además de hinchazón alrededor del enfranque y empeine o llagas en la línea de presión del escote. Esta es otra razón por la que las mujeres encuentran alivio cuando se quitan los zapatos después de mucho tiempo en bipedestación o andando, moviendo los dedos para permitir el retorno de circulación.

- Elasticidad del material del corte: Los materiales del corte del calzado tienen una influencia muy marcada en el ajuste. Los requerimientos esenciales de un material de corte desde el punto de vista del confort asociado al ajuste son:
- Conformabilidad: Es la habilidad del material de adaptarse y conformarse a la cambiante forma y proporciones del pie.
- Estabilidad dimensional: Es la habilidad del material del corte de retener su forma original. Esta capacidad es importante tanto para el ajuste como para la estética.

Como se puede observar de la revisión efectuada, la gran mayoría de información existente valorando el ajuste del calzado está principalmente basada en la experiencia, salvo algunos estudios que aportan información muy valiosa (Witana et al. 2004; Au y Goonetilleke, 2007) aunque también bastante específica. La causa es quizá que la gran variabilidad existente en los diseños de horma y calzado, cruzada con la gran variabilidad antropométrica y de preferencia de los usuarios, complican la obtención de conclusiones concretas basadas en resultados estadísticos significativos. De todas formas, también es cierto que existen algunas tendencias claras como las comentadas, que describen distintos aspectos del ajuste entre calzado y pie, y el modo en que éste influye en el confort percibido por el usuario.

5.3.5. CONFORT TÉRMICO

El confort térmico es un parámetro que depende, de forma compleja, de muchos factores como el ambiente, las características del sujeto y la ropa o el calzado que se lleve. En la actualidad, existen pocos conocimientos sobre cómo el calzado afecta a la sensación de confort térmico en los pies o cómo se percibe ésta de forma general, a pesar de que recientemente se han desarrollado estudios abordando la problemática para tipos de calzado muy concretos (González et al. 2007).

Se sabe que está determinado por influencias termofisiológicas, por lo tanto es decisivo que los atributos de conductividad térmica y permeabilidad a la humedad del calzado se ajusten a las necesidades fisiológicas. Es decir, el calzado debe presentar un rango determinado de temperatura y humedad en el microclima creado entre el pie y el forro, que dependerá del uso para el que esté destinado.

Por lo que para el estudio del confort térmico es necesario tener en cuenta conocimientos de anatomía y fisiología, y en especial de:

- Termorregulación del cuerpo humano y receptores sensoriales térmicos.
- Influencia del calzado en la respuesta termorregulatoria.

El cuerpo humano es un generador de calor, entre el 75 y 100 % de la energía generada en cualquier actividad se transforma en calor al que hay que sumar el calor producido por el metabolismo basal.

El metabolismo es la suma de reacciones químicas que se producen en todas las células del organismo. El metabolismo mínimo está determinado por la actividad fisiológica básica para mantenerse vivo y es denominada metabolismo basal. Éste varía con la edad, sexo y peso. Un ejemplo de calor producido en diferentes actividades es el siguiente (Tabla 8):

ACTIVIDAD	MAGNITUD
Metabolismo basal (mantenimiento del organismo)	65-80 W
Descansando (hombre normal)	115 W
Caminando 3.5 - 5.5 km/h	235-360 W
Corriendo a más de 7 km/h	520 W

Tabla 8. Calor producido en diferentes actividades

El estado que viene asociado al confort térmico es el de equilibrio, cuando la ganancia de calor es igual a la pérdida. Cuando no existe este equilibrio el cuerpo humano es capaz de poner en juego mecanismos fisiológicos de termorregulación para controlar el calor que cede al ambiente, con la finalidad de alcanzar de nuevo el equilibrio y mantener la temperatura del cuerpo dentro de los valores necesarios. Existen múltiples formas por las que el cuerpo gana y pierde calor, éstas son (Tabla 9):

GANANCIA DE CALOR	PÉRDIDA DE CALOR
Metabolismo, basal y actividad	Evaporación de sudor
Radiación de calor (del entorno)	Radiación (emitida por el cuerpo)
Convección, aire o agua en contacto	Convección, entrega de calor al aire
Respiración, respirar aire a alta temp.	Respiración
Conducción, contacto con cuerpos sólidos	Conducción

Tabla 9. Formas por las que el cuerpo gana y pierde calor

El cuerpo humano es capaz de controlar mediante procesos fisiológicos el calor que cede al ambiente, con el fin de mantener la temperatura del cuerpo dentro de los valores necesarios. La temperatura del cuerpo se puede medir como la temperatura interna, con una media de 37.6 °C, oscilando dentro del intervalo 36-38 °C. Además son importantes las temperaturas esofágica, axial, bucal, rectal y cutánea, donde la temperatura cutánea puede variar en un intervalo más amplio que el resto, variando según las condiciones ambientales y la actividad metabólica.

Aparte de los procesos químicos y el aumento de la producción de calor por metabolismo, la termorregulación se realiza principalmente (Kurz, 1994) a través de tres mecanismos:

- Controlando la temperatura de la piel por variación del flujo sanguíneo.
- Transporte de calor por respiración.
- Descarga de calor por evaporación y producción de sudor.

En cualquier caso, la respuesta del sistema termorregulatorio depende de las condiciones ambientales. Estos mecanismos funcionarán de forma diferente según las condiciones sean de calor o de frío (Mondelo, 1995).

La eficiencia de la pérdida de calor por evaporación se determina por el ratio de sudoración, permeabilidad al vapor y gradiente de humedad. La producción de sudor depende de:

- Ratio de glándulas sudoríparas activas en diferentes partes del cuerpo
- Temperatura de la piel
- Edad y sexo
- Factores físicos.

Bajo **condiciones calurosas**, el cuerpo tiene un excedente de calor que habrá que eliminar para evitar que la temperatura corporal aumente hasta valores peligrosos. Los mecanismos de pérdida de calor que se ponen en juego son:

- Aumenta el flujo sanguíneo hacia los vasos capilares de la piel, transmitiendo el exceso de calor (ensanchamiento de los vasos capilares y aumento de la frecuencia cardíaca). La temperatura de la piel aumenta y con ella el intercambio de calor al ambiente por convección y radiación.
- Si esto no es suficiente para evitar el aumento de la temperatura corporal, el centro controlador ordena a las glándulas sudoríparas que inicien la segregación de sudor. Se sabe que la respuesta de estas glándulas, inicio de la sudoración e intensidad de ésta, depende de la temperatura superficial (temperatura de la piel), y de la temperatura interna (temperatura rectal, esofágica, timpánica, etc.), aunque existe controversia en cómo interaccionan

estas temperaturas. La sudoración no garantiza la pérdida de calor de la piel, es la evaporación del sudor la que produce la pérdida de calor. La evaporación del sudor producido depende de (Mondelo, 1995): Humedad del aire circundante, Cantidad y calidad de la ropa y Velocidad relativa del aire. La sudoración generalmente es mayor en la frente y menor en los brazos, manos o pecho. Sin embargo, esta distribución depende del umbral de inicio y de las características de ganancia de cada una de las zonas, y muestra unas diferencias entre individuos considerables

En **condiciones de frío** se produce el efecto contrario. El cuerpo pierde calor con demasiada velocidad y es necesario que se reduzcan las pérdidas para evitar que la temperatura corporal descienda hasta de peligro. Los mecanismos de retención de calor son:

- Se reduce la producción de sudor al mínimo.
- El centro termorregulador ordena una disminución del flujo sanguíneo hacia la piel, lo que provoca el enfriamiento de la piel y reduce las pérdidas de calor.
- Si el cuerpo continúa perdiendo calor se inician temblores (tiriteo), que no es más que ejercicio físico involuntario.

Existen **indicadores fisiológicos** que proporcionan información sobre la condición térmica del cuerpo humano. Éstos aumentan cuando aumenta la sobrecarga calórica. Generalmente los más utilizados son:

- Frecuencia cardiaca
- Temperatura corporal
- Temperatura media de la piel
- La sudoración (pérdida de peso por sudoración)

Teniendo en cuenta que la termorregulación es un mecanismo muy complejo, es conveniente utilizar varios de estos indicadores para llegar a conclusiones certeras. La frecuencia cardiaca puede considerarse como un indicador sencillo de la carga que impone al sistema circulatorio la acumulación de calor, incluso con cargas moderadas y pequeñas, pero ésta varía también con la actividad física, las posturas, el estado emocional, etc. El uso de la temperatura corporal está limitado a tensiones calóricas severas, ya que las tensiones moderadas no provocan normalmente incrementos, y al contrario que la frecuencia cardiaca, la medición de la temperatura interna no es ni sencilla ni cómoda. Esta temperatura interna debe medirse en el esófago o recto para que sea suficientemente precisa. En la práctica se recurre a medidas en el tímpano, o de la temperatura sublingüal (Mondelo, 1995).

Las **manos y los pies** tienen un importante papel en el sistema termorregulatorio. En situaciones de calor, las extremidades actúan como descargadores de calor (son denominados los radiadores del cuerpo). Por otra parte se ven más afectados por la exposición a climas fríos comparadas con otras partes del cuerpo. Esto es debido a que la relación volumen / área de las extremidades es bajo, además no son capaces de producir suficiente calor por sí mismas, debido a su baja masa muscular, haciendo

necesario que otras partes del cuerpo aporten calor. Sin embargo, la transmisión de calor a las extremidades es limitado en condiciones de clima frío por la reducción del flujo sanguíneo. Además, las manos y pies tienen mayor exposición al frío porque se suelen hallar en contacto con superficies frías (Bergquist, 1994).

Un importante factor para el estudio del confort térmico es conocer la situación de los sensores corporales de la temperatura y de las glándulas que producen el sudor. Este conocimiento permite medir las variables fisiológicas donde el pie es más sensible a la temperatura y donde la producción de sudor es mayor. Los receptores térmicos y las glándulas sudoríparas se sitúan en el pie con diferente densidad dependiendo de la zona (Kurz, 1994):

- Alta densidad de termorreceptores: empeine y antepié.
- Alta densidad de glándulas sudoríparas: empeine, región de los metatarsianos y arco.

5.3.5.1. Factores que influyen en el confort térmico

La termorregulación se ve afectada por numerosos factores como el género, la constitución corporal, edad, adaptación al ambiente, etc.

- Género: Las mujeres presentan mayores dificultades para soportar sobrecarga calórica que los hombres, sobre todo durante el embarazo. La temperatura de la piel, la capacidad evaporativa y el metabolismo son ligeramente inferiores al de los hombres.
- Constitución corporal: Las personas corpulentas se adaptan mejor al frío que al calor. Esto se debe a que la producción de calor es proporcional al volumen (W/m^3), mientras que la disipación del calor es proporcional a la superficie (W/m^2). Por lo que a medida que aumenta el tamaño corporal, disminuye la relación superficie/volumen y aumenta el calor generado frente al disipado.. Los porcentajes de las diferentes partes del cuerpo respecto a la superficie corporal total pueden considerarse como sigue (Tabla 10):

cabeza	7 %
brazos y manos	19 %
tronco	35 %
muslos, piernas y pies	39 %

Tabla 10. Porcentajes de área de las diferentes partes del cuerpo respecto a la superficie corporal

- Edad: Con el aumento de la edad, los mecanismos termorreguladores se hacen menos eficientes. En ambientes calurosos las personas mayores tienen más problemas para disipar el calor, se produce un retraso de la respuesta de sudoración y se reduce la capacidad de disipar calor.
- Adaptación al ambiente: La aclimatación al calor es la adaptación a condiciones climáticas calurosas y se adquiere en un tiempo entre 7 y 14 días. Cuando una

persona se expone inicialmente a un ambiente caluroso, se manifiesta rápidamente una tensión calórica superior a la de una persona adaptada (temperatura rectal y frecuencia cardiaca sufren un aumento rápido y pronunciado). Según el organismo se adapta al calor, se efectúan paulatinamente determinados ajustes, fundamentalmente en la primera semana. En los mecanismos psicológicos y fisiológicos de la termorregulación, el sistema cardiovascular comienza a adaptarse y mejora la capacidad de abastecer sangre a los capilares de la piel, y la eficacia sudorativa del sujeto mejora, con lo cual disminuye la frecuencia cardiaca y la temperatura rectal.

La aclimatación al frío, por las características prácticas de la protección frente a él, reviste otras especificaciones. En los casos menos extremos la aclimatación al frío puede producirse en una semana, pero en los casos límite la aclimatación puede durar meses y hasta años.

5.3.5.2. Influencia del calzado en el confort térmico

La sensación de confort subjetivo es el resultado de la compleja interacción de los sistemas sujeto-ropa-ambiente. (Kurz, 1994). Por lo que cabe esperar que el calzado utilizado afecte a la respuesta termorregulatoria y al confort que percibe el sujeto.

El confort térmico se define como las características climáticas del calzado. Estas características tienen una influencia decisiva en el confort global del sujeto (Kurz, 1992). Esto hace que influyan en la percepción térmica del pie y del cuerpo, ya que los pies juegan un papel muy relevante en el control de la temperatura corporal. (Kawabata, 1993). Por tanto, una reducción del confort térmico en los pies puede ser la causa de un descenso en el rendimiento físico y mental, un aumento de la irritabilidad y agresividad, así como en la distracción, llegando incluso a tener influencias no deseadas en la salud.

La situación climática en el calzado puede incluso desestabilizar el sistema mecánico (reducción de las características mecánicas de los tejidos del pie bajo alta humedad: ampollas o reducción de las funciones sensoriales y motoras a bajas temperaturas). Como consecuencia las características climáticas de los zapatos son factores decisivos para el confort (incluso al poco tiempo de llevar el calzado). Además pueden conllevar problemas higiénicos, creando el caldo de cultivo necesario para la proliferación de hongos y bacterias, y consecuentemente malos olores.

Bajo ciertas condiciones de humedad y temperatura puede llegar a producirse una degradación de los materiales del calzado, como su pérdida de propiedades mecánicas (aumento o descenso de rigidez de la suela o el corte) (Kinoshita, 1996). Todo esto reduce las propiedades generales del calzado causando discomfort.

Estas consideraciones han hecho que los problemas derivados de unas condiciones climáticas deficientes fueren un desarrollo en los últimos años de nuevos materiales capaces de lidiar con el confort térmico. Entre ellos se encuentran aislantes térmicos (p.e. Thinsulate) y membranas aislantes de la humedad pero que permiten la transpiración (p.e. Goretex, Sympatex, Climax, etc.). Estos materiales han mejorado mucho las propiedades climáticas de los calzados y por tanto el confort percibido por

los usuarios. Como consecuencia el mercado del calzado ha sido invadido por este tipo de materiales (Figura 20).

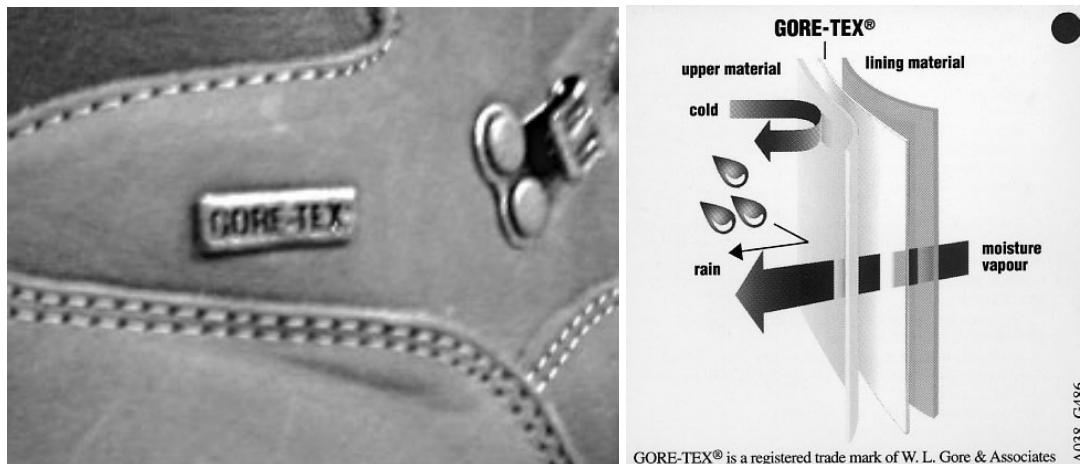


Figura 20. Ejemplo de producto de calzado en el mercado que incluye distintos elementos para mejorar el confort térmico (Gore-tex).

REQUISITOS PARA EL CONFORT

Los requisitos que debe cumplir un calzado determinado dependen exclusivamente de la aplicación de éste, aunque de forma general los requerimientos para asegurar el confort térmico son:

- Suficiente aislamiento térmico en ambientes fríos para reducir el enfriamiento.
- Suficiente conductividad térmica a altas temperaturas para reducir el disconfort y la producción de sudor.
- Optimización del transporte de humedad para reducir la humedad en el calzado. La acumulación de humedad en el calzado causa un microclima cálido y húmedo que va unido al disconfort (Rissanen, 1997), pudiendo resultar en condiciones favorables para la maceración de la piel y la proliferación de hongos
- Reducción de la humedad acumulada en los materiales. Si el calzado absorbe mucha humedad, se reduce el aislamiento térmico, favoreciéndose la transmisión de calor y se produce una reducción de la resistencia mecánica pudiendo producirse la rotura del calzado.

INTERCAMBIO DE CALOR A TRAVÉS DEL CALZADO

Para proporcionar estos requisitos se debe conocer cómo el calzado afecta al intercambio de calor entre el pie y el ambiente con respecto a la condición de descalzo y cuáles son los mecanismos de intercambio de calor cuando el pie está calzado.

El calzado reduce el intercambio de calor seco por convección, conducción y radiación y la transferencia de calor húmedo a través de la evaporación con respecto al pie descalzo (Hänel, 1997; McLellan, 1996). Así, en el pie calzado el intercambio de calor entre el sistema pie-calzado y el ambiente se realiza principalmente de las siguientes formas (Bergquist y Abeysekera, 1994):

- Conducción a través de la suela
- Convección y radiación de las superficies
- Ventilación a través de las aberturas, llamado efecto de bombeo (“pumping effect”).
- Evaporación a través del material.

De estos puntos (Figura 21), la principal forma de intercambio de calor y de transporte de humedad es por ventilación, al introducirse aire en el interior del calzado y desalojarlo a través de agujeros y aberturas (efecto de bombeo) se produce pérdida de calor por convección y desalojo del vapor de agua (Bergquist Abeysekera, 1994).

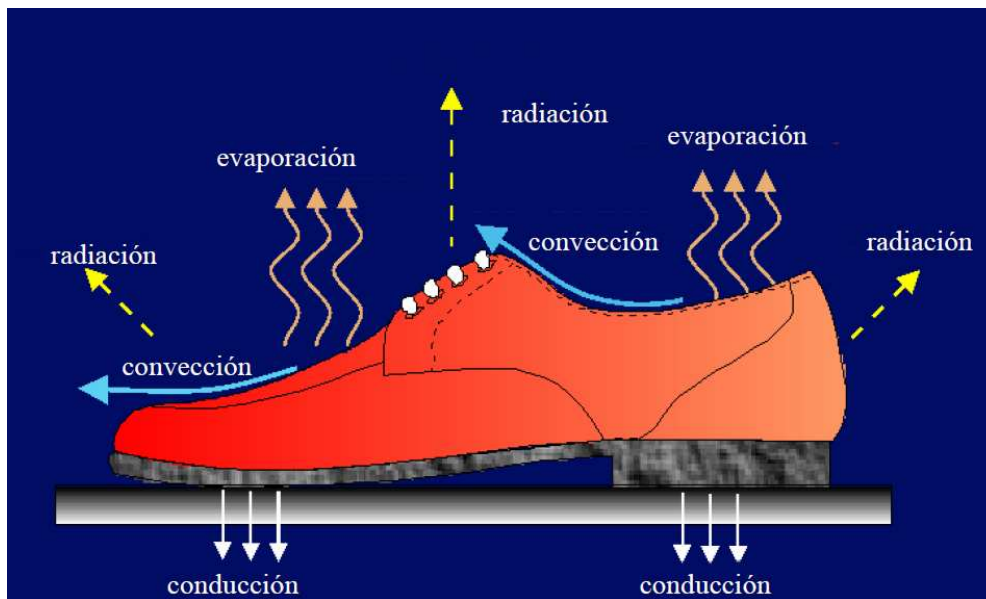


Figura 21. Flujos de intercambio de calor a través del calzado. Extraída de la bases de datos internas del IBV

TRANSPORTE DE HUMEDAD

El transporte de humedad provisto por un calzado depende de:

- El tipo de calzado
- El material del corte
- El material del forro
- La influencia de diferentes membranas de acondicionamiento.
- La construcción del calzado

Aunque la capacidad del material del calzado para absorber la humedad es importante, es preferible la pérdida de humedad bien por transmisión a través del forro (si es permeable) o por expulsión debido al efecto bomba cuando se camina. La acumulación de humedad retenida en el calzado puede resultar en condiciones favorables para la maceración de la piel y sensación de humedad, necesitándose por tanto un periodo de secado forzado del calzado entre usos.

La retención de sudor es mayor en la plantilla, refuerzo de los dedos y el forro en la región del contrafuerte (en los dedos, la suela y el talón, por ese orden). La parte más afectada por los materiales del corte es la región dorsal del pie. En todos los tipos de calzado, una plantilla renovable o una plantilla hecha de material absorbente (ej. glutaraldehyde tanned (curtir) ox hyde) puede ser una buena solución (posiblemente con la parte de abajo impermeable para evitar el acceso de la humedad a la estructura de la plantilla).

La retención de humedad es mayor cuanto menos impermeable sea el material de corte. La distribución por zonas de la retención de humedad cambia poco con diferentes materiales de corte. La retención de humedad es mayor en las zonas del forro que están recubiertas por materiales de baja permeabilidad (borde de la plantilla y el refuerzo con la suela). Se encuentran también altos niveles de humedad en la plantilla y región delantera del calzado, en la parte que une el corte con la suela. Esto puede producir la rotura mecánica, muy repetida, de esta zona.

5.3.6. FRICCIÓN

La fricción puede definirse como la resistencia al movimiento relativo entre dos superficies. La marcha humana necesita de una resistencia por fricción entre la planta del pie y el suelo que permita el impulso mecánico para desplazar el peso del cuerpo hacia delante y asegurar la propulsión.

El nivel adecuado de fricción es pues un requisito primario para la marcha:

- Si la **fuerza de rozamiento es pequeña** se producen deslizamientos que pueden terminar en caídas. Esta situación puede ser peligrosa sobre todo en personas mayores, en las que una caída puede suponer un daño grave, y en el ámbito laboral, en el que los resbalones pueden ser numerosos por la existencia de suelos contaminados con aceite y grasa.
- Si la **fuerza de rozamiento es excesiva** se dificulta el giro y el cambio de dirección y aumenta el riesgo de tropiezos. Esto puede causar lesiones de rodilla en el caso de giros bruscos o movimientos repetitivos, como en algunos deportes o trabajos.

Según la teoría clásica, desarrollada por Amontons y Coulomb en el siglo XVII, la fuerza de rozamiento que se opone al movimiento es proporcional a la fuerza perpendicular a la superficie de contacto (Bowden y Tabor 1982). De esta forma, se define el coeficiente de fricción como la división entre la fuerza de rozamiento y la fuerza normal a la superficie de contacto (Ley de Coulomb, $F_r = \mu F_n$) (Figura 22).

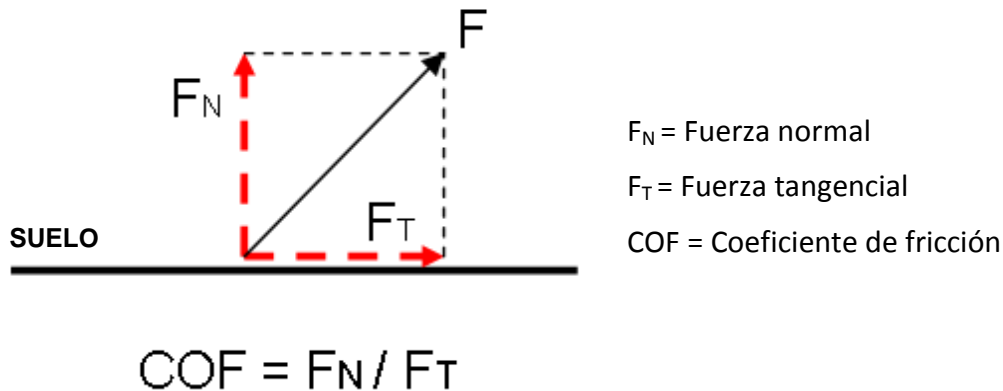


Figura 22. Esquema de fuerzas que define el coeficiente de fricción

La teoría clásica define dos coeficientes de fricción para cada par de materiales:

- **Coefficiente de fricción estático:** relacionado con la fuerza horizontal requerida para comenzar el deslizamiento después de un periodo de contacto estacionario.
- **Coefficiente de fricción dinámico:** relacionado con la fuerza horizontal necesaria para mantener el deslizamiento a una velocidad dada.

El coeficiente de fricción depende de la fuerza normal y de la velocidad entre las superficies (coeficiente dinámico) y es independiente del área aparente de contacto. Además el coeficiente estático siempre es mayor que el dinámico.

La teoría clásica prevé aproximadamente el comportamiento de algunos materiales como los metales, pero no es capaz de explicar el comportamiento de los materiales que en la mayoría de los casos componen la suela de los zapatos (goma, caucho, poliuretano,...).

5.3.6.1. Factores que influyen en la fricción

Se consideran factores de riesgo aquellos que incrementan la posibilidad de caídas debido a la presencia de fricción insuficiente entre el pie y el suelo. Dichos factores se pueden dividir entre primarios y secundarios (Grönqvist 1995a).

- Los factores primarios (y mayores) son los que generan un bajo nivel de agarre y mala fricción entre el calzado y las superficies sobre las que se avanza (Smith and Falk 1987). De hecho cuando la fricción no es adecuada se incrementa mucho la posibilidad de resbalar y sufrir una caída. Existen fases del paso donde este riesgo es más crítico. Así, en el impacto de talón al principio de la fase de apoyo, la incorrecta fricción da lugar a resbalamientos hacia adelante, y en la fase de despegue hacia detrás. De entre ambos, el resbalamiento hacia adelante es mucho más peligroso (Lemon y Son 1989). Además, el riesgo de resbalar se ve influido por la percepción subjetiva que el sujeto tiene de la fricción del suelo (Zamora et al. 2008).

- Por otra parte, existen riesgos secundarios que son los que tienen que ver con agentes del entorno (e.g. iluminación inadecuada, contaminantes de las superficies) (Zamora et al. 2008; Armstrong 1978) o intrínsecos del usuario (la edad, la ausencia de percepción del nivel de baja fricción, el tipo de actividad física, etc.) (Pooley 1978).

Lo que está claro es que la mayoría de accidentes por resbalamiento ocurren durante la marcha. Aunque uno de estos factores por sí solo no puede explicar la ocurrencia de un resbalamiento, la combinación de uno o más parece ser suficiente.

En la actualidad hay identificados un gran número de estudios que rechazan la teoría clásica de fricción para gomas y plásticos. Estos indican que es imposible asignar un único coeficiente de fricción a dos superficies y que a velocidades cercanas a cero la fricción de la mayoría de gomas y plásticos crece rápidamente con la velocidad, y la fricción estática tiende a ser muy pequeña. El coeficiente de fricción estático deja de tener un sentido claro y se debe definir un coeficiente o índice de fricción que depende de muchos factores (James, 1980). Estos factores son, principalmente:

- Fuerza normal a las superficies.
- Geometría y área aparente de contacto entre las superficies.
- Velocidad relativa entre superficies.
- Características mecánicas del material (dureza, rigidez,...).
- Características superficiales del material (rugosidad, existencia de contaminantes,...)
- Tiempo de contacto entre las superficies.
- Condiciones ambientales (temperatura, humedad,...).

5.3.6.2. Influencia del calzado en la fricción

Específicamente entre el calzado y las superficies existen una serie de factores que afectan a la fricción entre el calzado y el suelo y que hay que tener en cuenta para mejorar las condiciones de la marcha. Estos factores se pueden dividir en factores biomecánicos, ambientales, mecánicos de los materiales y geométricos del diseño. A continuación se describe brevemente la influencia de cada uno de ellos:

FACTORES BIOMECÁNICOS

- Velocidad relativa entre superficies. En gran número de las parejas zapato-suela un incremento en la velocidad causa un incremento en el coeficiente dinámico de fricción, lo que es conveniente en el sentido de la seguridad (Redfern y Bidanda 1994). Los efectos de la velocidad difieren con la existencia de contaminantes. Cuando crece la velocidad, los contaminantes tienen menos tiempo para desalojar la suela y el coeficiente de fricción puede decrecer (aguaplaning) (Chaffin et al. 1992). La velocidad relativa del tacón con el suelo en el contacto para la marcha normal es de 10-20 cm/s. Durante el

deslizamiento la velocidad es muy variable, creciendo hasta 40-50 cm/s (Redfern y Bidanda 1994).

- Fuerza normal a las superficies. El coeficiente de fricción para gomas y plásticos varía con la fuerza vertical aplicada. El coeficiente decrece cuando la fuerza crece, aunque esta variación no es grande para pequeñas variaciones de la fuerza y puede variar según las características mecánicas del material (Bowden y Tabor 1982). En presencia de contaminantes el incremento de la fuerza normal es beneficioso por favorecer su drenaje entre las superficies (Chaffin y Woldstad, 1992).
- Ángulo entre suela y suelo. Ángulos entre 5° y 15° no tienen un gran efecto en el coeficiente de fricción dinámico, aunque se observa una disminución del coeficiente con el aumento del ángulo. Esta variación depende del diseño de la suela en el tacón, siendo menor en zapatos con tacón biselado (Grönqvist, 1995b).
- Condiciones de la marcha. El usuario adapta su marcha (longitud del paso, velocidad de desplazamiento, etc.) a las características de fricción entre su calzado y el suelo de forma que un cambio brusco del coeficiente de fricción debido a un cambio de superficie o a la presencia de un contaminante puede dar lugar a un resbalón. Por este motivo debe existir la menor variación posible en el coeficiente de fricción para diferentes condiciones del pavimento.
- Tiempo de contacto. La fuerza de adhesión entre dos superficies aumenta con el tiempo de contacto por aumentar la adhesión atómica. Esto influye en el caso del coeficiente estático de fricción, pero no cuando se mide el coeficiente dinámico.
- Centro de gravedad del calzado: Si el calzado tiene un centro de gravedad equilibrado, esto es, situado cerca del fulcrum del pie, parece ser que el usuario tiene un mejor control del equilibrio durante la marcha (Abeysekera y Khan, 1997).

FACTORES AMBIENTALES

- Temperatura. El coeficiente de fricción disminuye cuando la temperatura desciende, el material se endurece y el agarre es menor. También desciende cuando la temperatura aumenta excesivamente (sobre 60-70 °C) (Bowden y Tabor 1982).
- Contaminantes. La presencia de contaminantes, por lo general, produce una disminución del coeficiente de fricción. El valor de esta disminución depende de las características del contaminante (ej. viscosidad) y del resto de factores que intervienen en la fricción (Chaffin y Woldstad, 1992).

FACTORES MECÁNICOS DE LOS MATERIALES

- Dureza. En superficies sin contaminar se aprecia una disminución del coeficiente de fricción con la dureza. Una superficie blanda es capaz de deformarse aumentando la superficie de contacto. En caso de contaminantes poco viscosos como el agua, y sobre superficies lisas, el coeficiente también desciende cuando aumenta la dureza. Pero en presencia de contaminantes más

viscosos o de suelos rugosos, el incremento de la dureza supone un aumento del coeficiente de fricción (Redfern y Bidanda, 1994; Chaffin et al. 1992; George, 1993).

- **Rugosidad.** Las irregularidades superficiales mejoran el drenaje de los contaminantes aumentando el coeficiente de fricción. Sin embargo, cuando no hay contaminantes las superficies lisas aumentan el área de contacto, mejorando el coeficiente de fricción (Redfern y Bidanda, 1994; Chaffin et al. 1992).

FACTORES GEOMÉTRICOS DEL DISEÑO

- **Geometría y huella de la suela.** Cuando la superficies están limpias de contaminantes, el coeficiente de fricción es mayor con suelas lisas y sin dibujo. Sin embargo, es recomendable el uso de ranuras y dibujo en la suela cuando existen contaminantes para facilitar el drenaje. Los dibujos que forman el perfil de la suela y que están en contacto con el suelo deben tener un volumen y características mecánicas que permitan la movilidad (el material y el dibujo interactúan con el coeficiente de fricción), y sus bordes deben ser afilados para limpiar cualquier contaminante. Se deben disponer canales con suficiente anchura y profundidad para una rápida evacuación de los contaminantes, evitando siempre capturar estos entre la superficie y la suela (por bordes que cierren los canales o por orificios sin salida). Son recomendables también tacos multidireccionales con superficies planas, sin cuñas, y listados en dirección transversal a la marcha en puntera y tacón para favorecer el agarre en el contacto y despegue. También se recomienda el tacón biselado para aumentar la superficie de contacto en el momento de máximo riesgo (Ramiro 1995; Wilson, 1990).

5.4. CUANTIFICACIÓN DEL CONFORT Y DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES

Los test existentes para la cuantificación del confort y las propiedades funcionales se pueden dividir en dos clases:

- **Subjetivos:** Son test diseñados para captar la percepción de los usuarios de las propiedades funcionales del calzado. Generalmente están basados en cuestionarios.
- **Objetivos:** Son aquellos desarrollados para cuantificar objetivamente las propiedades funcionales del calzado. Se llevan acabo con maquinaria y existen tanto **test estandarizados** como **test no estandarizados**, diseñados en diversos centros de investigación o institutos tecnológicos, principalmente desarrollados para ofrecer a las empresas un servicio de valoración de sus calzados.

A continuación se incluye una revisión de dichos test, tanto subjetivos como objetivos, y de entre estos últimos, tanto los que son estándar como los que no lo son. Respecto a los test no estándar se incluye una revisión de los diferentes tipos que existen en el mercado Europeo (SATRA-UK, IBV-Spain, TNO-Netherlands, CTC-France), que a efectos prácticos se puede considerar que cubree la casuística mundial en este tipo de test.

5.4.1. EVALUACIÓN DEL CONFORT

El **confort** derivado del uso de un calzado es una sensación individual que depende de muchos factores. La complejidad que entraña la definición de naturaleza del confort conlleva otro problema a resolver: su **medición**. El confort es una sensación subjetiva que no permite una fácil cuantificación o interpretación. Debido a esto el confort ha sido descrito como una sensación subjetiva dependiendo de las diferencias individuales y se ha sugerido que no puede ser medido directamente (Cavanagh, 1980; Slater, 1985; Chen et al., 1994). Además, las medidas subjetivas, que parecen ser el único medio hoy por hoy de medir el confort, son difíciles de interpretar al tener una gran influencia de las preferencias del usuario. Por tanto, es importante identificar los factores de la interacción usuario-calzado que son relevantes para el confort (Chen et al., 1994, Miller et al., 2000) y así poder enfocar mejor los esfuerzos en su medición.

Actualmente, para el estudio de la interacción del confort experimentado por el sujeto con los aspectos de diseño del calzado se recurre a la realización de pruebas subjetivas (Mündermann et al. 2002). Las pruebas subjetivas, basadas en la recopilación de información a través de encuestas de confort, que han sido ampliamente utilizadas en el ámbito de la Ergonomía y especialmente en el análisis del mobiliario (Corlett, 1981) están basadas en el confort general (Shackel et al., 1969) y en el confort por zonas específicas del cuerpo (Corlett et al., 1992).

Sin embargo, su utilización para la evaluación de calzado no está muy extendida a pesar de los esfuerzos llevados a cabo en los últimos años para generar criterios de diseño basados en el confort. De hecho, en la industria del calzado y particularmente en relación con el diseño de hormas se efectúan las llamadas “pruebas de calce”, que consisten en probar los nuevos prototipos con sujetos que dan su opinión sobre los mismos. No obstante, estas pruebas de calce se realizan sin ir más allá de la opinión personal de los sujetos participantes en ellas.

La metodología utilizada para el análisis del confort ampliamente utilizada en el ámbito de la Ergonomía consiste, de acuerdo con el procedimiento de Shackel et al. (1969), en tres tipos de cuestionarios rellenados durante y al final del uso del producto utilizado bajo condiciones controladas:

- de **confort general**. Por medio de una encuesta se trata de cuantificar el nivel de confort general.
- de **confort por partes del cuerpo**. Para la aplicación de este método se utiliza un diagrama del cuerpo humano dividido en zonas y se pide al sujeto que indique el nivel de molestias en cada zona, de acuerdo a una escala que va desde la ausencia de molestias al dolor.
- de **juicios subjetivos** sobre las características del objeto en estudio. Tras un periodo de prueba, y generalmente después de realizar las pruebas anteriores, los usuarios rellenan una encuesta acerca de su opinión sobre determinados rasgos del objeto, tales como sus características dimensionales.

A partir de las respuestas obtenidas en el test de confort general y comparando las respuestas con las obtenidas con otros productos semejantes, se puede establecer, a rasgos generales, el nivel de confort del objeto ensayado.

La ventaja de incorporar esta metodología de análisis subjetivos reside en que permiten complementar los datos de las pruebas objetivas, proporcionando información sobre las sensaciones del usuario, que es precisamente sobre lo que se quiere actuar.

5.4.2. FLEXIBILIDAD

La flexibilidad del calzado es cuantificable tanto a partir de ensayos con usuarios y maquinaria. A continuación se describen ambas aproximaciones.

5.4.2.1. Test con usuarios para la flexibilidad

Para la medición de la flexibilidad del calzado principalmente se aplican dos metodologías:

- **Análisis de movimientos** mediante cámaras y puntos reflectantes, que posteriormente son digitalizados para obtener su posición y parametrizados para obtener el ángulo de flexión de la articulación metatarsofalángica (e.g. Wolf et al. 2008).
- **Goniometría:** Mediante el uso de goniómetros se mide directamente el ángulo entre la parte trasera del pie (por detrás de la articulación metatarsofalángica) y la delantera (por delante de la articulación metatarsofalángica). Los goniómetros consisten en dos mitades simétricas, de pequeño tamaño y adhesivas, unidas por un muelle. Para medir el ángulo entre dos segmentos, cada una de las mitades se adhiere al segmento correspondiente, alineadas con la dirección del segmento que define el lado del ángulo a medir.

El análisis de movimientos ofrece una cantidad de información mucho más amplia que la goniometría, pues permite obtener la posición de distintos segmentos del pie y sus ángulos correspondientes, aunque también exige mucho más trabajo previo de preparación de la experimentación (establecimiento de un modelo biomecánico, colocación de los marcadores reflectantes de luz, etc.) y posterior de tratamiento de los datos (digitalización, cálculo de parámetros).

Las técnicas goniométricas son, por otro lado, mucho más sencillas de aplicar, siendo la obtención de datos automática ya que se registra directamente el ángulo entre dos segmentos.

5.4.2.2. Test con maquinaria para la flexibilidad

A continuación se describen los test estándar y no estándar existentes para la cuantificación de la flexibilidad en laboratorio

5.4.2.2.1. Test estándar

Existía una normativa centrada en la flexibilidad de calzados de correr (ASTM F911-85, 1994), pero fue retirada en el año 2002. No se conoce ninguna normativa actualmente en vigor.

5.4.2.2.2. Test no estándar

Existen diversos desarrollos en el mercado de protocolos y maquinaria para la medición de la flexibilidad del calzado. En general, los test existentes en ellos pueden agruparse según dos aproximaciones para la medición de la flexión de un calzado, según el parámetro escogido como representativo de la capacidad de flexibilidad del calzado:

- Test de medición de resistencia a la flexión (Test de ángulo de flexión constante)
- Test de medición de la flexión máxima alcanzable (Test de fuerza de flexión constante)

A continuación se describen ambas metodologías:

ÁNGULO DE FLEXIÓN CONSTANTE

Esta aproximación se caracteriza porque aplica una flexión de un ángulo máximo desde el punto de vista fisiológico (55° en el punto de preparación del balanceo) al calzado en la posición de la articulación metatarsofalángica y se mide el par flexor necesario para llegar a dicha flexión máxima (Figura 23).

La variable de salida puede ser directamente el par flexor medido, la fuerza necesaria, o la rigidez a flexión (momento) extraída de las curvas fuerza-desplazamiento de cada ciclo para una serie de ángulos de flexión entre el 0° y el ángulo máximo definido.

Como resultado aproximado de estos test, se aportan las medidas de distintos tipos medios de calzados efectuadas por SATRA (Tabla 11):

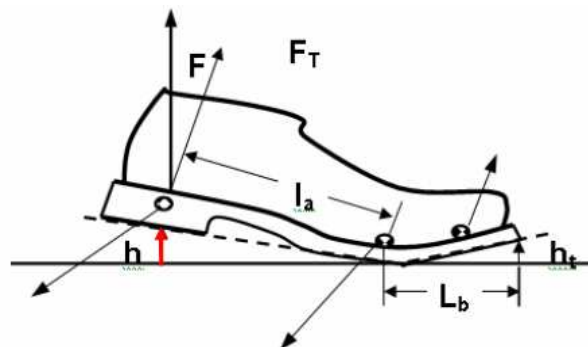


Figura 23. Principios cinéticos y cinemáticos que rigen los test de flexibilidad con ángulo de flexión constante. Extraída de bases de datos internas del IBV.

Tipo de calzado	Rango (N·m)	Media (N·m)
Zapato de vestir hombre	6 - 12	9.7
Botas y calzado de seguridad, calzado pesado.	5 - 10	7.1
Zapato Casual para hombres	3 - 6	4.3
Zapato Casual para mujeres	2 - 7	4.3
Zapato Court para mujeres	1 - 3	2.1

Tabla 11. Resultados aproximadas de estos test para distintos tipos de calzado.

Y se han establecido los siguientes rangos de clasificación para el confort (Tabla 12):

Momento a 50 (N·m)	Clasificación
> 10	Muy Alto
8 - 10	Alto
4 - 8	Moderado
2 - 4	Bajo
< 2	Muy Bajo

Tabla 12. Intervalos de clasificación para el confort a partir de resultados de flexibilidad

FUERZA CONSTANTE

Esta aproximación se caracteriza porque aplica una fuerza constante de flexión a la altura de la articulación metatarsofalángica y se mide el ángulo máximo al que llega el calzado. Un método basado en esta aproximación se puede observar en la Figura 24. Como variable de salida se extrae el ángulo alcanzado al aplicar la fuerza constante.

En general, sin depender del tipo de test, todos ellos llevan a cabo varios ciclos y sacan la media de la variable de salida del mismo.



Figura 24. Maquinaria tipo utilizada en estos ensayos. Extraída de bases de datos internas del IBV.

5.4.3. ABSORCIÓN DE IMPACTOS

La medida de la capacidad de absorción de impactos de un calzado se puede llevar a cabo mediante dos aproximaciones: test con usuarios o test con maquinaria especializada.

A continuación se describen dichas aproximaciones.

5.4.3.1. Test con usuarios para la absorción de impactos

La metodología más ampliamente utilizada para las medidas de absorción de impactos del calzado con usuarios es la acelerometría (Figura 25).

Dicha técnica consiste en medir la aceleración que le llega a la tibia, tras ser filtrada por el calzado, en el impacto de talón al principio de la fase de apoyo de la marcha. Mediante esta técnica se han llegado a medir ondas de choque con aceleraciones de ente 2 a 15 g con acelerómetros situados en los extremos distal y proximal de la tibia, en el fémur, sacro, espina cervical y frente (Alcántara et al., 1996; Folman et al., 1986; ; Forner et al., 1995; Hennig & Lafortune, 1991; Lewis et al., 1991; Light et al., 1980; Nigg y Herzog, 1994; Shorten y Winslow, 1992; Voloshin, 1993a).

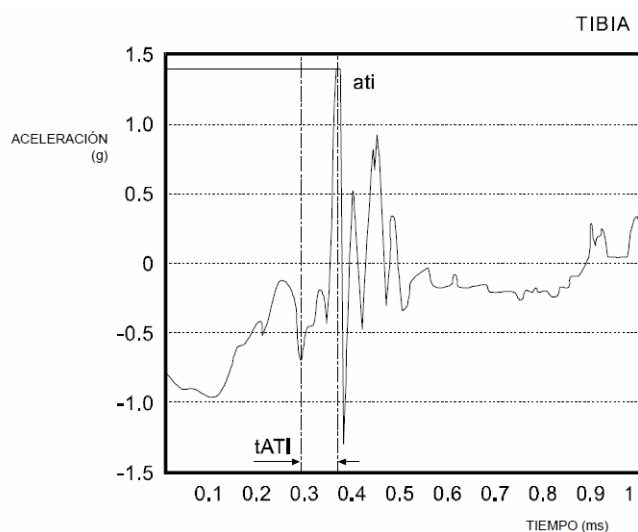


Figura 25. Señal de aceleración registrada en la tibia. Extraída de bases de datos internas del IBV.

5.4.3.2. Test con máquinas para la absorción de impactos

Respecto a las medidas con maquinaria especializada, existen tanto test estándar como test no estándar.

5.4.3.2.1. Test estándar

Existe una normativa (ISO 4651, 1998) donde se describe el ensayo para determinar la absorción de impactos de un calzado. Se trata de un test de caída (“drop test”) que define la absorción de impactos como la reducción de la fuerza de impacto con respecto a la fuerza máxima registrada.

Dicho test se basa en el procedimiento de dejar caer un émbolo con un peso controlado sobre un material y registrar la curva de fuerza-deformación. De dicha curva se extrae la información adecuada que cuantifica la capacidad de absorción de impactos del material.

5.4.3.2.2. Test no estándar

Existen distintos test desarrollados en el ámbito del calzado según el instituto de investigación que se considere. Sin embargo todos ellos se basan en la simulación de la fase de impacto de talón durante la marcha, lo que hace que al final todos los test tengan bastantes similitudes. Así, todos los test se denominan “drop tests” y están basados en el estándar (Figura 26). Los parámetros de control varían de uno a otros, pero en general son la carga aplicada y la velocidad de aplicación de la misma.



Figura 26. Test de absorción de impactos del IBV. Extraída de bases de datos internas del IBV.

Existen dos tipos principales de test en el mercado, dependiendo de las variables de medida:

FUERZA Y DEFORMACIÓN

Son los test que basan sus variables de medida en la fuerza aplicada y la deformación sufrida por el calzado. A su vez existen diversas aproximaciones dependiendo del tipo exacto de variables de medida, pero básicamente se miden dos parámetros:

- La rigidez dinámica: Consiste en la fuerza necesaria para comprimir el material. En términos generales, la capacidad de absorción de impactos se incrementa con bajos valores de la rigidez dinámica. Para medir esta propiedad se suele ajustar una línea a una o dos fases de la curva fuerza-desplazamiento (Figura 27).

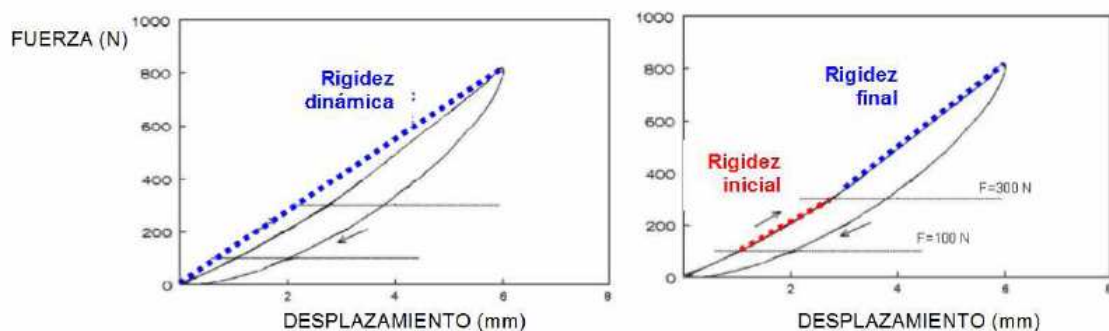


Figura 27. Medida de la rigidez dinámica en 1 o 2 fases.

- Ratio de energía disipada: Representa la capacidad del material para disipar la energía que le llega. Un valor alto del ratio de energía disipada representa una alta capacidad de disipación de energía, lo cual es beneficioso para la absorción de impactos. Su cálculo consiste en dividir la energía disipada por la energía

aplicada. La energía disipada corresponde al área encerrada por la curva de Fuerza-deformación (la diferencia entre la aplicada y la devuelta), y la aplicada al área bajo el primer tramo de la curva Fuerza – deformación, durante el cual la fuerza se está aplicando (Figura 28).

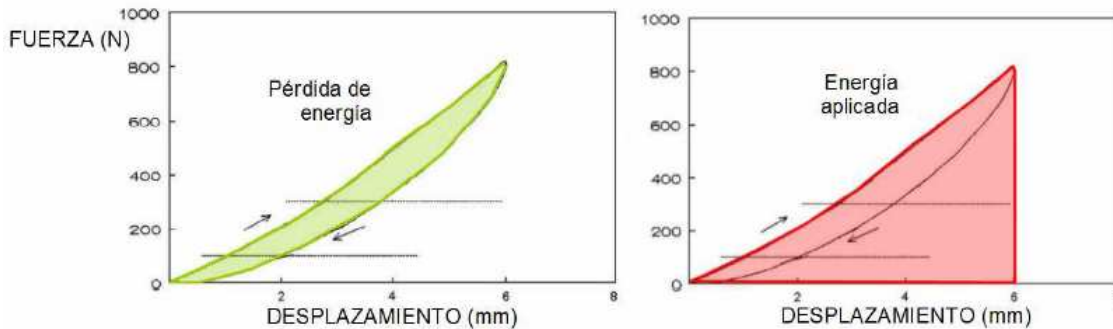


Figura 28. Media del ratio de energía absorbida. $R_{de} = \text{Energía disipada} / \text{Energía aplicada}$

ACELERACIÓN

Son los test cuyas variables de medida se basan en la reducción de la onda de choque que es capaz de producir el calzado a través de la reducción en la aceleración transmitida:

- Aceleración máxima (vs, mm/s^2): Medida en la zona de aplicación de la carga y el extremo opuesto.
- Coeficiente de transmisión: Es el ratio entre las aceleraciones máximas medidas en la zona de aplicación de la carga y en el extremo opuesto

$$T = v_s \text{ max} / v_e \text{ max}$$
- Máxima deformación: Consiste en la deformación máxima que sufre el calzado durante la aplicación de la carga.

5.4.4. DISTIBUCIÓN DE PRESIONES

Al igual que en el caso de la absorción de impactos, la capacidad de distribuir presiones de un calzado se puede medir mediante dos aproximaciones: test con usuarios o test con maquinaria especializada.

A continuación se describen dichas aproximaciones.

5.4.4.1. Test con usuarios para la distribución de presiones

Existen distintos tipos de equipamiento para medir la distribución de presiones en la planta del pie durante la marcha o bipedestación en sujetos tanto calzados como descalzos.

El principal inconveniente de los sistemas de medida montados sobre el suelo para la medida de la distribución de presiones a pie descalzo es la imposibilidad de valorar el comportamiento de la interfase pie-calzado. Con objeto de superar estas limitaciones

se desarrollaron los sistemas para la medida de distribución de cargas entre el pie y el calzado de plantillas instrumentadas con matrices de sensores.

Desde que en 1978 Nicol y Hennig desarrollaron una matriz de 256 sensores capacitivos precursora del sistema comercial Emed PEDAR de la compañía Novel (Novel Germany, München. / Novel USA, Minneapolis, Minnesota, USA) han surgido multitud de plantillas instrumentadas en el mercado con distintas características. En la actualidad es el sistema más extendido en el ámbito internacional.

En general, todas las plantillas se basan en el mismo principio: una matriz de sensores de presión sobre una plantilla que permite medir la distribución de presiones de manera dinámica. Este tipo de instrumentación permite obtener una imagen en dos dimensiones coloreada de la distribuciones de presiones sobre la planta del pie, y ha sido utilizado en múltiples aplicaciones (Figura 29).

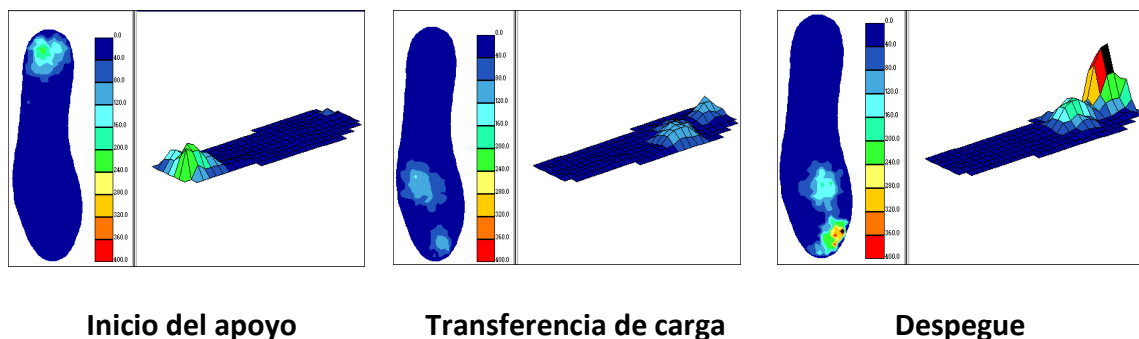


Figura 29. Distribución de presiones en la marcha normal. Extraída de bases de datos internas del IBV.

5.4.4.2. Test con máquinas para la distribución de presiones

A excepción del test desarrollado en el IBV, actualmente no se conoce ningún test (estándar o no) enfocado a medir la capacidad de un calzado de distribuir las presiones adecuadamente.

El test desarrollado en el IBV para la cuantificación de la capacidad de un calzado de distribuir presiones se divide en dos evaluaciones distintas en función de las presiones:

- Altas presiones: La capacidad de distribuir presiones se evalúa en zonas donde las presiones son altas: la cabeza del 1er metatarso y el talón.
- Bajas presiones: La capacidad de distribuir presiones se evalúa en zonas donde las presiones son bajas: en la toda la planta del pie excepto en la cabeza del 1er meta y el talón.

Los test son llevados a cabo usando una máquina de ensayos universal INSTRON 8501 (Figura 30), y consiste en la aplicación de una fuerza de magnitud y velocidad determinadas para obtener la reacción del material. A partir de la curva de fuerza-deformación que se obtiene se extraen los siguientes parámetros:

- Ratio de energía absorbida (Eabs): Capacidad de absorción de energía durante la deformación
- Deformación máxima (Dmax): La deformación máxima alcanzada por el material durante la prueba.

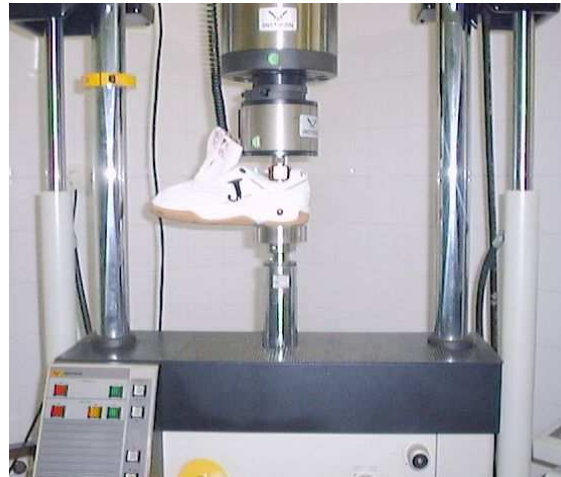


Figura 30. Test de distribución de presiones desarrollado en el IBV. Extraída de bases de datos internas del IBV.

5.4.5. AJUSTE

El ajuste puede definirse como el resultado de la interacción entre el pie y el calzado. Los factores que influyen en esta interacción y las zonas que más importancia tienen en el ajuste del calzado son conocidas, pero aún existe un gran desconocimiento sobre cómo debería ser un ajuste correcto.

Ergónomos se han esforzado para alcanzar un ajuste correcto entre las personas y las herramientas o equipamiento de uso común, pero esto, conocido como “ajuste correcto” o compatibilidad, es generalmente desconocido en muchas circunstancias (Karwowski and Jamaldin, 1996).

Conseguir una metodología reglada que sea capaz de evaluar el nivel de ajuste de un pie determinado dentro de un zapato es un proceso muy complejo que no se soluciona únicamente estableciendo comparaciones dimensionales o formales entre el pie y la horma del zapato, sino que además depende de muchos otros factores

Como puede apreciarse, conseguir el calce correcto de un zapato para un usuario es muy complejo puesto que depende de muchos factores, de los cuales, algunos se conocen y pueden controlarse en el proceso de ajuste y otros deben ser objeto de estudio. A partir de la revisión bibliográfica que se ha realizado sobre el ajuste del calzado, se ha podido comprobar que pese a que se han realizado muchos estudios para generar herramientas y metodologías que permiten evaluar el calce de un zapato o diseñar hormas con calce correcto para un pie (usuario) o una población, en ninguno de ellos se han llegado a obtener criterios de calce que supongan la base para conocer si un zapato calza correctamente a un pie (evaluación: best - fitting) o para diseñar una horma personalizada para un pie (diseño: personalización).

5.4.5.1. Test con sujetos para el ajuste

Los fabricantes de calzado no han diseñado o desarrollado procedimientos para evaluar el ajuste entre los pies de las personas y el calzado que llevan, son los usuarios los que finalmente evalúan la calidad del ajuste llevando el zapato (Kolarik,1995). El ajuste percibido depende de muchos factores: el período del día, la actividad realizada, la salud del usuario, etc. Como resultado, un buen ajuste en el momento de la adquisición del calzado no asegura el confort en otro día o en cualquier otro momento del día. Sin embargo, sería interesante utilizar una medida cuantitativa para evaluar el ajuste del calzado, incluso cuando se presentan variaciones en el tamaño del pie. En términos de control estadístico de procesos, la variación del tamaño del pie puede considerarse como una causa común de variación para identificar el mal ajuste de las dimensiones del calzado

Cuando la interacción entre el pie – zapato supera un cierto umbral, el resultado es dolor o disconfort. Algunos autores han propuesto hipótesis de disconfort (Goonetilleke, 1988) que pueden ser usadas para perfilar la fase de cambio entre confort y disconfort si se conoce el umbral para la superficie completa del pie. Cuantificar el ajuste de este modo permitiría predecir el disconfort o el dolor, ahorrando tiempo y dinero al reducir las largas pruebas de calce que se realizan normalmente cuando se fabrica el prototipo de un zapato. Sin embargo, incluso siendo conocidos los mecanismos que causan disconfort (Goonetilleke, 1988), la variación en los de disconfort con variaciones de presión aún no están cuantificados completamente. La disponibilidad de esta información pueden producir mejoras significantivas en la predicción del ajuste del calzado.

Existen dos aproximaciones a la hora de medir el ajuste de un calzado y un pie.

La **primera aproximación** es tratar de conocer el nivel de presiones que el calzado está provocando sobre el pie. La idea es que cuanto más ajustado esté el calzado mayores presiones producirá sobre el pie. Aunque se han llevado a cabo algunos intentos de cuantificar la relación entre nivel de presión en el corte y confort percibido (Jordan and Bartlett, 1995; Jordan et al., 1997), los resultados no son concluyentes, por lo que queda mucho trabajo por hacer. Es de destacar que esta aproximación se basa en el efecto tanto de la geometría como del tipo de material, y es capaz de capturar el ajuste dinámico a lo largo del ciclo de marcha.

La **otra aproximación**, mucho más extendida es cotejar las formas del pie y de la horma en base a ciertos criterios de ajuste. Para capturar la forma de medir el pie existen varios métodos, desde la cinta métrica hasta los avanzados escáneres 3D capaces de registrar la forma del pie con alta resolución (INFOOT, http://www.iwl.jp/main/infoot_std.html) (Figura 31). Esta metodología adolece de que debido a que la comparación se lleva a cabo con el pie estático en bipedestación, el ajuste calculado no considera la naturaleza dinámica del pie.

Una vez registrada las formas con el escáner en 3D, para poder comparar las formas existen distintas aproximaciones en el mercado: desde la comparación directa de medidas lineales en 2D (Witana et al. 2004) hasta la comparación de formas completas en 3D (Luximon et al. 2001).

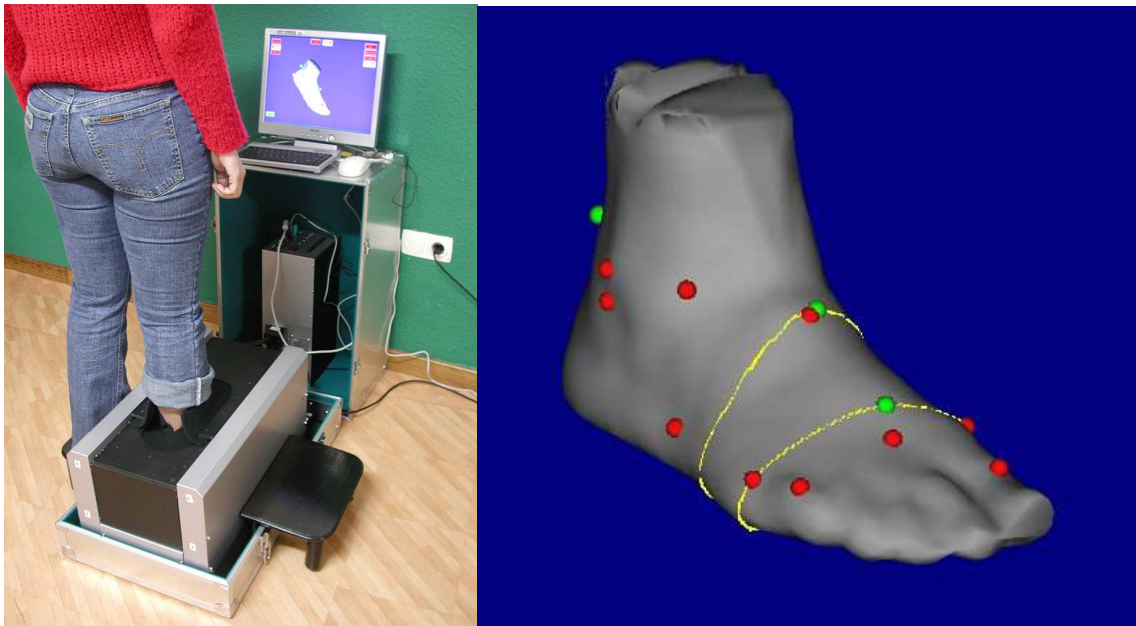


Figura 31. Escaneado 3D con infoot. Extraída de bases de datos internas del IBV.

5.4.5.2. Test con máquinas para el ajuste

Como se ha visto, los sistemas actuales para la medición del ajuste consisten en capturar la forma del pie y la horma, y cotejarlas.

Existe una normativa (ASTM F539 – 01, 2007) que se centra predominantemente en las medidas de la zona metatarsal y los dedos para ajustar el calzado. Por otra parte, diversos aparatos de medida del ajuste (p.e. el aparato de medida del ajuste de Brannock <http://www.brannock.com/>), ninguno de ellos considerado como estándar, (Goonetilleke et al., 2000) se centran en la longitud del pie y la máxima anchura alrededor de la articulación metatarsofalángica.

Aparte de éstas, no se conoce ninguna metodología estándar que establezca cómo se han de llevar a cabo estas medidas. En este sentido se han llevado a cabo algunas tentativas (Witana et al., 2004); Luximon et al., 2003) de metodología de valoración de la ajuste considerando tanto percepción del usuario como medidas objetivas, pero siguen sin cuajar como método estándar.

Finalmente, tampoco se conoce ninguna **tecnología** que contenga los criterios de ajuste y sea capaz de dar una valoración del ajuste de determinada horma para una cierta población.

5.4.6. CONFORT TÉRMICO

La cuantificación de los factores climáticos está basada en tests físicos y fisiológicos y en adicionales test subjetivos. Se han propuesto numerosos ensayos para evaluar las características microclimáticas del calzado, tanto con sujetos como con maquinaria.

5.4.6.1. Test con sujetos para el confort térmico

Existen dos tipos de ensayos, los basados en pruebas objetivas y los basados en pruebas subjetivas.

5.4.6.1.1. Técnicas objetivas

Con estas técnicas se pretende caracterizar el comportamiento fisiológico del cuerpo humano ante diferentes condiciones térmicas determinadas por el ambiente, la ropa, la variación entre sujetos, etc. Para esta caracterización es necesaria la medida de diversas variables fisiológicas sobre los sujetos y la medida de los parámetros térmicos del ambiente. Son numerosos los trabajos realizados que contemplan este tipo de técnicas en el estudio del efecto de la ropa (Nielsen et al., 1985; Ilmarinen, 1989; Rissanen, 1997; McLellan, 1996), del ambiente (Snellen, 1966; ISO 10551, 1995) e incluso de sillas de ruedas (Humphreys, 1998) en la respuesta corporal global.

Entre estos trabajos, aunque de forma menos extendida, también se han desarrollado técnicas objetivas para el estudio del efecto del calzado en la respuesta termorregulatoria del cuerpo humano. En estas técnicas se puede distinguir entre las que miden las características fisiológicas de forma continua (temperatura, humedad, frecuencia cardíaca, etc.) y las que estudian únicamente el estado al inicio y final del ensayo (absorción de humedad).

En la medida de variables fisiológicas de forma continua, Kurz (1992) desarrolló un test en condiciones reales, controlando el ambiente mediante una cámara climática, en el que se determinaba el microclima entre el calcetín y el forro del calzado midiendo la temperatura y la humedad relativa. Adicionalmente se medía la temperatura de la piel en la parte más sensitiva de la suela. Se han realizado ensayos similares en ambientes sin control de temperatura ni humedad. Kawabata (1993) realizó un ensayo en condiciones ambientales sin control en el que además del microclima en el pie, se medía la temperatura y humedad entre la ropa y la piel en el tronco y la pierna. En este trabajo se medía también la temperatura de la piel en el empeine, suela, pierna, antebrazo y pecho y latidos del corazón para determinar el efecto del calzado en la respuesta global del cuerpo humano. Este tipo de ensayos se realiza según un ciclo de trabajo para observar el efecto del calzado en las variables medidas en diferentes condiciones de carga térmica.

Keech (1990) estudió la absorción de humedad del calzado y el calcetín realizando medidas del peso al inicio y al final del ensayo. Para ello se ensayaron zapatos especiales que se desmontaban fácilmente para ver cómo se distribuía el sudor en el pie dependiendo del tipo de materiales y del diseño del calzado. Se utilizaba también un calcetín marcado para ver qué cantidad de sudor se acumula en cada zona. Técnicas similares se han utilizado para determinar la pérdida de peso de los sujetos durante el ensayo debido a la sudoración (Nielsen et al., 1985; Snellen, 1966).

Aunque los test con personas producen resultados de gran importancia, las medidas obtenidas presentan una gran variabilidad determinada por:

- Variaciones inter e intra individuales de la respuesta termorregulatoria

- Edad de los sujetos de ensayo
- Sexo de los sujetos de ensayo
- Forma física

Sin embargo, la predicción de la situación climática en el calzado bajo condiciones de uso reales son sólo posibles con este tipo de técnicas.

5.4.6.1.2. Técnicas subjetivas

La metodología utilizada para el análisis del confort ha sido ampliamente utilizada en el ámbito de la Ergonomía y especialmente en el análisis del mobiliario y del puesto de trabajo (Page, 1994) y consiste en la realización de pruebas subjetivas, basadas en la recopilación de información a través de encuestas.

Este tipo de encuestas también han sido utilizadas en el ámbito de la ergonomía para determinar cómo influye el ambiente del puesto de trabajo en el confort térmico de los sujetos. En este sentido, la norma ISO 10551:1995, presenta la construcción y uso de preguntas y escalas de juicios para la obtención de datos subjetivos que sean fiables y comparables.

En calzado, se han utilizado técnicas subjetivas para determinar la influencia de factores mecánicos como el ajuste, la amortiguación de impactos, o la distribución de presiones en el confort percibido por el sujeto (García, 1994) pero, hasta el momento, no existen trabajos que usen estas técnicas para la evaluación del confort térmico que proporciona el calzado.

5.4.6.2. Test con máquinas para el confort térmico

Existen dos tipos de ensayos de las propiedades térmicas con maquinaria, dependiendo del producto objeto de ensayo:

- Test de materiales del calzado
- Test de calzado completo

A continuación se describen dichos test.

5.4.6.2.1. Test de materiales del calzado

Existe una amplia gama de test para cuantificar las características físicas de los materiales que conforman el calzado. Estas características son, principalmente:

- Conductividad térmica. Mide la capacidad de aislante térmico del material. La norma EN344, 1992 se ocupa de esta medida en calzado.
- Permeabilidad al vapor de agua. Esta característica proporciona información sobre la cantidad de agua por unidad de tiempo que traspasa un material bajo determinadas condiciones ambientales. Las normas ASTM D5052 (2005) y ASTM D2322 (2005) tratan estas técnicas en calzado.

- Absorción de agua. Determina la capacidad de retención de humedad de un material (ASTMD 6014, 2005).

Estas técnicas presentan dos problemas principales que hacen que sean insuficientes para la evaluación térmica del calzado. Estos problemas son:

- Para asegurar la validez y repetibilidad de los resultados entre diferentes laboratorios se utilizan técnicas poco realistas con respecto a los aspectos fisiológicos. Estas técnicas requieren, además, de equipos mecánicos complejos con grandes requisitos constructivos (Kurz, 1994).
- Estudian los materiales que forman el calzado de forma independiente. No se conoce por lo tanto la interacción entre los diferentes materiales y elementos constructivos y, lo que es más importante, no tienen en cuenta el efecto del diseño, ajuste, elementos adicionales, etc. que influyen en gran medida en el confort térmico.

5.4.6.2.2. Test de calzado completo

Para mejorar los resultados obtenidos con ensayos mecánicos de materiales, se han desarrollado máquinas de simulación fisiológica que permiten el ensayo del calzado completo. Se han construido muchos de estos modelos, algunos de ellos incluso simulando todo el cuerpo para el desarrollo de ropa de trabajo (Nielsen et al., 1985). En calzado se han utilizado modelos de pie calentados eléctricamente para medir el calor intercambiado con el ambiente (Santee and Endrusick, 1988; Endrusick, 1992;). Los test más complejos simulan la sudoración del pie y el efecto de intercambio de aire mediante diferentes estrategias. Kurz (1994) usa un pie maniquí con orificios de salida de aire distribuidos por toda su superficie según la densidad de glándulas sudoríparas (Figura 32). Este pie dispone de un control de humedad del aire de salida, con lo que se puede simular la sudoración de forma precisa. El aire de salida causa, a la vez, el movimiento del aire interno que simula el efecto de bombeo del pie. Este método aunque es más preciso que los tests mecánicos no resuelve totalmente el problema del movimiento real del pie durante la marcha.



Figura 32. Pie maniquí utilizado para el estudio de calzado (Kurz, 1994).

Bergquist (1997) soluciona este problema mediante un pie maniquí, articulado en la zona de los dedos, que simula el movimiento del pie durante la marcha mediante dos cilindros neumáticos. El modelo del pie se divide en 9 partes que se calientan mediante resistencias regularmente enrolladas en la superficie de cada zona. Las resistencias se fijan con finas capas de plástico colocando sensores de temperatura resistivos en cada zona.

5.4.7. FRICCION

5.4.7.1. Test con sujetos para la fricción

Utilizando la plataforma de fuerza se han medido las fuerzas de reacción a lo largo del ciclo de marcha y por tanto el coeficiente de carga. La plataforma de fuerzas permite medir la componente horizontal (FH) y vertical (FV) de la fuerza ejercida entre el zapato y el suelo durante un paso normal. Con estas fuerzas se puede calcular el cociente FH/FV o coeficiente de carga (COC), que proporciona un parámetro de deslizamiento potencial, es decir, este coeficiente informa de cuándo es más probable que ocurra el deslizamiento: si la magnitud del coeficiente de carga (COC) supera el coeficiente de fricción (COF) entre el zapato y suelo, se producirá el deslizamiento (Perkins y Wilson 1983).

El coeficiente de carga varía a lo largo de la fase de soporte de la marcha y depende del modelo personal de marcha y de parámetros como la longitud de paso, de su velocidad y del propio calzado (James 1983).

En la

Figura 33 se puede observar la curva característica de este cociente, en la que aparecen varios 'picos'. Los picos 1, 3 y 4 pueden producir un deslizamiento del pie en el sentido del movimiento, y los picos 2, 5 y 6 en sentido contrario. Los picos 1, 2, 3 y 4 aparecen en la fase de contacto y los picos 5 y 6 en la fase de despegue.

El pico 1 se produce en el primer instante del contacto, en el que las fuerzas horizontal y vertical son muy pequeñas, el peso del cuerpo está aún apoyado en el otro pie y los deslizamientos son pequeños y raramente peligrosos. Este pico depende de la dureza del material (Perkins 1978). El pico 2 aparece poco después, cuando las fuerzas cambian rápidamente de dirección (entre los picos 1 y 3), por lo que no habrá tiempo para que se produzca un deslizamiento largo y la pérdida de equilibrio (Perkins y Wilson 1983). Este pico no aparece cuando se anda descalzo (Perkins 1978).

Es más probable que se produzcan deslizamientos largos y caídas hacia delante poco después del instante de contacto, picos 3 y 4, ya que el peso del cuerpo sigue apoyándose en el pie en deslizamiento. Esto ocurre entre 50 y 100 ms después de iniciada la fase de contacto, instante en el que el peso apoyado crece muy rápidamente, entre el 35 y el 90 % del peso corporal.

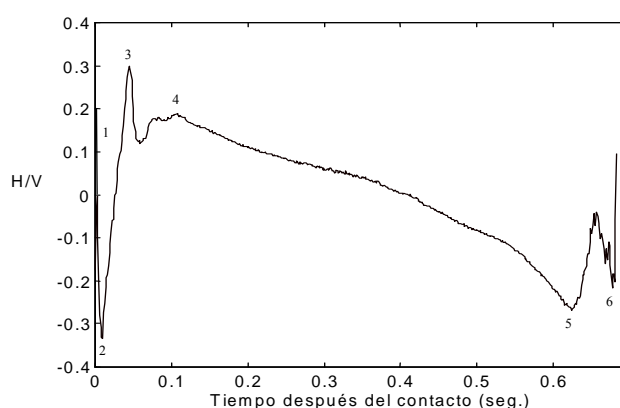


Figura 33. COC respecto del tiempo después del contacto del tacón con el suelo. Extraída de bases de datos internas del IBV.

En los picos 5 y 6, fase de despegue, es menos probable que el deslizamiento sea peligroso porque el peso del cuerpo está siendo transferido al otro pie.

Las caídas producidas por los picos 3 y 4 pueden ser de consecuencias más graves, por ser hacia atrás (deslizamiento del pie hacia delante) (Lyoid y Stevenson 1992) y (Perkins y Wilson 1983).

El momento de mayor riesgo de caídas es cuando el tacón contacta con el suelo (Durá et al.1999). La siguiente Tabla 13 muestra la media de los valores de los picos más representativos y la fuerza vertical tomados de ensayos de marcha de hombres adultos.

Pico	Media del valor del pico COC	Intervalo de Confianza (95%)	Fuerza vertical media (N)
3	0.21	0.03-0.39	477
4	0.15	0.03-0.33	594
5	0.23	0-0.47	344

Tabla 13. Picos en COC, ensayos de marcha normal de hombres adultos.

El valor de los picos se verá afectado por factores como: la manera de andar, la longitud de la zancada y el tipo de calzado, así como las percepciones humanas. Cuando una persona percibe que el suelo es resbaladizo ajusta la forma de andar, reduciendo la zancada y apoyando la suela plana (James 1983). Esta adaptación depende de factores como la antropometría, la fuerza, la edad, los problemas físicos y de factores de comportamiento cognoscitivo (tiempo de reacción, estrés, atención, miedo a las caídas).

En caso de resbalón y justo cuando comienza el deslizamiento, el cuerpo genera una respuesta para restablecer el equilibrio y evitar así la caída (Cham y Redfern, 2001; Cham y Redfern, 2002). Los movimientos de corrección son principalmente la flexión de la rodilla y el aumento del momento en la cadera.

En lo referente a la fricción se pueden definir unos criterios generales que proporcionen una medida de la seguridad de un zapato. Estos criterios son (Perkins y Wilson 1983), (Grönqvist et al. 1989) y (Lyoid y Stevenson 1992):

- El coeficiente de fricción estándar obtenido en un ensayo con unas condiciones particulares debe ser superior a un valor fijo que dependerá de las características del ensayo. De esta forma se tiene un valor de seguridad del coeficiente de fricción que dependerá del ensayo y del tipo de superficie utilizada. Algunos valores de seguridad para el coeficiente de fricción dados en diferentes ensayos son: 0.4 (Lyoid y Stevenson 1992), 0.49 (James 1980), 0.22 (Grönqvist et al. 1989).
- Coeficiente de fricción dinámico creciente con la velocidad (y mayor que el estático). Esto evita que una vez comenzado el deslizamiento acabe en caída, ya que al aumentar la velocidad relativa entre el pie y el suelo aumenta también el coeficiente de fricción. En caso contrario es más difícil que comience el deslizamiento pero éste es más peligroso al disminuir el coeficiente cuando aumenta la velocidad de deslizamiento.

- Desviación estándar del coeficiente de fricción baja para diferentes combinaciones suela-suelo (coeficiente de fricción uniforme). Los cambios rápidos en las propiedades de fricción son peligrosos, no dan tiempo a que la forma de andar se ajuste al coeficiente de fricción existente. Este ángulo es de unos 21 grados en el primer momento del apoyo, pasa a unos 5-6 grados en el instante de máximo riesgo (picos 3 y 4) y desciende rápidamente hasta 0 (zapato completamente apoyado en el suelo) (Strandberg y Lanshammar 1981). Una variación en el coeficiente con el ángulo puede causar que un deslizamiento termine en pérdida de equilibrio y caída.

5.4.7.2. Test con máquinas para la fricción

Existen tanto test estándar como no estándar.

5.4.7.2.1. Test estándar

Existe una normativa para la realización del Test de fricción para el calzado de uso profesional (ENV 13287, 2004). En esta normativa, la máquina de ensayo consta de un superficie horizontal (suelo) en la que apoya la suela del zapato. Se induce un movimiento relativo entre el calzado y el suelo. El zapato se sujeta mediante un pie artificial y es presionado sobre el suelo con una carga determinada. Se recomienda que exista un mecanismo que descienda el calzado hasta la superficie en un periodo de tiempo definido hasta el comienzo del ciclo de medida. Se conecta al zapato o al suelo un dinamómetro que permita medir la fuerza. Se miden las fuerzas y se calcula el coeficiente dinámico de fricción.

El suelo (Lámina de acero inoxidable/Baldosas de cerámica) y el lubricante (Solución de glicerina en agua/Agua con detergente) se eligen dependiendo de las condiciones de uso del calzado ensayado. En todos los ensayos debe usarse lubricante con la superficie elegida.

Se mide la fuerza de fricción (horizontal) y la de carga (vertical) y la velocidad de deslizamiento. El coeficiente de fricción medio se calcula dividiendo la fuerza horizontal entre la vertical durante el periodo de medida. El periodo de medida empezará cuando se alcance la estabilidad del coeficiente de fricción. Se deben elegir dos unidades del mismo calzado y realizar al menos 5 medidas de cada zapato con cada condición. Se toma la media aritmética de cada condición.

Los siguientes coeficientes (Tabla 14) de fricción son los coeficientes mínimos requeridos para cumplir las especificaciones de seguridad:

CONDICIÓN	COF mín
Acero con glicerina	0.15
Acero con glicerina	0.45
Baldosas cerámicas con agua y detergente	0.30

Tabla 14. Coeficientes mínimos requeridos para cumplir las especificaciones de seguridad

5.4.7.2.2. Test no estándar

El principal interés de desarrollar un test de fricción es conseguir un coeficiente que permita descartar el calzado poco seguro, o que simplemente proporcione una ordenación del calzado en función de su seguridad.

Existen muchas máquinas de ensayo desarrolladas en diferentes laboratorios (Figura 34). El problema es que sólo si las condiciones del test son similares puede ser hecha una comparación válida. Las máquinas de ensayo que existen en la actualidad pueden clasificarse como sigue (James 1980), (Robert y Chaffin 1985) y (Jung, Schenk 1990):



Figura 34. Máquina de ensayos de fricción. Extraída de bases de datos internas del IBV.

1. De plano inclinado. Consta de una pieza recubierta con uno de los materiales del estudio apoyada sobre un plano inclinado móvil recubierto con el otro material. La tangente del ángulo al que se inicia el movimiento, o al que se alcanza una velocidad constante proporciona el coeficiente de fricción estático o el dinámico a dicha velocidad. Existen versiones más sofisticadas de este test, en el que la pieza que desliza sobre la rampa es un zapato completo al que se aplica una fuerza horizontal. Ejemplo de este test es el SATRA ramp.
2. De plataforma remolcada. En este caso la superficie es horizontal y la pieza móvil es remolcada sobre la superficie fija. Este ensayo permite aplicar fuerzas horizontales y verticales mayores que en el ensayo de plano inclinado, acercándose más a las condiciones reales de marcha humana. Existen dos variantes:
 - Fuerza de empuje constante. Se aplica una fuerza horizontal que es constante durante todo el ensayo. Este ensayo sólo es posible si la fricción dinámica es constante y mayor que la estática. No se pueden tomar medidas del coeficiente de fricción para una determinada velocidad, pero en un movimiento estable se pueden medir las velocidades finales para un empuje dado.
 - Velocidad de remolque constante. De nuevo si la fricción aumenta con la velocidad y la fricción dinámica es mayor que la estática, el movimiento será estable. En este ensayo se produce una vibración llamada "stick/slip" que depende de las características de las superficies, de los parámetros del ensayo y de la rigidez del sistema de medida. Este ensayo es difícil de realizar y sólo con coeficientes bajos (uso de suelos muy deslizantes) y pequeñas fuerzas horizontales, es posible reducir el stick/slip y conseguir una velocidad

constante sin perturbaciones. Este método de ensayo es el más utilizado en los laboratorios por ser el más versátil y el que mejores resultados proporciona al poder reproducirse con exactitud parámetros de la marcha humana. El estándar de SATRA y el test del IBV se basan en este tipo de ensayo.

3. Métodos de frenado. En estos métodos se incluyen las máquinas de péndulo y las de plataforma de frenado. Se basan en calcular un coeficiente de fricción a partir de la medida de la distancia de frenado de una pieza móvil sobre una superficie. La distancia de frenado da una medida inversa al coeficiente de fricción. Una seria pega de este método es que integra el efecto del cambio de la fricción con la velocidad. Piezas con diferente variación del coeficiente de fricción con la velocidad pueden proporcionar la misma distancia de frenado.
4. Máquinas de puntal articulado. Una fuerza vertical constante es aplicada sobre una muestra y un mecanismo aplica una fuerza lateral creciente hasta que aparece el deslizamiento. El cociente de la fuerza horizontal y vertical a la que se produce el deslizamiento da el coeficiente de fricción estático. Este ensayo depende mucho de la metodología y proporciona resultados poco repetibles.
5. Test de rampa. Una rampa es cubierta con diferentes tipos de suelos. Personas con diferentes calzados suben por la rampa y el máximo ángulo al que mantienen la estabilidad da el coeficiente de fricción. El principal error de este test es que los sujetos son reacios a caer y ajustan su modo de andar cuando comienzan a deslizarse, así el coeficiente medido no se correlaciona con que se obtendría en marcha normal. La norma DIN alemana se basa en este test para sus ensayos de fricción.
6. Máquinas rotatorias. Un disco gira a velocidad constante sobre el suelo a ensayar, el par de frenado proporciona una medida del coeficiente de fricción. Esta máquina portátil es útil para el ensayo de suelos ya instalados.

5.5. MODELOS DE CONFORT A PARTIR DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES

En la bibliografía, a pesar de existir bastantes estudios analizando la percepción de confort, no existen muchos estudios que hayan abordado la problemática de la obtención de un modelo de confort global a partir de varias propiedades funcionales de la interacción biomecánica y/o fisiológica entre el calzado y el usuario (Miller et al. 2000; Mündermann et al. 2002; Witana et al. 2004; Witana et al. 2003; Au y Goonetilleke, 2007; Lange et al. 2009). Mientras que los estudios de Au y Goonetilleke (2007), Witana et al. (2004) y Witana et al. (2003) se dirigen al confort asociado a la percepción de ajuste, el de Miller et al. (2000) hace una aproximación más global considerando distintas propiedades funcionales, pero sin alcanzar un modelo (Tabla 15).

ESTUDIO	TIPOLOGÍA DE CALZADO	PROPIEDADES FUNCIONALES	CONFORT
Lange et al, 2009	Calzado militar (botas)	Acolchamiento*, Flexibilidad	Confort global
Witana et al 2009	Superficies para caminar	Distribución de presiones	Confort asociado a la distribución de presiones
Au y Goonetilleke 2007	Calzados de señora	Ajuste y percepción estética	Confort global
Witana et al 2004	Calzados de vestir de hombre	Ajuste	Confort asociado al ajuste
Witana et al 2003	Calzados de vestir de hombre	Ajuste	Confort asociado al ajuste
Mündermann et al. 2002	Calzados de correr	Ajuste, Acolchamiento*	Confort global
Miller et al. 2000	Calzados de correr	Ajuste, Acolchamiento*, Flexibilidad, Rigidez a torsión,	Confort global
Milani et al. 1997	Calzados de correr	Absorción de impactos, distribución de presiones, estabilidad**	---

(*) El concepto de acolchamiento se refiere aquí tanto a amortiguación de impactos como de distribución de presiones

(**) La estabilidad se refiere al nivel de pronación percibido por los usuarios

Tabla 15. Estudios de la relación entre las propiedades funcionales y el confort.

El modelo de confort Au y Goonetilleke, 2007 se centra en el zapato de tacón y puntera estrecha, y está basado en la comparación entre la percepción y la preferencia de diversos aspectos de la interacción, incluidos la percepción de confort o discomfort. Cada mujer evaluaba dos modelos de calzado de su propiedad, pudiendo ser cualquier calzado siempre que fueran del tipo requerido (zapato de tacón con puntera estrecha) y uno de ellos percibido como confortable y el otro como incómodo. El estudio encuentra que el confort está relacionado con la ausencia de dolor, la sensación, el sonido, la textura y las dimensiones del calzado. Además, el estudio hace especial hincapié en el análisis del ajuste. Los resultados muestran que, de forma general, los usuarios consideran un buen ajuste cuando éste es percibido como perfecto (ni apretado ni suelto) o suelto. Además, se analizaron las preferencias en diferentes regiones del pie por separado: dedos, zona articulación metatarsofalángica, zona trasera, borde y cierre. El estudio muestra que las zonas más relacionadas con el confort por los usuarios fueron los dedos, donde las preferencias de tipo de ajuste tienden hacia un ajuste perfecto, y la zona metatarsofalángica, donde la preferencia es de un ajuste más suelto. En la zona de lateral del arco la preferencia de ajuste tiende hacia más apretado, al contrario que en el resto de zonas evaluadas, proporcionando una ecuación relacionando la preferencia de ajuste y la percepción del mismo. Como

conclusión global, el estudio hace hincapié en la necesidad de considerar las distintas secciones para la cuantificación del confort, y de transformar las relaciones con el confort encontradas para cada una de ellas en especificaciones para los diseñadores.

El estudio de Witana et al. 2004 se centra exclusivamente en el ajuste, evaluándose el ajuste de manera global y en diferentes regiones del pie (parte delantera de los dedos, zona delantera, media y trasera del pie) para tres modelos de calzado de calle de hombre y un modelo deportivo. Además se cuantificó el ajuste de manera objetiva cuantificando las distancias en planta entre el perímetro de la horma y el perímetro del pie. El estudio encontró diferencias en el ajuste percibido de todas las áreas consideradas excepto para la zona media del pie, obteniendo un modelo predictivo del ajuste global a partir del máximo, el mínimo y la media de todas las distancias en planta entre horma y pie. La ausencia de resultados significativos para la zona media se achaca a la adaptabilidad del cierre acordonado que permite ajustar el apriete deseado. Centrándose en cada área por separado, obtiene modelos predictivos del confort percibido asociado al ajuste en las zonas delantera y media del pie a partir de las medidas objetivas de la horma y el pie. Para ambas secciones, las ecuaciones muestran que el confort asociado al ajuste percibido alcanza un máximo para unas diferencias dimensionales entre horma y pie bien definidas (8 mm en la zona delantera y 5 mm en la zona media). Además, el estudio propone que para la obtención de un modelo de confort global debe cuantificarse el confort en cada una de las áreas del pie y efectuar una suma ponderada. Finalmente como conclusión relevante se sugiere la necesidad de analizar distintos tipos y estilos de calzado para obtener unas reglas robustas de cuantificación del confort asociado al ajuste, así como considerar distintas medidas de la interacción, como la presión, para cuantificar las tolerancias perceptivas para el confort.

De forma similar, los mismos autores realizaron otro estudio (Witana et al. 2003) en el que se centraron en el ajuste aplicando una metodología similar, aunque analizando las diferencias en la percepción entre un apoyo total y un semi-apoyo durante la bipedestación. Los resultados son de nuevo un par de ecuaciones para las regiones delantera y media del pie relacionando la percepción del confort asociado al ajuste con las diferencias dimensionales entre horma y pie. Los resultados contrastan con los de Witana et al. 2004, al encontrarse valores distintos de diferencias dimensionales para la percepción del ajuste perfecto en la zona delantera (aproximadamente 11mm). El estudio concluye la necesidad de analizar distintas tipologías de calzado para extender la validez de los resultados.

Finalmente, Miller et al. (2000) llevan a cabo un estudio mucho más amplio en el sentido de que se analiza la influencia de distintos factores biomecánicos en el confort percibido, incluyendo tanto el ajuste, como la distribución de presiones y absorción de impactos y flexibilidad del calzado. El estudio se efectúa con calzado deportivo de correr y se basa en la comparación de la percepción de las propiedades del calzado que tienen los usuarios con la medición de dichas propiedades de manera objetiva mediante test de laboratorio. Los resultados son una serie de conclusiones relativas a dichas comparaciones, siendo una de las más importantes la necesidad de considerar todas las propiedades funcionales conjuntamente para maximizar la comprensión de la capacidad de un calzado de producir confort, ya que la satisfacción de las necesidades del usuario en una de las propiedades por separado no implica una percepción de

confort si no se satisfacen las necesidades del usuario en las otras. Además, en el estudio se demuestra que no sólo la capacidad de satisfacer las necesidades funcionales del usuario influyen en el confort, sino que la relación entre dichas capacidades también lo hace, por lo que considerar por separado las propiedades funcionales del calzado puede implicar, dependiendo de las condiciones de uso, una pérdida de capacidad de predicción importante. Por otra parte, a pesar de representar un valioso avance al abordar la influencia de los factores biomecánicos en el confort de manera global, no cuantifica las influencias de los distintos factores biomecánicos en el confort, no obteniendo un modelo de confort global relacionando las propiedades funcionales de la interacción biomecánica y fisiológica entre usuario y calzado con la percepción de confort.

Por tanto, al quedarse en el plano cualitativo, el trabajo de Miller et al. (2000) consiste en una primera indagación en el análisis de las propiedades funcionales del calzado en el confort percibido. Este trabajo permite extraer como conclusiones más relevantes, el hecho de que efectivamente las propiedades funcionales tienen una influencia determinante en el confort global, y la necesidad de una aproximación amplia, que considere la influencia conjunta de diversas propiedades funcionales, para poder caracterizar dicha influencia.

5.6. CONCLUSIONES DEL ESTADO DEL ARTE

El estado del arte nos muestra que, en las tres grandes áreas de investigación en las que se basa esta tesis (aplicaciones de ayuda al diseño, propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado y confort percibido), existen lagunas de conocimiento que es necesario cubrir para alcanzar el desarrollo de una herramienta de apoyo al diseñador capaz de predecir las propiedades funcionales del calzado, así como el confort que proporcionan, utilizando aplicaciones CAD-CAT.

Las **aplicaciones informáticas** de apoyo al diseñador existentes están centradas, o bien en facilitar tareas del proceso de desarrollo del calzado con importante carga geométrica (diseño de la horma, desarrollo del patronaje), o bien en facilitar una representación más o menos realista de un diseño acabado desde el punto de vista estético. Ninguna de ellas aporta la capacidad de valoración del rendimiento funcional del calzado: aspectos como la flexibilidad o la amortiguación de impactos están actualmente relegados a ser analizados después de la fabricación de un prototipo real, siendo actualmente imposible hacerlo sobre un prototipo virtual modelado en CAD.

Esta situación contrasta con la de otros sectores industriales, como el de automoción o aeronáutica, en la que en los últimos años se han desarrollado aplicaciones capaces de analizar el rendimiento de productos sin la necesidad de fabricarlos. Estas aproximaciones se basan en la aplicación de las tecnologías CAD (Computer Aided Design), CAE (Computer Aided Engineering) y CAT (Computer Aided Testing), tecnologías que han evolucionado a partir de la aplicación de la capacidad de computación de los ordenadores en los procesos de diseño de productos. Específicamente, la tecnología CAT provee al proceso de diseño de la capacidad de ensayar virtualmente diseños mediante una aproximación mixta, en la que ciertos componentes estratégicos del producto son ensayados físicamente para extraer sus

propiedades y alimentar un modelo matemático que permite simular el comportamiento del producto completo sin la necesidad de fabricarlo.

La aplicación de una aproximación CAT al proceso de diseño del calzado facilitaría mucho el proceso de desarrollo de un nuevo producto, pues eliminaría la fase de fabricación y ensayo de prototipos reales, hoy en día necesaria para asegurar el confort, sustituyéndola por el ensayo de ciertos componentes y un ensayo virtual de prototipos modelados en CAD. Pero para ello es necesario conocer:

- Los test capaces de extraer las propiedades funcionales del calzado a partir de prototipos reales, así como los componentes del calzado relevantes en dichos test.
- Modelos matemáticos del comportamiento de cada una de las propiedades funcionales del calzado, de manera que se puedan predecir a partir de modelos virtuales de calzado y las propiedades de sus componentes.
- Un modelo matemático que relacione las propiedades funcionales y la percepción del confort, permitiendo predecir el confort a partir de las propiedades funcionales del calzado

Está comúnmente aceptado en la bibliografía que las siguientes **propiedades funcionales** caracterizan el rendimiento funcional de un calzado durante su interacción con el usuario: flexibilidad, absorción de impactos, distribución de presiones, ajuste, fricción y confort térmico. Para cada una de ellas existen distintos ensayos de laboratorio mediante maquinaria, así como distintos test con usuarios capaces de cuantificarlas. Para los **test de laboratorio**, dependiendo de la propiedad funcional considerada, existen normativas o protocolos más o menos establecidos. Cada uno de los test de laboratorio se caracteriza tanto por las acciones que efectúa sobre el calzado (variables de control del test), como por los parámetros que extrae del calzado representativos de la propiedad funcional (variables de medida del test). Las variables de control se basan en la simulación de la acción que ejercen el usuario y el entorno sobre el calzado. Generalmente los test existentes simulan a un usuario caminando sobre un terreno firme (e.g. pavimento urbano), aunque dependiendo de las condiciones de uso teóricas del calzado estas variables que configuran el test pueden cambiar. En cuanto a las variables de medida, cuantifican la propiedad funcional, y su idoneidad como descriptores de una propiedad funcional depende de las condiciones de cada caso (tipo de uso del calzado, de diseño, etc.). De forma global, existe bastante unanimidad en el estado del arte en cuanto a tipologías de test de laboratorio para calzado, siendo todos ellos bastante similares tanto en cuanto a las variables de control como a las variables de medida.

La influencia de las propiedades funcionales de la interacción calzado-usuario en el **confort percibido** por el usuario está demostrada en el estado del arte: existen diversos estudios analizando estas influencias en distintas condiciones de entorno y para distintas tipologías de usuario. Algunos de los estudios desarrollados incluso han llegado a obtener modelos matemáticos relacionando ambos aspectos (confort y propiedades funcionales), aunque siempre considerando propiedades funcionales por separado, siendo principalmente el ajuste la propiedad funcional más relacionada con el confort (Kunde et al. 2009; Witana et al. 2009; Au y Goonetilleke, 2007; Alemany et al., 2005; Witana et al. 2004; Luximon et al. 2001; Miller et al. 2000; Nigg, 1986;

Perkins, 1993; Audemars *et al.*, 1978; Mayer *et al.*, 1982). Sin embargo, no existe una aproximación global que haya culminado en un modelo del confort considerando la influencia de las distintas propiedades funcionales conjuntamente, sino que los estudios efectuados en este sentido se han quedado en la sugerencia de posibles influencias cruzadas entre distintas propiedades funcionales y el confort.

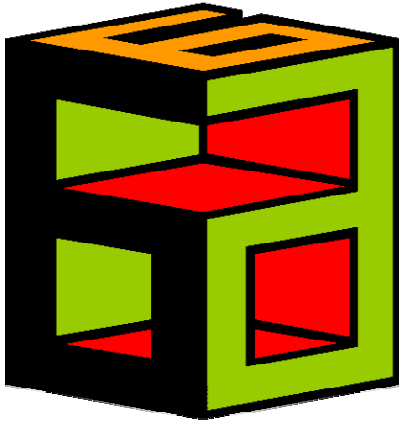
Finalmente, para el desarrollo de una aplicación informática de apoyo al diseño de calzado basado en una aproximación CAT, las deficiencias del estado del arte en materia de conocimiento se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Aunque se sabe que existe una influencia clara de las propiedades funcionales del calzado en el confort percibido, no se conoce en profundidad cómo funciona la percepción del usuario en cada una de ellas, ni su importancia relativa sobre la percepción del confort, no existiendo un modelo matemático global del confort percibido a partir de las propiedades funcionales de la interacción usuario - calzado.
- Existen multitud de test de laboratorio para caracterizar el comportamiento del calzado para cada una de las propiedades funcionales. Sin embargo, no existen modelos matemáticos que simulen estos test sobre prototipos CAD y que permitan caracterizar el comportamiento del calzado sin la necesidad de construir un prototipo real.
- No existe una aplicación informática capaz de evaluar el rendimiento funcional y de confort a partir de prototipos virtuales de calzado.

Por tanto, el trabajo de generación de conocimiento de esta tesis se centra en satisfacer estos tres puntos siguiendo la metodología que se expone a continuación.

6. METODOLOGÍA

6.1. APROXIMACIÓN METODOLÓGICA



El **objetivo central** de esta tesis consiste en la obtención de un modelo de predicción del confort percibido por el usuario a partir del diseño virtual de calzado y de información asistida por ordenador. Con dicho objetivo, la **aproximación conceptual** de la problemática planteada por la tesis parte del análisis de los elementos más básicos del problema (calzado y usuario) para llegar, a través del estudio de la interacción de las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado, a la modelización de la percepción del confort generado por un zapato (Figura 35).

Por tanto, en el nivel más básico de la aproximación metodológica existen dos factores principales que interactúan y cuya consideración constituye el punto de partida:

- El **usuario**, caracterizado por su fisiología (p.ej. sexo, antropometría), patrón locomotriz, y otras características intrínsecas (p.ej. edad y etnia).
- El **calzado**, caracterizado por las propiedades derivadas de su diseño específico: características geométricas y materiales utilizados de sus componentes, así como la tipología constructiva.

Además se contempla el hecho de que la interacción entre estos dos factores principales tiene lugar bajo la influencia de unas determinadas **condiciones de contorno**:

- El **tipo de uso**, referido a la actividad que el usuario desarrolla con el producto (p.ej. caminar, correr, etc.)
- Las **características del entorno**, considerando como tales aspectos el pavimento o superficie donde tiene lugar el uso del producto (p.ej. urbano, rural, playa, etc.) y las condiciones climáticas de existentes (principalmente temperatura y humedad).

Conceptualmente, la tesis se fundamenta en una cadena de relaciones que comienza con la **interacción entre calzado y usuario** que, enmarcada en unas **condiciones de contorno** definidas, se puede caracterizar a partir de unas determinadas **propiedades funcionales** (ajuste, absorción de impactos, distribución de presiones, flexibilidad, fricción, confort térmico), que caracterizan el rendimiento funcional del calzado y el confort proporcionado para satisfacer las necesidades del usuario (Figura 35).

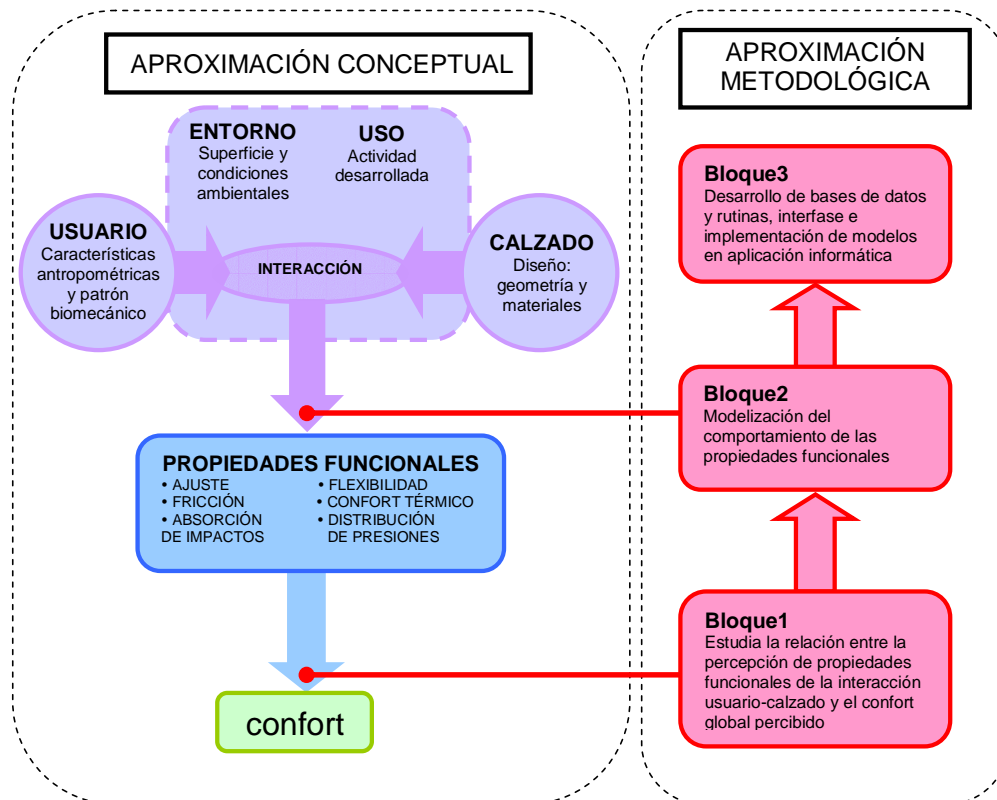


Figura 35. Cadena de relaciones en la interacción entre el usuario y el calzado bajo ciertas condiciones de uso y entorno, caracterizada por las propiedades funcionales de la interacción (ajuste, flexibilidad, etc.), y su influencia en el confort global percibido.

Por otra parte, considerando este esquema conceptual de la generación del confort a partir de la interacción usuario – calzado, la **aproximación metodológica** para alcanzar los objetivos de la tesis se ha estructurado en tres grandes bloques de trabajo (Figura 35):

- **Bloque 1:** Un primer bloque en el que se estudió la **relación entre la percepción de las propiedades funcionales asociadas a la interacción usuario-calzado y el confort global percibido**. Para ello se llevaron a cabo ensayos con maquinaria para caracterizar las propiedades del calzado y ensayos con usuarios para caracterizar la percepción ligada al uso del calzado, tanto del confort global como de cada una de las propiedades funcionales. Este análisis permitió obtener un modelo del confort global percibido a partir de las propiedades funcionales de la interacción usuario calzado, además de identificar las propiedades funcionales relevantes y significativas en el confort percibido.
- **Bloque 2:** El segundo bloque se centró en la **modelización del comportamiento de las propiedades funcionales y su implementación en un banco de ensayos virtual**. En este caso el trabajo consistió en el desarrollo y validación de modelos de los ensayos para la cuantificación de las propiedades funcionales en laboratorio con la capacidad de evaluar el comportamiento de las propiedades funcionales de un calzado a partir de su diseño geométrico y las propiedades de los materiales de sus componentes (aproximación CAT).

- **Bloque 3:** Finalmente, en el tercer y último bloque se **implementó en una aplicación informática** el modelo de percepción del confort, resultado del bloque 1, y los modelos de las propiedades funcionales, resultado del bloque 2. Además, se desarrolló e implementó el software, las bases de datos necesarias para configurar los ensayos virtuales y las rutinas necesarias para alimentar el modelo de confort.

6.2. FASES DEL TRABAJO

El trabajo desarrollado se estructuró en cuatro fases (Figura 36):

- **Fase 1.** Análisis de los factores y condiciones de contorno que definen la interacción usuario-calzado
- **Fase 2.** Análisis de la percepción de confort del usuario y su relación con la percepción asociada a las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado: desarrollo de un modelo de confort a partir de las propiedades funcionales
- **Fase 3.** Modelización de los ensayos virtuales de las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado con influencia significativa en el confort percibido.
- **Fase 4.** Implementación del banco de ensayos virtuales para la predicción del confort a partir de modelos CAD de calzados

En una primera fase el trabajo se enmarcó en desarrollar a partir del estudio de los **factores de interacción y condiciones de contorno** que definen la interacción entre calzado y usuario: las características del usuario, el diseño del calzado, las características del entorno y el tipo de uso. Esta fase permitió definir el caso particular de interacción usuario-calzado a estudiar en esta tesis: “calzado de calle de la talla 42 para hombre adulto, usando el calzado durante una prueba en tienda”.

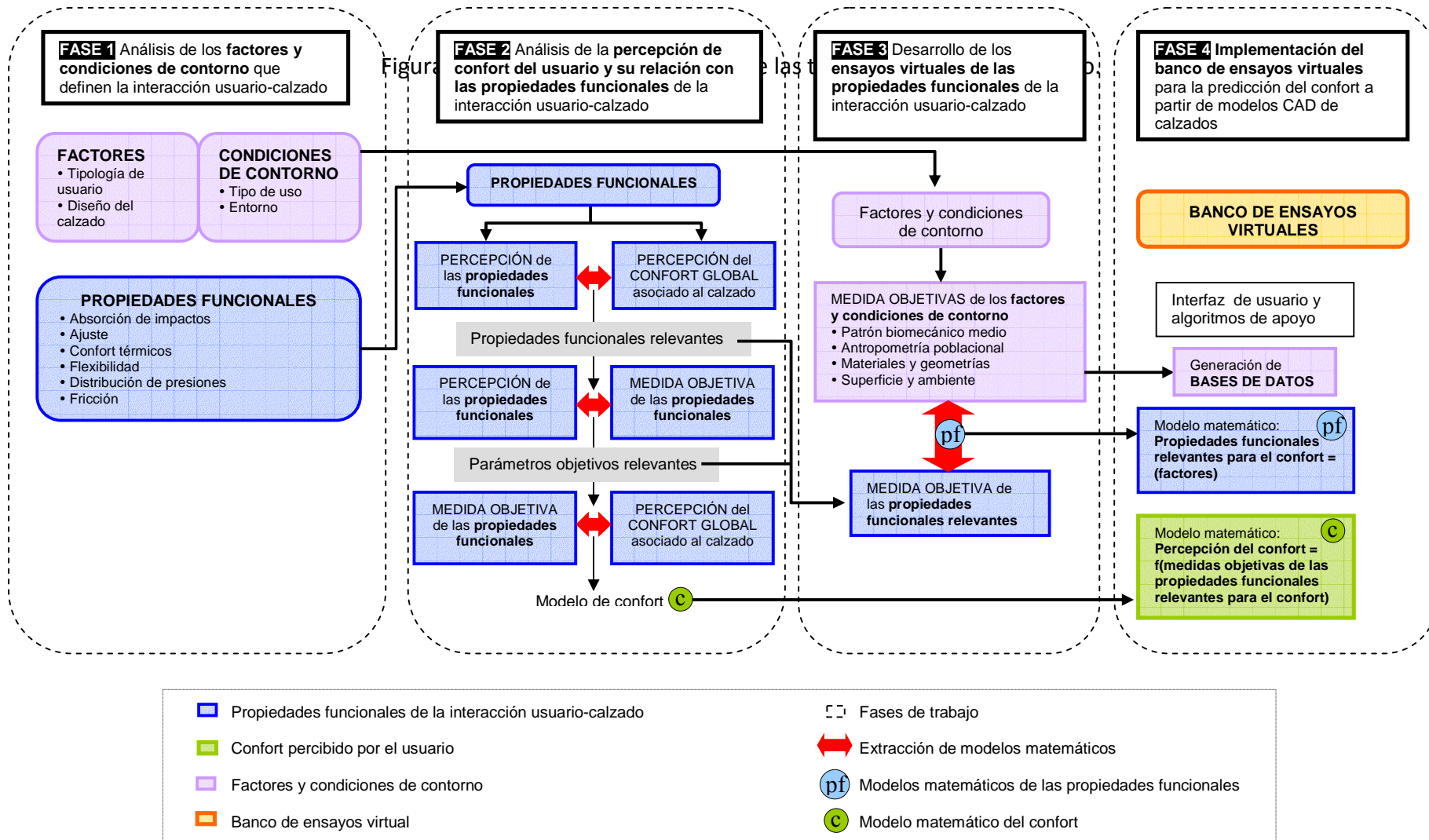
A continuación, en la FASE 2, se llevó a cabo un análisis de la **percepción del confort** del usuario, así como de la influencia de las **propiedades funcionales** del calzado en el confort global percibido. Para ello, mediante cuestionarios se analizó la relación entre la percepción de las propiedades funcionales y la percepción del confort global. Esto permitió obtener las propiedades funcionales relevantes para el confort percibido. Considerando sólo dichas propiedades funcionales identificadas como relevantes por su influencia del confort, se analizó mediante ensayos de laboratorio con maquinaria especializada la relación entre la percepción del usuario de dichas propiedades funcionales y su medida objetiva. Este análisis permitió obtener qué parámetros de las medidas objetivas se relacionan con el confort. Finalmente se analizó la relación entre los parámetros objetivos de las propiedades funcionales relevantes y la percepción del confort global. Esto permitió obtener un modelo del confort global percibido a partir de la medida objetiva de las propiedades funcionales.

En la FASE 3 se desarrollaron los **modelos matemáticos de los ensayos de laboratorio** de las propiedades funcionales identificadas como relevantes para el confort en la fase anterior. Para ello, se analizaron los test existentes de evaluación con maquinaria de las propiedades funcionales del calzado relevantes para el confort, se caracterizaron las variables de control y salida de dichos test, su idoneidad para cuantificar las

propiedades funcionales, y se desarrollaron modelos matemáticos capaces de simular el comportamiento del calzado.

Finalmente, en la FASE 4 se implementó el **banco de pruebas virtual** en una aplicación informática para poder predecir el confort percibido asociado al uso de un calzado para usuarios específicos y en determinadas condiciones de uso sin la necesidad de fabricar prototipos. Se generaron bases de datos conteniendo la información necesaria para la caracterización de los factores y el entorno que definen la interacción usuario-calzado, se implementaron los modelos matemáticos obtenidos en la FASE 3, se implementó el modelo matemático obtenido en la FASE 2 capaz de obtener el confort global percibido por el usuario a partir de las propiedades funcionales del calzado y, finalmente, se desarrolló e implementó el interfase de la aplicación informático. El trabajo incluyó el desarrollo de una interfaz para el usuario intuitiva y sencilla de utilizar.

A continuación (Figura 36) se muestra un diagrama de las distintas fases con el flujo de información, y se describe detalladamente las fases en las que se desarrolló el trabajo:



FASE 1. ANÁLISIS DE LOS FACTORES Y CONDICIONES DE CONTORNO QUE DEFINEN LA INTERACCIÓN USUARIO-CALZADO

El objetivo de esta fase fue caracterizar tanto los factores de la interacción a considerar (tipo de usuario y calzado), como las condiciones de contorno en las que dicha interacción tiene lugar (tipo de uso y características del entorno).

A partir de bibliografía se identificaron y caracterizaron los factores intrínsecos y extrínsecos que influyen en el rendimiento funcional del calzado, así como en el confort percibido por el usuario. Los factores y condiciones de contorno considerados para el análisis de la interacción usuario-calzado fueron:

- La Tipología de usuario
- Características del diseño del calzado
- Las condiciones de uso, o actividad desarrollada por el usuario
- Las características físicas del entorno

1.1 Análisis de los factores intrínsecos: características del usuario

El objetivo de esta etapa fue **segmentar la población de usuarios** con la finalidad de facilitar la valoración funcional del calzado. Se entiende por aspectos intrínsecos del usuario aquellos derivados directamente de su fisiología.

A la vista del estado del arte (Prichasuck, 1994b; Hennig and Rossenbaum, 1991), existen numerosos factores intrínsecos del usuario (p.ej. edad, peso corporal, género, talla de calce, etnia, etc.) capaces de explicar una parte de la variabilidad asociada a las medidas de las propiedades funcionales. Por tanto, es útil plantearse la segmentación de la población para reducir dicha variabilidad.

Se identificaron y extrajeron las características de los usuarios con influencia en su interacción con el calzado. Esta actividad fue necesaria pues no todas las propiedades funcionales se ven influidas de igual forma por las características del usuario. Por ejemplo, es esperable que la talla tenga una influencia mucho más marcada en el “ajuste” que en el “confort térmico”.

Como resultado se obtuvo un listado de características intrínsecas del sujeto con marcada influencia en la interacción usuario-calzado, y que por tanto deben considerarse a la hora de segmentar la población para facilitar la valoración funcional del calzado.

1.2 Análisis de los factores extrínsecos: condiciones de contorno (entorno y uso) y diseño del calzado

En esta etapa se analizaron las características extrínsecas al usuario con la finalidad de estudiar la posible **segmentación de la población** para reducir la variabilidad en la valoración funcional del calzado. Como características extrínsecas al usuario se entienden todas aquellas no directamente derivables de su fisiología.

Para ello se siguió la misma aproximación que en el caso de los aspectos intrínsecos al usuario, basada en el análisis y procesado de la información bibliográfica para

identificar y extraer las características extrínsecas que pueden tener una influencia en los resultados de las propiedades funcionales. Entre los factores encontrados están, la actividad desempeñada (andar, correr, saltar, etc.) (Shorten y Winslow, 1992; Cavanagh et al. 1997; González et al. 2007; Olaso et al. 2007), la superficie sobre la que se camina (McMahon & Greene, 1979), la temperatura y humedad ambiental (p.ej. Kurz, 1994), y el diseño del calzado (geometría, materiales y construcción) (p.ej. Johnson, 1988; Witana et al. 2004; González et al. 2007). Este análisis es importante porque, al igual que en el caso de los factores intrínsecos, la influencia de cada uno de estos factores externos en cada una de las propiedades funcionales varía. Por ejemplo, mientras que para la “absorción de impactos” la “temperatura ambiental” se puede considerar un factor de poco peso, para el “confort térmico” es vital, siendo uno de los factores, junto con la humedad relativa ambiental, de mayor influencia (p.ej. Kurz, 1994).

FASE 2. ANÁLISIS DE LA PERCEPCIÓN DE CONFORT DEL USUARIO Y SU RELACIÓN CON LA PERCEPCIÓN DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE LA INTERACCIÓN USUARIO-CALZADO: DESARROLLO DE UN MODELO DE CONFORT A PARTIR DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES

En esta fase se estudió la percepción del confort por parte del usuario, así como la influencia de las propiedades funcionales del calzado en el mismo.

La metodología utilizada consistió en la experimentación con usuarios combinada con ensayos con maquinaria especializada de las propiedades funcionales del calzado. Se desarrolló un modelo de la relación entre la percepción asociada a cada propiedad funcional y la percepción del confort global, así como un modelo de la relación entre las medidas objetivas de las propiedades funcionales mediante maquinaria especializada y la percepción del confort global.

Esto ayudó a entender la relación entre el confort percibido por el usuario y cada una de las propiedades funcionales, lo que permitió obtener un modelo de confort a partir de las medidas objetivas de las propiedades funcionales y definir los objetivos de la siguiente fase del trabajo.

2.1 Diseño de experimentos

En esta tarea, se generaron muestras representativas del tipo de usuario y calzado seleccionados para el estudio. Además se pusieron a punto los equipos de medida en laboratorio para extraer las propiedades funcionales de los calzados seleccionados, y los cuestionarios de análisis de la percepción, tanto de las propiedades funcionales como del confort de los usuarios.

2.2. Puesta a punto de los test de las propiedades funcionales

En esta fase se pusieron a punto los test de ensayo en laboratorio con maquinaria especializada para la cuantificación de las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado.

El trabajo partió de una análisis y síntesis del estado del arte realizado por expertos. Se analizaron los principios biomecánicos y fisiológicos en la relación usuario-calzado para extraer cuáles son las variables de control y de medida más relevantes de los test para

caracterizar la interacción y, que por tanto, se han de considerar para simularla en laboratorio con maquinaria especializada:

- Las **variables de control** a considerar para la replicación en el laboratorio con maquinaria especializada, que definen los parámetros de entrada del ensayo y que se refieren a parámetros biomecánicos de la interacción usuario-calzado. Por ejemplo, para la propiedad funcional del calzado “Absorción de impactos”, una variable de control relevante es la “Fuerza del impacto aplicada”. Su valor consiste en una curva temporal que aplica una fuerza del orden de 500 N en un tiempo del orden de 36 ms, y que simula el impacto del talón en los primeros instantes del apoyo durante el ciclo de marcha. Un calzado con una correcta absorción de impactos debe ser capaz de evitar, mediante una correcta amortiguación, que dicho impacto llegue al usuario para mejorar su confort.
- Las **variables de medida** de los test de laboratorio con maquinaria. Por ejemplo, en la propiedad funcional “absorción de impactos”, se considera como importante la “rigidez del material de la suela”, así como la “capacidad de absorción de energía del material que compone la suela del calzado”, considerando como suela toda la interfase de materiales que se encuentra entre el pie y el suelo.

Además, se estudiaron los distintos protocolos de ensayo de cada test, así como los medios (maquinaria principalmente) necesaria.

Esta tarea permitió tener listos los test con maquinaria para ensayar la muestra de calzados definida en la tarea previa.

2.3 Desarrollo de los ensayos

En esta tarea se llevó a cabo la experimentación con los test de maquinaria especializada en laboratorio y con los cuestionarios de percepción. Como resultado se obtuvieron las percepciones de los usuarios del confort asociado a la muestra de calzado, la percepción de sus propiedades funcionales y la cuantificación objetiva de dichas propiedades funcionales a partir de los resultados de los ensayos de laboratorio con maquinaria.

2.4 Elaboración del modelo de confort

Finalmente se analizaron los resultados de la experimentación y se obtuvo el modelo matemático relacionando la medida objetiva de de las propiedades funcionales del calzado con la percepción del confort por los usuarios. Para ello se analizaron las relaciones entre la percepción de las propiedades funcionales y la percepción del confort, lo que permitió identificar las propiedades funcionales relevantes. A continuación se analizó la relación entre la percepción de las propiedades funcionales relevantes y su medida objetiva a partir de los ensayos con maquinaria especializada, lo que permitió obtener los parámetros de medida objetiva capaces de captar la percepción de los usuarios con el confort percibido por los usuarios.

FASE 3. MODELIZACIÓN DE LOS ENSAYOS VIRTUALES DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE LA INTERACCIÓN USUARIO-CALZADO DE INFLUENCIA SIGNIFICATIVA EN EL CONFORT PERCIBIDO.

En esta tarea se estudiaron en profundidad los ensayos de laboratorio para la cuantificación de las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado identificadas como relevantes en la fase anterior, y se desarrollaron los modelos matemáticos capaces de simular virtualmente dichos test a partir de las condiciones de uso, el entorno, la tipología de usuario al que va destinado y sus características de diseño.

3.1 Definición de las especificaciones de cada modelo virtual, su alcance y limitaciones

En esta etapa se analizaron y seleccionaron las técnicas óptimas de modelado para cada una de las propiedades funcionales relevantes en el confort percibido.

Para ello se estudiaron las técnicas posibles para el modelado de cada propiedad funcional de la interacción usuario-calzado (p.ej. Modelos reológicos, Modelado en elementos finitos). A través de entrevistas a expertos y el análisis de la bibliografía se identificaron las limitaciones de cada una de ellas. Se seleccionaron las más indicadas considerando como criterios su aplicabilidad en una herramienta orientada al diseño. Como resultado se obtuvo una serie de metodologías de modelado óptimas para cada propiedad funcional.

Finalmente, a partir de los resultados de la tarea anterior, se especificó la arquitectura del modelo virtual de cada una de las propiedades funcionales. Las especificaciones incluían para cada propiedad funcional:

- Las variables de control
- El protocolo del test de laboratorio
- La técnica de modelado necesaria (que definiría el procesado interno de los datos)
- Los alcances y limitaciones de cada aproximación en cada propiedad funcional.
- Las variables de salida
- Bases de datos necesarias

El resultado de esta tarea sirvió como ruta para el desarrollo de los modelos de los ensayos para cada propiedad funcional.

3.2 Desarrollo de los modelos de cada propiedad funcional

En este punto se desarrollaron y validaron los modelos virtuales de cada una de las propiedades funcionales consideradas relevantes en la FASE 2 por su relación con el confort percibido por el usuario.

3.3 Validación de los modelos de cada propiedad funcional

La validación se basó en la comparación de los resultados de ensayos reales llevados a cabo en laboratorio con calzado real, con los test virtuales, desarrollados con calzados virtuales y los modelos virtuales.

Como resultado se obtuvieron los modelos virtuales validados para cada propiedad funcional relevante para el confort.

FASE 4. IMPLEMENTACIÓN DEL BANCO DE ENSAYOS VIRTUALES PARA LA PREDICCIÓN DEL CONFORT A PARTIR DE MODELOS CAD DE CALZADOS

En esta fase se integraron los modelos desarrollados en fases anteriores en una aplicación informática útil para diseñadores. Además se desarrollaron todos los módulos del sistema que sirven la información a los modelos para que puedan simular ensayos: las bases de datos y un módulo para extraer información geométrica útil para cada propiedad funcional del modelo virtual de calzado.

4.1 Definición de la arquitectura del sistema y el flujo de información

En esta fase se definieron las uniones y los flujos de información entre todos los componentes del sistema de ensayos virtuales para generar las especificaciones del sistema completo. Los componentes del sistema son:

- El calzado virtual, definido por su geometría y los materiales asignados.
- Los factores intrínsecos y extrínsecos del usuario con marcada influencia en la interacción usuario-calzado.
- Las bases de datos de materiales, antropométricas y de patrones biomecánicos del usuario desarrolladas en la tarea 4.2.
- El módulo procesador de la geometría para extraer la información geométrica del calzado virtual, desarrollado en la tarea 4.3.
- Los módulos de análisis de las propiedades funcionales, basados en los modelos desarrollados en la FASE 3 de las propiedades funcionales relevantes para el confort, capaces de analizar el comportamiento del calzado virtual.
- El módulo de confort, basado en el modelo de confort resultado de la FASE 2, encargado de transformar los resultados de los ensayos funcionales del calzado en percepción del confort del usuario.

Como resultado se obtuvo las especificaciones del sistema definiendo los flujos de información necesaria entre estos componentes.

4.2 Desarrollo de las Bases de datos

En este punto se generaron las bases de datos necesarias para alimentar los modelos de ensayos virtuales desarrollados. Las bases de datos contienen distintos tipos de información:

- Las **variables de control** (basadas en los patrones biomecánicos y fisiológicos de la interacción usuario-calzado), de las propiedades funcionales modeladas. Un ejemplo de este tipo de datos son las curvas de fuerza que hay que aplicar sobre los materiales en el ensayo de “absorción de impactos” que simulan la fuerza que el usuario aplica sobre el calzado y que depende tanto de sus características como de la actividad que desarrolle. Otro ejemplo son los percentiles antropométricos de las secciones de los pies del tipo de usuario escogido, que permiten cuantificar el ajuste para un determinado calzado.
- Las características de **materiales** usados en calzado. Se llevaron a cabo ensayos con maquinaria de materiales para extraer las propiedades relacionadas con las variables de medida de las propiedades funcionales. Un ejemplo de este tipo de

datos fueron las propiedades mecánicas (Rigidez dinámica) de los materiales caracterizadas de la suela del calzado para el módulo de “absorción de impactos”, extraídas en forma de curva Fuerza-Deformación.

Como resultado se obtuvieron dos bases de datos: una general conteniendo las características de todos los materiales que se utilizan en la validación de los módulos de las propiedades funcionales, y otra base de datos específica de cada propiedad funcional conteniendo los datos relativos al patrón de interacción usuario-calzado de la tipología de usuario, condiciones de uso y entorno consideradas en la tesis.

4.3 Desarrollo del módulo simplificador de geometría

En esta etapa se llevó a cabo el desarrollo del módulo simplificador de geometría, cuya misión básica es la de extraer las variables geométricas de los componentes del calzado virtual que sirven de entrada para los modelos virtuales de cada propiedad funcional.

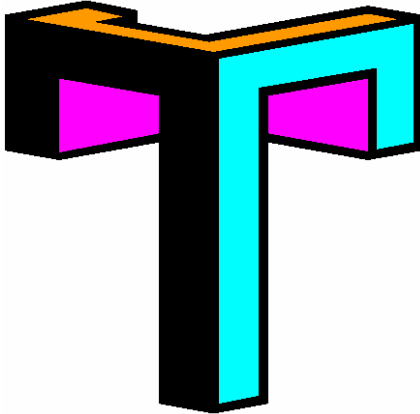
Para ello, se identificaron las necesidades en materia de geometría del calzado de cada una de las propiedades funcionales (definidas como variables de control en las especificaciones generadas en la tarea 3.1), y se desarrollaron los algoritmos necesarios para extraerlas de los modelos CAD de calzado virtual.

Como resultado se obtuvo un módulo de software capaz de recibir la geometría en CAD del calzado virtual y procesarla para extraer las medidas necesarias para el análisis de las propiedades funcionales según los casos.

4.4. Programación e integración de los módulos que componen el sistema de ensayos virtuales para el calzado y del interfaz gráfico

Finalmente, en esta etapa se implementaron en software todos los módulos definidos en las etapas anteriores, para a continuación integrarlos según las especificaciones de la etapa 4.1.

Además se desarrolló el interfaz gráfico para facilitar el uso del programa a diseñadores con un conocimiento medio de informática.



7. MATERIAL Y MÉTODOS

A continuación se describen los materiales y métodos utilizados para el desarrollo de las fases descritas en el punto anterior:

- FASE 1. La metodología seguida para definir los aspectos relevantes de la tesis, entre los que se encuentran los factores a considerar en la interacción usuario-calzado y los test de laboratorio utilizados para la evaluación de las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado.
- FASE 2. Los materiales y métodos utilizados para el desarrollo del modelo de predicción de la percepción del confort en el calzado a partir de las propiedades funcionales medidas de la interacción usuario-calzado cuantificadas a partir de test de laboratorio.
- FASE 3. Los materiales y métodos utilizados para la modelización de los test de laboratorio de las propiedades funcionales relevantes para el confort, permitiendo cuantificarlas a partir de diseño virtuales de calzado.
- FASE 4. Los materiales y métodos seguidos para la integración de los diferentes módulos desarrollados y el desarrollo de la aplicación informática.

7.1. FACTORES DE LA INTERACCIÓN USUARIO-CALZADO Y TEST DE LABORATORIO PARA LA EVALUACIÓN DE SUS PROPIEDADES FUNCIONALES (FASE 1)

Para el estudio de los factores y condiciones de contorno con influencia en la interacción usuario y calzado (usuario, condiciones de uso, entorno y diseño del calzado) se siguió una metodología basada en la extracción y procesado experto de conocimiento existente en el estado del arte. El análisis permitió extraer información relativa a los siguientes puntos:

- **Factores:** Tipo de usuario (edad, género, patologías, etc.) y diseño del calzado (geometrías y materiales).
- **Condiciones de contorno:** Entorno (condiciones ambientales, tipología de superficie, etc.) y condiciones de uso (bipedestación, caminar, correr, saltar, deporte, etc.).

Estos factores y condiciones de contorno configuran la interacción usuario-calzado influyendo en el comportamiento de las propiedades funcionales que la definen. Tras el análisis de la información extraída de la bibliografía se acotó el trabajo de esta tesis al siguiente escenario: **“hombre adulto sin patologías que prueba un calzado de calle en la tienda para evaluar su confort”**.

A continuación (Tabla 16) se detallan más específicamente las características de los factores y condiciones de contorno que definen este escenario:

Factores	Tipo de usuario	Edad: Adultos de 20 a 60 años Género: Masculino Patologías: Ninguna
	Tipología de calzado	Calzado urbano casual
Condiciones de contorno	Entorno	Interior de una tienda de zapatos corriente (superficie plana y dura)
	Condiciones de uso	Bipedestación y caminar durante un periodo de 5-10 minutos

Tabla 16. Características de los factores de interacción y las condiciones de contorno seleccionadas para la tesis

7.2. DESARROLLO DE UN MODELO DEL LA PERCEPCIÓN DEL CONFORT A PARTIR DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE LA INTERACCIÓN USUARIO-CALZADO (FASE 2)

A continuación se describen los materiales y métodos seguidos para la obtención de un modelo de confort a partir de las propiedades funcionales del calzado. La información se ha estructurado en los siguientes puntos:

- Proceso de obtención de los modelos de predicción
- Definición de la muestra de sujetos
- Definición de la muestra de calzados
- Métodos estadísticos para la obtención de los modelos de predicción
- Metodologías de experimentación
- Validación del modelo de confort

7.2.1. Proceso de obtención de los modelos de predicción

El análisis y desarrollo de un modelo de la percepción del confort se llevó a cabo en la FASE 2, y se basó en el establecimiento de las relaciones entre las propiedades funcionales del calzado y el confort global percibido por el usuario.

En el estudio se contemplaron dos puntos de vista: uno subjetivo y otro objetivo (Figura 37). Desde el punto de vista **subjetivo**, se analizó la percepción que el usuario tiene de las propiedades funcionales del calzado, así como del confort global percibido. Desde el punto de vista **objetivo** se analizaron las propiedades funcionales medidas mediante ensayos de laboratorio. Tal como se ha descrito en la metodología, el establecimiento de relaciones (a través de la creación de modelos de predicción) entre estas experimentaciones permitió obtener un modelo de confort percibido a partir de las medidas objetivas de las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado.

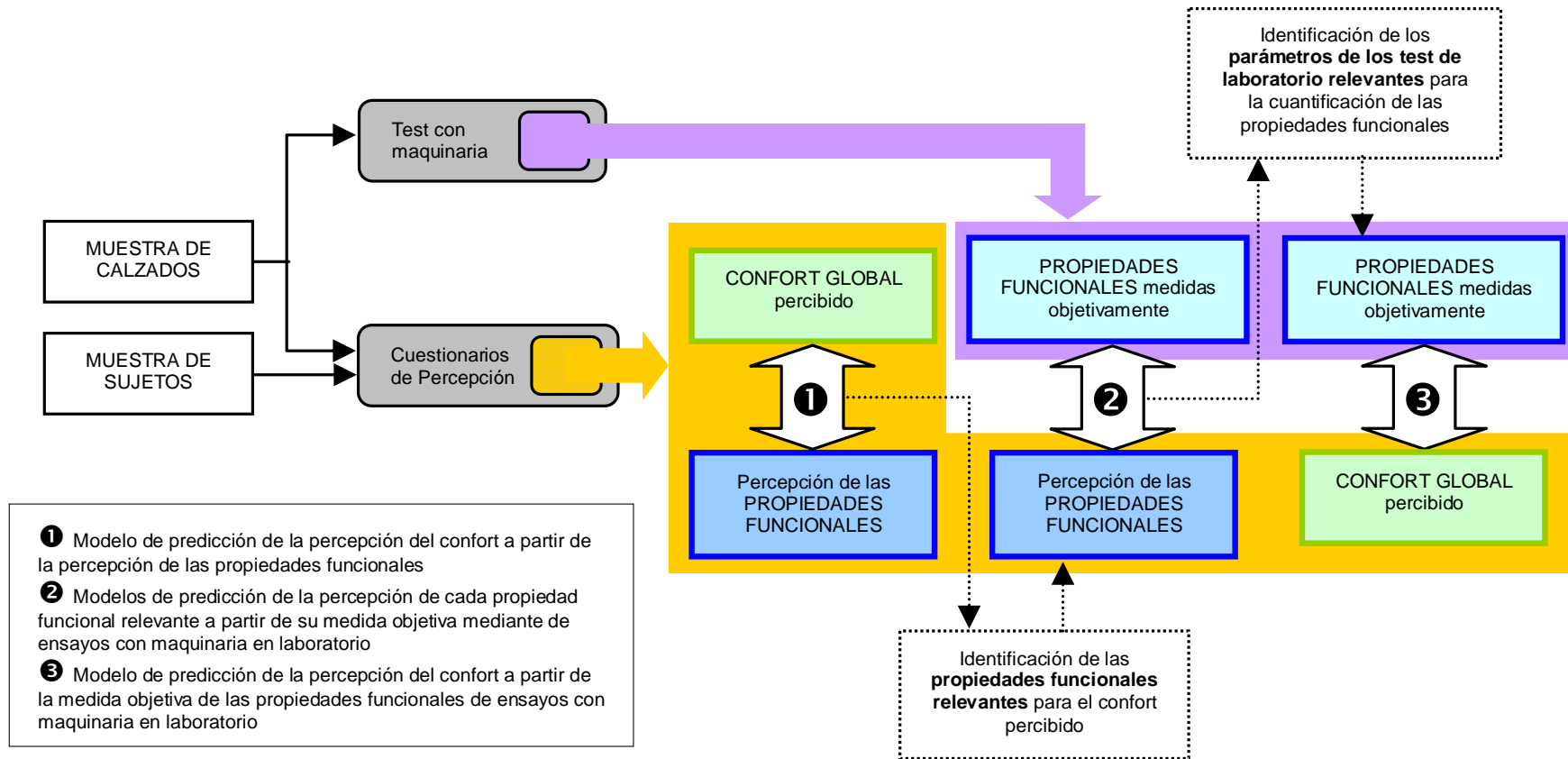


Figura 37. Esquema del proceso seguido para analizar la relación de cada propiedad funcional con el confort percibido

A continuación se describe más detalladamente los pasos seguidos en dicho proceso:

PASO 1. En primer lugar se identificaron las propiedades funcionales relevantes para el confort percibido. Para ello se extrajeron las relaciones entre la percepción de las propiedades funcionales y la percepción del confort asociados al uso del calzado (relación ❶ en la Figura 37).

PASO 2. A continuación, de los test de caracterización objetiva de las propiedades funcionales, se identificaron los parámetros relevantes para el confort. Para ello, para cada una de las propiedades funcionales identificadas como relevantes para el confort en el paso anterior, se establecieron las relaciones entre los parámetros objetivos extraídos de los test de laboratorio con maquinaria especializada y la percepción de los usuarios de dichas variables (relación ❷ en la Figura 37).

PASO 3. Finalmente, se obtuvo el modelo de predicción del confort percibido estableciendo la relación entre los parámetros relevantes (identificados en el paso 2) de las propiedades funcionales relevantes (identificados en el paso 3) para el confort percibido (relación ❸ en la Figura 37).

7.3. DEFINICIÓN DE LA MUESTRA DE SUJETOS

Se escogieron 25 hombres adultos de entre 20 a 60 años de la talla 42 (Figura 38). De entre la muestra de 25 sujetos, 20 sujetos fueron destinados para la obtención del modelo de confort y 5 para su validación.

La selección fue realizada de manera aleatoria de la base de datos de sujetos de ensayo del IBV.

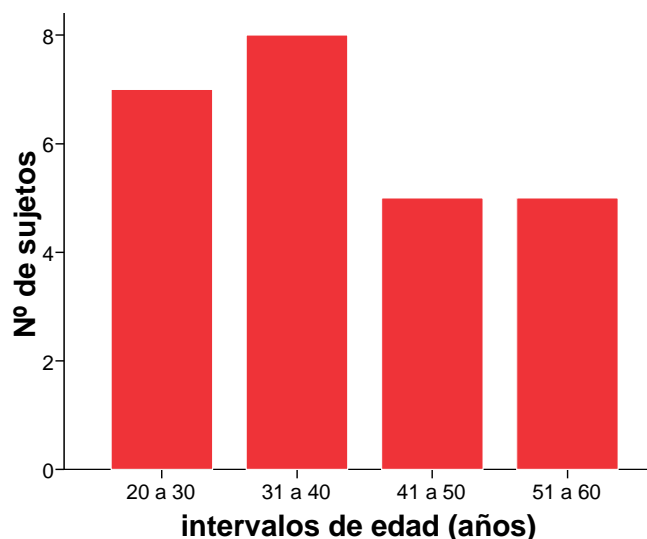


Figura 38. Histograma de la muestra de sujetos seleccionada para el modelo de confort

7.3.1. DEFINICIÓN DE LA MUESTRA DE CALZADO

Con el objetivo de facilitar la selección de la muestra de calzado, se llevó a cabo, en primer lugar, un análisis descriptivo de la muestra de calzados deseada para obtener los requisitos necesarios para su elección. Estos requisitos fueron:

- Calzado de calle de la talla 42 para hombre adulto.
- Solo se aceptó calzado cerrado, dejando de lado el calzado abierto (sandalias y similares) pues sus características pueden tener una influencia marcada en aspectos como el ajuste.
- Sólo se aceptó calzado con tacón de menos de 2 cm, pues el uso de tacones más altos influye en el patrón de marcha lo que puede afectar a la influencia que las distintas propiedades funcionales tienen sobre el confort global.
- No se aceptó la tipología de calzado deportivo, pues introduce un sesgo en las propiedades como la absorción de impactos o el confort térmico. Por otra parte, calzados con aspecto deportivo, comúnmente denominados “sport” en el sector del calzado de calle, fueron considerados como válidos siempre que no fueran útiles para la práctica deportiva y su denominación se debiera a una causa estética o respondiera a causas relacionadas con la moda.

Siguiendo estos requisitos se escogió una muestra de 25 modelos distintos de calzado de calle y sus respectivas hormas (ANEXO). De entre los 25 modelos de calzado, 20 fueron utilizados en la obtención del modelo de confort y 5 en la validación.

7.3.2. MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA LA OBTENCIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN

El procesado estadístico seguido para la elaboración de los modelos matemáticos se llevó a cabo mediante la aplicación SPSS 15.0 para Windows. Se siguieron las siguientes pautas generales dependiendo de las características de las variables involucradas en cada modelo:

- Cuando un modelo presentaba diversas variables explicativas, se ajustó un modelo lineal con todas ellas. A continuación, si al ajustar un modelo con varias variables explicativas no todas ellas resultaran significativas, se volvió a repetir el cálculo eliminando dichas variables no significativas, y así sucesivamente hasta alcanzar un modelo donde todas las variables fueran significativas.
- Cuando un modelo presentaba una sola variable explicativa la elección del tipo de modelo a ajustar dependió de la naturaleza de la variable explicada y del nivel de ajuste conseguido (R^2). Los tipos de modelos considerados fueron (Tabla 17):

Lineal	Cuadrático	Logarítmico	Potencia
$y = a + b \cdot x$	$y = a + b \cdot x + c \cdot x^2$	$y = a + b \cdot \ln(x)$	$y = a \cdot x^b$

Tabla 17. Tipos de modelos matemáticos considerados.

- Se fijó un valor de Potencia de test de 0,8.

7.3.3. METODOLOGÍAS DE EXPERIMENTACIÓN

Para el análisis de las propiedades funcionales y el confort percibido la experimentación fue llevada a cabo para obtener la siguiente información:

- Valoraciones subjetivas del confort percibido y las propiedades funcionales del calzado.
- Valoraciones objetivas de las propiedades funcionales del calzado.

A continuación se describen las metodologías de experimentación utilizadas en ambos tipos de ensayos.

7.3.4. VALORACIÓN SUBJETIVA DEL CONFORT Y LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DEL CALZADO

Las valoraciones subjetivas de percepción del confort y percepción de las propiedades funcionales se recogieron mediante cuestionarios en los que se pregunta acerca de la percepción de numerosos aspectos asociados a cada propiedad funcional (Tabla 20).

Específicamente, se siguió el siguiente protocolo:

1. Antes de calzarse el zapato, se responde a una serie de preguntas de carácter general. Este punto responde a la necesidad de establecer una línea de referencia acerca de la percepción del sujeto.
2. A continuación se le pide al usuario que se calce el zapato y se tome su tiempo para decidir su opinión acerca del mismo.
3. Tras unos 5-10 minutos (el intervalo depende del usuario) se desarrolla la segunda tanda de preguntas. Las preguntas repasan la percepción del usuario acerca de cada propiedad funcional, así como la percepción global de confort. Además, se plantean preguntas abiertas para que el usuario exprese su opinión libremente.

En la Tabla 20 se muestran, para cada propiedad funcional, las preguntas usadas en los cuestionarios para recoger la percepción subjetiva del usuario (como referencia se incluye una tercera columna que contiene las variables extraídas mediante test de laboratorio).

En cuanto a la percepción del confort, la pregunta incluida en los cuestionarios para recogerla se muestra a continuación (Tabla 18):

Confort GLOBAL percibido	¿Que le parece el calzado que se ha probado? 1 <input type="checkbox"/> Muy cómodo 2 <input type="checkbox"/> Cómodo 3 <input type="checkbox"/> Ni cómodo, ni incómodo 4 <input type="checkbox"/> Incómodo 5 <input type="checkbox"/> Muy incómodo
--------------------------	---

Tabla 18. Pregunta usada para recoger la percepción subjetiva del usuario de del confort global percibido con el uso del calzado

7.3.5. VALORACIONES OBJETIVAS DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DEL CALZADO

Las valoraciones objetivas de las propiedades del calzado se cuantificaron mediante ensayos con maquinaria a partir de los test de laboratorio definidos y puestos a punto en la fase 2.

Para la definición de los métodos de ensayo para la evaluación en laboratorio de las propiedades funcionales relevantes para el confort se siguió una metodología basada en el procesado de conocimiento experto existente en el estado del arte.

Se identificaron y caracterizaron las metodologías existentes en laboratorio para el análisis de las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado, incluyendo las variables de control y medida. Se contó con la ayuda de centros europeos especializados en el sector del calzado y con experiencia en ensayos de cuantificación de las propiedades funcionales. Las relaciones del IBV con centros extranjeros permitieron contactar tres centros europeos (Tabla 19), colaboradores del IBV en diversos proyectos de investigación, todos ellos con una larga trayectoria en la investigación aplicada al estudio del calzado.

CENTRO	PAIS	LOGO
IBV	España	
TNO	Holanda	
CTC	Francia	
ELKEDE	Grecia	

Tabla 19. Centros tecnológicos de investigación que cooperaron en la definición de los test de laboratorio para la cuantificación de las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado

Los centros se escogieron de distintos países para cubrir todo el conocimiento en el análisis de de los aspectos funcionales y confort en la interacción pie-calzado.

Tras contactar con los centros, se pusieron en común los distintos tipos de test de cada centro para el análisis de las propiedades funcionales del calzado. Los distintos tipos de test encontrados cubren todo el rango de test mencionados en el estado del arte de esta tesis.

Se identificaron para cada propiedad funcional y cada test, los siguientes parámetros:

- Las variables de control, caracterizando el tipo de usuario y calzado, así como las características del entorno y la actividad desarrollada.
- El protocolo de ensayo
- Las variables de medida, representando la cuantificación de la propiedad funcional.

Este análisis permitió analizar las diferencias y semejanzas entre los test, y evaluar las ventajas y desventajas de cada opción.

PROPIEDAD FUNCIONAL	VALORACIONES SUBJETIVAS Preguntas cuestionario	VALORACIONES OBJETIVAS Parámetros de control
Flexibilidad	¿Qué opina sobre la FLEXIBILIDAD del calzado? 1 <input type="checkbox"/> Muy rígido 2 <input type="checkbox"/> Algo rígido 3 <input type="checkbox"/> Ni flexible ni rígido 4 <input type="checkbox"/> Algo flexible 5 <input type="checkbox"/> Muy flexible	
Absorción de impactos	¿Qué opina sobre la capacidad de ABSORCIÓN DE IMPACTOS del calzado? 1 <input type="checkbox"/> Muy baja 2 <input type="checkbox"/> Baja 3 <input type="checkbox"/> Ni baja ni alta 4 <input type="checkbox"/> Alta 5 <input type="checkbox"/> Muy alta	<ul style="list-style-type: none"> • Rigidez (N/mm) • Ratio de energía absorbida (%)
Distribución de presiones altas	¿Qué opina sobre el MATERIAL de la suela del tacón? 1 <input type="checkbox"/> Demasiado blando 2 <input type="checkbox"/> Algo blando 3 <input type="checkbox"/> Ni blando ni duro 4 <input type="checkbox"/> Algo duro 5 <input type="checkbox"/> Demasiado duro	<ul style="list-style-type: none"> • Deformación máxima (mm) • Ratio de energía absorbida (%)
Distribución de presiones bajas	¿Qué opina sobre el MATERIAL de la suela delantera? 1 <input type="checkbox"/> Demasiado blando 2 <input type="checkbox"/> Algo blando 3 <input type="checkbox"/> Ni blando ni duro 4 <input type="checkbox"/> Algo duro 5 <input type="checkbox"/> Demasiado duro	<ul style="list-style-type: none"> • Deformación máxima (mm) • Ratio de energía absorbida (%)
Confort térmico	¿Cómo tiene los pies en cuanto a temperatura? 1 <input type="checkbox"/> Demasiado fríos 2 <input type="checkbox"/> Algo fríos 3 <input type="checkbox"/> Ni fríos ni calientes 4 <input type="checkbox"/> Algo calientes 5 <input type="checkbox"/> Demasiado calientes	
Fricción	¿Qué opina sobre el AGARRE del zapato? Se agarra ... 1 <input type="checkbox"/> Demasiado poco 2 <input type="checkbox"/> Poco 3 <input type="checkbox"/> Ni poco, ni mucho 4 <input type="checkbox"/> Mucho	

	5 <input type="checkbox"/> Demasiado	
Ajuste en Longitud	<p>¿Qué opina sobre el ajuste en LONGITUD de este calzado?</p> <p>1 <input type="checkbox"/> Estrecho 2 <input type="checkbox"/> Ni estrecho ni ancho 3 <input type="checkbox"/> Ancho</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ratio (medida horma) / (medida pie)
Ajuste en los dedos	<p>¿Qué opina sobre el ajuste en los DEDOS general de este calzado?</p> <p>1 <input type="checkbox"/> Corto 2 <input type="checkbox"/> Ni corto ni largo 3 <input type="checkbox"/> Largo</p>	
Ajuste en los metas	<p>¿Qué opina sobre el ajuste en la LÍNEA DE FLEXIÓN de este calzado?</p> <p>1 <input type="checkbox"/> Estrecho 2 <input type="checkbox"/> Ni estrecho ni ancho 3 <input type="checkbox"/> Ancho</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ratio (medida horma) / (medida pie)
Ajuste en el empeine	<p>¿Qué opina sobre el ajuste en el EMPEINE de este calzado?</p> <p>1 <input type="checkbox"/> Estrecho 2 <input type="checkbox"/> Ni estrecho ni ancho 3 <input type="checkbox"/> Ancho</p>	
Ajuste en el talón	<p>¿Qué opina sobre el ajuste en la ZONA TRASERA de este calzado?</p> <p>1 <input type="checkbox"/> Estrecho 2 <input type="checkbox"/> Ni estrecho ni ancho 3 <input type="checkbox"/> Ancho</p>	
Ajuste global	<p>¿Que le parece el ajuste global del calzado que se ha probado?</p> <p>1 <input type="checkbox"/> Muy cómodo 2 <input type="checkbox"/> Cómodo 3 <input type="checkbox"/> Ni cómodo, ni incómodo 4 <input type="checkbox"/> Incómodo 5 <input type="checkbox"/> Muy incómodo</p>	

Tabla 20. Medidas objetivas de cada test funcional y las preguntas usadas para recoger la percepción subjetiva del usuario de dichas propiedades funcionales del calzado

Finalmente se pusieron a punto los test para la caracterización de las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado relevantes para el confort (ver apartado 8.1.1: Tabla 21). A continuación (Tabla 21) se describen brevemente los protocolos de cada uno de los test llevados a cabo:

TEST	MAQUINARIA	VARIABLES DE CONTROL (PARA HOMBRE ADULTO)	VARIABLES DE MEDIDA
Distribución de altas presiones	INSTRON 8501	Carga aplicada en la zona del talón Nº ciclos = 5 Tiempo de aplicación de la carga= 1300 ms Duración de la presión aplicada = 400 ms Presión máxima = 400kPa	Deformación máxima (m) Ratio de Energía Absorbida (%)
Distribución de bajas presiones	INSTRON 8501	Carga aplicada en la planta del pie excepto la zona del talón, bajo la cabeza del 1er metatarso o el 1er dedo. Nº ciclos = 5 Tiempo de aplicación de la carga= 1300 ms Duración de la presión aplicada = 400 ms Presión máxima = 200kPa	Deformación máxima (m) Ratio de Energía Absorbida (%)
Absorción de impactos	Máquina específica desarrollada en el IBV para los "drop test"	Carga aplicada en la zona del talón Nº ciclos = 5 Tiempo de aplicación de la carga= 1300 ms Duración de la fuerza aplicada = 36 ms Fuerza máxima = 500 N	Rigidez dinámica (N/m) Ratio de Energía Absorbida (%)

Tabla 21. Descripción de los test llevados a cabo para la cuantificación objetiva de las propiedades funcionales

7.3.6. VALIDACIÓN DEL MODELO DE CONFORT

Tras la obtención del modelo de confort se procedió a la validación del mismo. Para ello se siguieron los siguientes pasos:

1. Se escogió una muestra de 5 calzados de calle con las características definidas
2. Se llevaron a cabo los ensayos de confort con usuarios siguiendo el protocolo establecido.
3. Se desarrollaron ensayos con maquinaria para la caracterización de las propiedades funcionales que habían sido identificadas como relevantes para el confort, y se extrajeron los parámetros relevantes.
4. Se obtuvo una predicción del confort a partir del modelo de confort desarrollado, y se comparó con la medida obtenida a partir de los ensayos con usuarios.

7.4. DESARROLLO DE LOS MODELOS DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES RELEVANTES PARA EL CONFORT (FASE 3)

En este punto se describe el desarrollo de los modelos matemáticos de las interacciones usuario-calzado en las propiedades funcionales identificados como relevantes para el confort en la FASE 2. Específicamente, los modelos de confort obtenidos mostraron que, en el caso de calzado de calle para hombre adulto de talla 42, las propiedades funcionales relevantes para el confort percibido por los usuarios fueron (apartado 8.1.1):

- la absorción de impactos
- la distribución de altas presiones
- la distribución de bajas presiones
- el ajuste

Por tanto a continuación se detallan los procesos de desarrollo de los modelos matemáticos para estas propiedades funcionales.

7.4.1. ABSORCIÓN DE IMPACTOS Y DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES

En este punto se describe el material y métodos para el desarrollo y validación de los modelos de los test de absorción de impactos, de distribución de altas presiones, y de distribución de bajas presiones.

Estos tres modelos se desarrollaron y validaron en paralelo pues se basan en los mismos principios biomecánicos: la aplicación de cargas de distintas magnitudes y velocidades, y en distintas zonas sobre el conjunto suela+palmilla+plantilla del calzado. Esto hace que las variables de control de los test sean similares, y por extensión que las técnicas de modelado a aplicar sean la misma.

La información sobre el desarrollo de los tres modelos se ha estructurado en los siguientes puntos:

1. Modelización de los materiales de los componentes del calzado
2. Modelización de la geometría de los componentes del calzado
3. Modelización del comportamiento conjunto de los componentes del calzado
4. Modelización de la interacción usuario-calzado
5. Implementación de los algoritmos
6. Validación de los módulos

7.4.1.1. Modelización de los materiales de los componentes del calzado


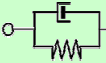
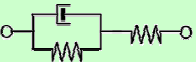
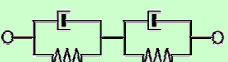
Tanto la capacidad de absorción de impactos como la capacidad de distribuir correctamente las presiones vienen ambas determinadas por la composición de materiales de la suela (p.ej. Pratt et al., 1990 para absorción de impactos; Perry, 1992 para distribución de presiones) y por su geometría (p.ej. Jorgesen & Bojsen-Moeller, 1989^a, para absorción de impactos; Bataller et al., 2001, para distribución de presiones).

Las propiedades mecánicas de cada una de las capas de la suela vienen determinadas en gran medida por los materiales de los distintos componentes de la suela. Aunque la aproximación más sencilla es basar el comportamiento de los materiales en la ley de Hook de linealidad elástica, muchos de los materiales utilizados actualmente tienen un

comportamiento elástico no lineal (Whittle, 1997; Rome, 1990). En principio, el modelo que mejor se ajuste a un material dependerá de las propiedades del material, por lo que es prácticamente imposible saber a priori, sólo a partir de la composición química, cuál es el modelo que mejor se le ajusta a un comportamiento complejo. Por tanto, es lógico abordar la modelización de los materiales de cada una de las capas de la suela desde una perspectiva amplia considerando todo tipo de comportamientos. Bajo estas condiciones, y considerando el amplio rango de comportamientos existentes, se abordó la problemática de seleccionar el modelo más adecuado implementando un algoritmo de optimización en el software que lleve a cabo, para cada material, el ajuste de una lista de posibles modelos escogiendo el que mejor se adapta a su comportamiento (el modelo que mayor varianza explique, es decir el de mayor R^2). La selección de la lista de modelos candidatos para los materiales se llevó a cabo desde un punto de vista amplio, considerando comportamientos elásticos y viscoelásticos, que permitiera ajustar sus parámetros al comportamiento mecánico de los materiales utilizados para los calzados. Dicha selección vino determinada por la bibliografía (Flügge. W, 1967; Scott & Winter, 1993).

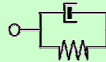
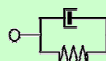
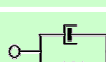
Por otra parte, y debido al bajo espesor de los materiales, los modelos considerados son **unidimensionales**, es decir, sólo se modeló el comportamiento (deformación y tensión) a lo largo de la dirección de aplicación de la carga.

Los modelos que se escogieron para modelar el comportamiento mecánico de los materiales fueron los siguientes (Tabla 22; Tabla 23):

CÓDIGO	MODELO	ESQUEMA	ECUACIÓN
1	Elástico *		$s = j * e$
2	Sólido de Kelvin *		$s = j * e + k * e'$
3	Sólido de 3 parámetros *		$s = j * e + k * e' - l * s'$
4	Sólido de 4 parámetros *		$s = j * e + k * e' + l * e'' - m * s'$

(*) Flügge. W, 1967. Viscoelasticity, pg 16-17. Blaisdell Publishing Company.

Tabla 22. Modelos viscoelásticos lineales.

CÓDIGO	MODELO	ESQUEMA	ECUACIÓN
5	Tejido blando del talón *		$s = j * e^k + l * e^m * e' ^n$
6	Muelle no lineal con amortiguador no lineal v1 **		$s = j * e^k + l * e' ^n$
7	Muelle no lineal con amortiguador no lineal v2 **		$s = j * e^k + l * e^m * e'^n$
8	Muelle no lineal con amortiguador no lineal v3 **		$s = j * e^k + l * e * e'$

9	Muelle no lineal con amortiguador no lineal v4 **		$s = j * e^k + l * e^m * e' $
10	Muelle no lineal con amortiguador no lineal v5 **		$s = j * e^k + l * e * e' ^n$
11	Elástico no lineal		$s = j * e^k$
12	Elástico no lineal en paralelo con barra fija		$s = j * e^k + l$
13	Muelle no lineal con amortiguador no lineal v8 **		$s = j * e^k + l * e * e' $
14	Muelles no lineales en paralelo		$s = j * e^k + l * e^m$

(*) Stephen H. Scott, Winter. D. A. Biomechanical model of the human foot: kinematics and kinetics during the stance phase of walking; (**) Casos particulares del modelo de Scott y Winter (1993)

Tabla 23. Modelos no-lineales.

Por otra parte, todos estos modelos pueden escribirse como uno solo, variando los coeficientes de una fórmula general que se muestra a continuación:

$$s = a + b * e^c + d * e^e * e'^f * |e'|^g - h * s'$$

Rescribiendo lo modelos propuestos con la nueva nomenclatura se obtiene (Tabla 24):

Códigos	Modelos	PARAMETROS							
		a	b	c	d	e	f	g	h
1	Elastico	0	b	1	0	0	0	0	0
2	Sólido de Kelvin	0	b	1	d	0	1	0	0
3	Solido de 3 parámetros	0	b	1	d	0	1	0	h
4	Solido de 4 parámetros	0	b	0	d	0	1	0	h
5	Tejido blando del talón	0	b	c	d	e	0	g	0
6	Muelle no lineal con amortiguador no lineal v1	0	b	c	d	0	0	g	0
7	Muelle no lineal con amortiguador no lineal v2	0	b	c	d	e	f	0	0
8	Muelle no lineal con amortiguador no lineal v3	0	b	c	d	1	1	0	0
9	Muelle no lineal con amortiguador no lineal v4	0	b	c	d	e	0	1	0
10	Muelle no lineal con amortiguador no lineal v5	0	b	c	d	0	0	g	0
11	Elástico no lineal	0	b	c	0	0	0	0	0
12	Elástico no lineal en paralelo con barra fija	a	b	c	0	0	0	0	0

13	Muelle no lineal con amortiguador no lineal v8	0	b	c	d	1	0	1	0
14	Muelles no lineales en paralelo	0	b	c	d	e	0	0	0

Tabla 24. Coeficientes para el modelo general

Esta nomenclatura facilitó la implementación en la aplicación informática del módulo de modelado y análisis de los test de absorción de impactos y de distribución de altas y bajas presiones.

7.4.1.2. Modelización de la geometría de los componentes del calzado

Tanto la geometría de la suela como de la plantilla tienen influencia en las presiones de impactos. Se identifican tres tipos de geometrías:

- La geometría interna de cada una de las capas que componen el calzado.
- La geometría superficial, referida principalmente a la plantilla.
- El espesor de cada una de las capas de material de la suela.

La **geometría interna** está principalmente contenida en la “suela” propiamente dicha, y tiene como objetivo ahorrar material, por lo que los fabricantes de calzado los denominan “ahorros” (Figura 40). Puede ser de muy diversas formas y depende principalmente del tipo de fabricación de la suela. Así mismo, la influencia que puede tener dichas geometrías en el comportamiento de la suela frente a absorción de impactos y distribución de presiones depende tanto de la geometría propiamente dicha como del material. Considerando el estado actual de la técnica, el análisis de la influencia de los ahorros debe abordarse mediante la aplicación de la metodología de análisis de elementos finitos. Esto, hoy por hoy queda fuera de las posibilidades de una aplicación informática práctica para ser usada por personal no especializado en elementos finitos (los diseñadores de calzado), por lo que se decidió no considerar el efecto de los ahorros considerando la suela como una plancha plana de material.

La geometría superficial de la plantilla también puede ejercer una influencia en la capacidad de absorber impactos y distribuir presiones (p.ej. Bataller et al. 2001). También puede tener influencia la morfología exterior de la suela, sin embargo hay que considerar que el calzado de calle se utiliza sobre superficies llanas y duras en su mayoría (p.ej. terrazo, pavimento cerámico, pavimento sintético, hormigón, etc.). Esto conlleva que para el calzado de calle la morfología de tacos no sea tan exagerada como para otros tipos de calzado (p.ej. calzado de montaña) debido a que las necesidades de fricción son mucho más reducidas.

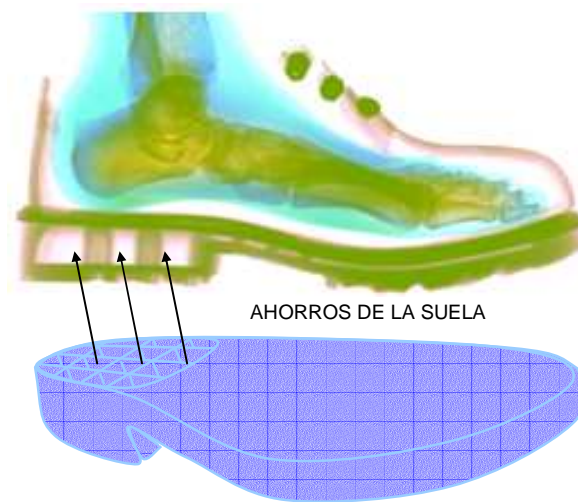


Figura 39. Ejemplo de ahorros de la suela. Los ahorros de la suela son huecos implementados en la zona del talón principalmente con el objetivo de ahorrar material de suela. Existen infinitas posibilidades en cuanto a las geometrías de los huecos dependiendo del fabricante.

También puede tener influencia la morfología exterior de la suela, sin embargo hay que considerar que el calzado de calle se utiliza sobre superficies llanas y duras en su mayoría (p.ej. terrazo, pavimento cerámico, pavimento sintético, hormigón, etc.). Esto conlleva que para el calzado de calle la morfología de tacos no sea tan exagerada como para otros tipos de calzado (p.ej. calzado de montaña) debido a que las necesidades de fricción son mucho más reducidas.

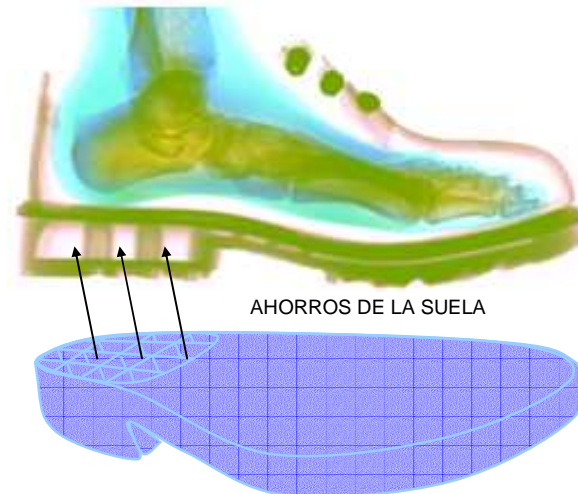


Figura 40. Ejemplo de ahorros de la suela. Los ahorros de la suela son huecos implementados en la zona del talón principalmente con el objetivo de ahorrar material de suela. Existen infinitas posibilidades en cuanto a las geometrías de los huecos dependiendo del fabricante.

En cuanto al **espesor**, en general, un aumento del espesor del material puede mejorar la absorción de impactos y la distribución de presiones, siempre que se haga dentro de unos límites. Sin embargo, esto depende de la naturaleza del material y no se puede generalizar.

Considerando esto, para la modelización de la geometría del calzado en los test de absorción de impactos y distribución de presiones, se asumieron las siguientes simplificaciones:

- Se asume que la suela se compondrá de tres capas de material (Figura 41), correspondientes a la plantilla, la palmilla de montaje y la suela propiamente dicha, que son los tres componentes más habituales de la suela en el calzado de calle.

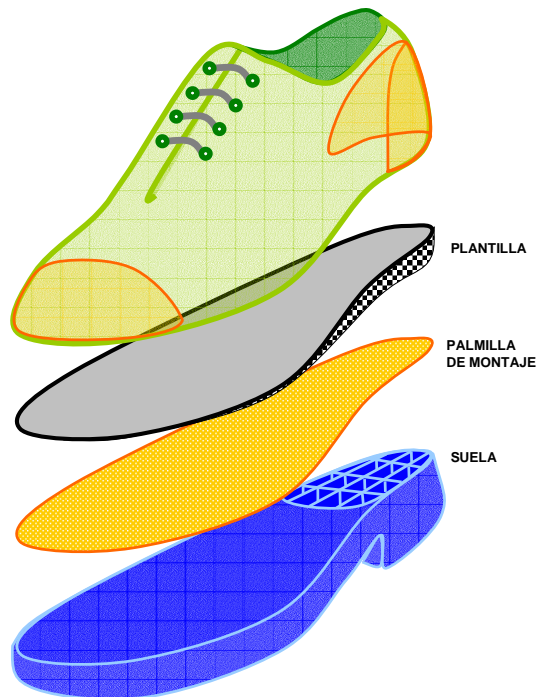


Figura 41. Capas de la suela de un calzado

- La geometría de los componentes de la suela no se consideró en la modelización, excepto por el espesor de las tres capas de material (Figura 42). Esto implica que los espesores son considerados como homogéneos en toda la superficie y que los ahorros de las suelas se desprecian, así como la geometría superficial de la plantilla. En los test con maquinaria existentes los ahorros de la suela son tratados como parte integrante del material de la suela, de forma que el comportamiento mecánico de la suela es el resultado tanto de la composición de los materiales como de los ahorros efectuados en sus capas. La misma aproximación se consideró con respecto a la geometría de la plantilla.

•

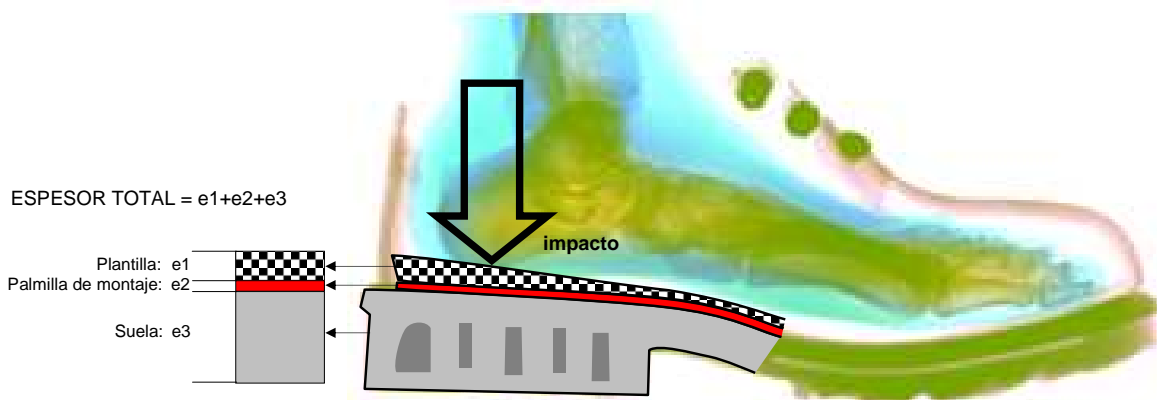


Figura 42. Simplificaciones geométricas llevadas a cabo para la modelización del conjunto suela (plantilla + palmilla de montaje + suela)

7.4.1.3. Modelización del comportamiento conjunto de los componentes

El modelo de comportamiento del calzado se basa en la unión del comportamiento de cada uno de los componentes, modelados tal y como se ha descrito en los dos puntos anteriores.

Dicha unión de comportamientos consiste en la suma las curvas de Fuerza-Deformación, de manera que se asume una transición ideal entre materiales. Además, considera la influencia del espesor del material, pues previamente a su adición al comportamiento conjunto, la curva de cada material va ponderada por su espesor, asumiendo de esta manera que la deformación de los materiales varían proporcionalmente a la variación del espesor.

7.4.1.4. Modelización de la interacción usuario-calzado

Para cada uno de las propiedades funcionales consideradas en este punto, la absorción de impactos, la distribución de altas presiones y la distribución de bajas presiones, se da una interacción calzado-usuario distinta, que exige por tanto una modelización distinta (Figura 43).

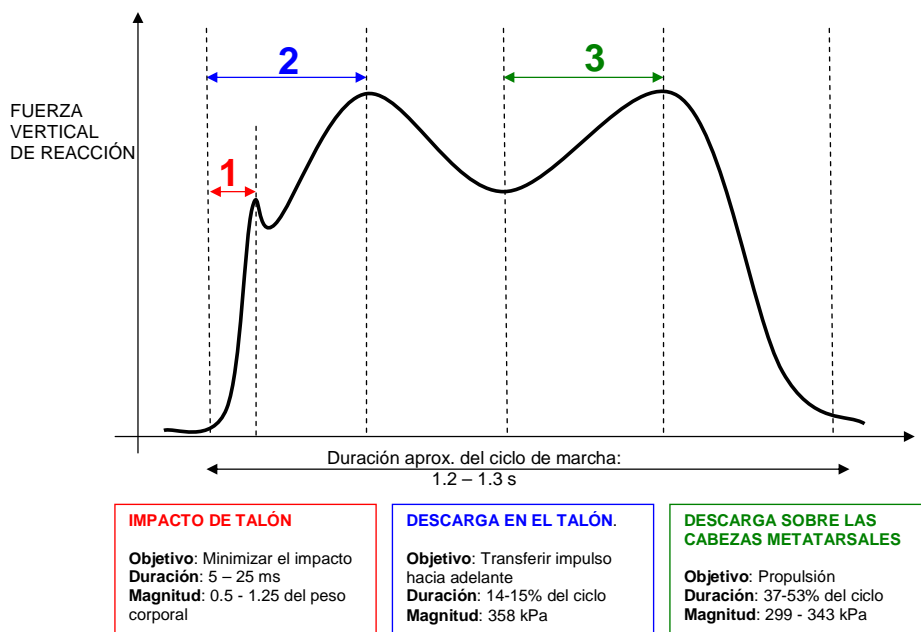


Figura 43. Fuerza de reacción vertical del suelo durante un ciclo de marcha

Mientras la **absorción de impactos** es importante en el primer momento de contacto del pie con el suelo, durante el impacto del talón, la **distribución de altas presiones** es importante tras el impacto durante la descarga sobre talón y en las cabezas metatarsales, y la **distribución de bajas presiones** en el resto de instantes del paso, cuando las presiones son más bajas, así como durante la bipedestación.

Estas distintas características de los distintas propiedades funcionales exigen un tratamiento diferente a la hora de ensayarlos. A continuación se describen dichos test además del procedimiento de modelización de los mismos.

7.4.1.5. Variables del test de Absorción de impactos

A continuación se describen las variables de control y las variables de medida del test de absorción de impactos.

VARIABLES DE CONTROL

Durante la marcha, el momento crítico para la absorción de impactos es el instante en el cual el talón contacta el suelo (Robbins and Gouw, 1990). Durante ese breve momento de contacto, que dura alrededor de 5-25ms (e.g. Shorten y Winslow, 1992), una fuerza de entre 0.5 y 1.25 veces el peso del cuerpo (Jefferson et al., 1990; Lewis et al., 1991) es descargada sobre la zona del talón de la planta del pie.

Atendiendo a esto, las variables de control que caracterizan el test de absorción de impactos son la fuerza y duración del impacto aplicado y el punto de aplicación de la carga.

- Fuerza y velocidad de aplicación de las cargas: el impacto del pie sobre el calzado es simulado mediante una máquina de impactos desarrollada en el propio IBV. En este test, básicamente, un émbolo cilíndrico de peso controlado se deja caer desde una altura controlada sobre la zona donde el talón del pie apoya sobre el calzado. Dependiendo del usuario que se esté simulando, el test aplica una fuerza de caída (controlada a partir del peso del émbolo). Esta fuerza, para hombre adulto es de 500N, durando el impacto 36ms, correspondiente a la fuerza que ejerce un hombre adulto de un peso de 80Kg aproximadamente. Estos parámetros corresponden a suponer para ambos casos que el impacto corresponde al 60% del peso del usuario del calzado (Tabla 25).

PARÁMETROS	HOMBRES	UNIDADES
Duración	1300	ms
Tiempo de aplicación de la carga	36	ms
Fuerza máxima	500	N

Tabla 25. Caracterización de las Fuerza aplicada durante el test de absorción de impactos

- Punto de aplicación de las cargas: las propiedades mecánicas de los materiales dependen del punto de aplicación de las cargas, pues la geometría de la suela no es homogénea. Por tanto, el lugar donde medir el espesor del material se convierte en un aspecto relevante a la hora de modelar la capacidad de absorción de impactos.

En el test de absorción de impactos se aplica la carga en el punto medio de la sección definida en el talón (Figura 44) a un 15% de la longitud del pie, contando desde el punto más trasero del talón. Esto, para una talla 42 de hombre adulto (tallaje francés), corresponde a 41.5mm desde el punto más trasero de apoyo del talón.

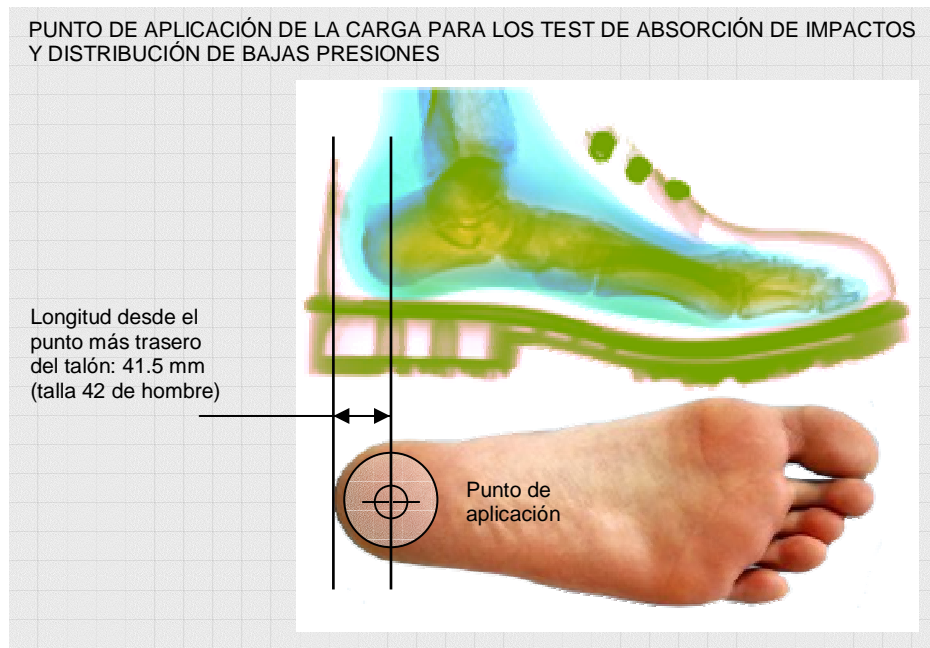
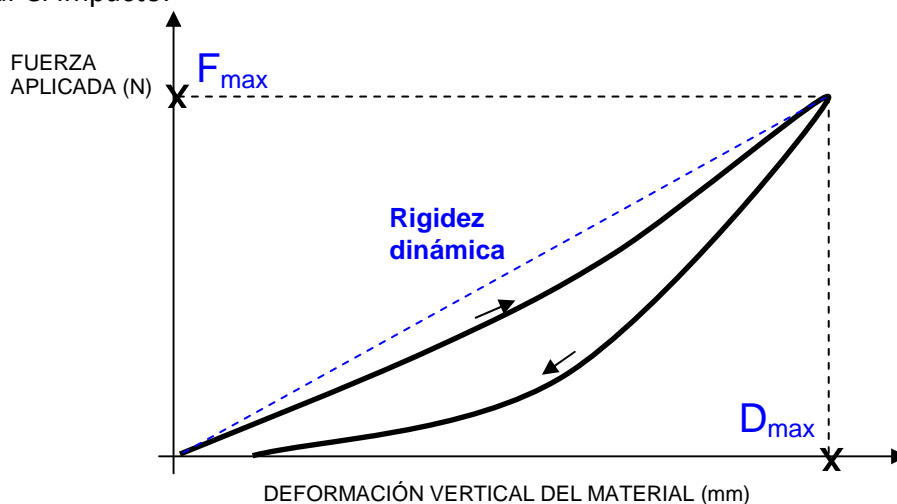


Figura 44. Punto de impacto medio en el calzado

VARIABLES DE MEDIDA

Las variables que caracterizan la capacidad de absorción de impactos del calzado son la rigidez dinámica y el ratio de disipación de la suela:

- **Rigidez dinámica:** Describe la fuerza necesaria para comprimir el material. En términos generales materiales con una baja rigidez dinámica son mejores para disipar el impacto.



$$K_d = F_{max} / D_{max}$$

Donde:

K_d = Rigidez dinámica

F_{max} = Fuerza máxima aplicada

D_{max} = Deformación máxima

Figura 45. Curva fuerza – deformación que se obtiene en los ensayos de absorción de impactos.

El cálculo de la rigidez dinámica viene determinado por el cociente entre la Fuerza máxima aplicada sobre el material y la Deformación vertical máxima que éste ha experimentado (Figura 45).

- **Ratio de Energía Absorbida:** Representa la capacidad del material de absorber la energía que se le aplica en el impacto. Un alto ratio de disipación representa una alta capacidad del material para reducir la energía que llega al pie, y por tanto es beneficioso para la absorción de impactos.

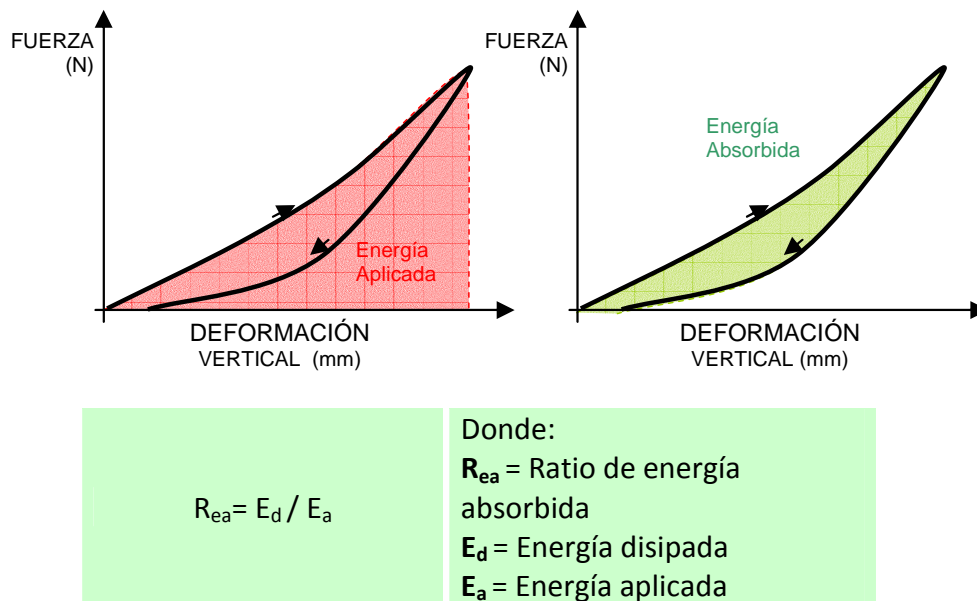


Figura 46. Energía aplicada y Energía absorbida

El cálculo del Ratio de energía disipada consiste en integrar el área que encierra la curva Fuerza – deformación (Figura 46).

7.4.1.6. Variables del test de distribución de altas presiones

A continuación se describen las variables de control y las variables de medida del test de distribución de altas presiones.

VARIABLES DE CONTROL

El patrón de distribución de presiones en la planta del pie a lo largo del ciclo de marcha tiene dos momentos críticos en los que dicha presión es alta. Uno es sobre el talón, cuando tras el primer impacto de talón, al 14-15% del ciclo de marcha (Clarke, 1980), el cuerpo continúa descargando su peso sobre el talón a medida que el apoyo avanza, alcanzándose valores de alrededor 400kPa (Rosenbaum et al., 1994), y otro sobre la cabeza de los metatarsos, al 77-79% del ciclo de marcha (Clarke, 1980), en el que el pie empuja sobre el suelo para adquirir la propulsión necesaria para hacer avanzar el cuerpo, alcanzándose valores de alrededor de 300-350kPa (Rosenbaum et al., 1994). La velocidad de aplicación de dichas presiones es lenta comparada con el impacto de talón, siendo de menos de 0.5ms.

Por tanto las variables de control que caracterizan el test de distribución de altas presiones son la magnitud y duración de la fuerza aplicada y el punto de aplicación.

- Fuerza y velocidad de aplicación de las cargas: El test de distribución de altas presiones es llevado a cabo en el IBV mediante una máquina de ensayos universal INSTRON 8501 (Figura 47). Básicamente el test evalúa la capacidad del calzado para distribuir las presiones de manera adecuada bajo el talón y la primera cabeza metatarsiana. La fuerza aplicada es de 400kPa durante 400ms (Tabla 26).

PARÁMETROS	ALTAS PRESIONES	UNIDADES
Duración	1300	ms
Tiempo de aplicación de la carga	400	ms
Presión máxima	400	kPa

Tabla 26. Caracterización de las Fuerza aplicada durante el test de distribución de altas presiones

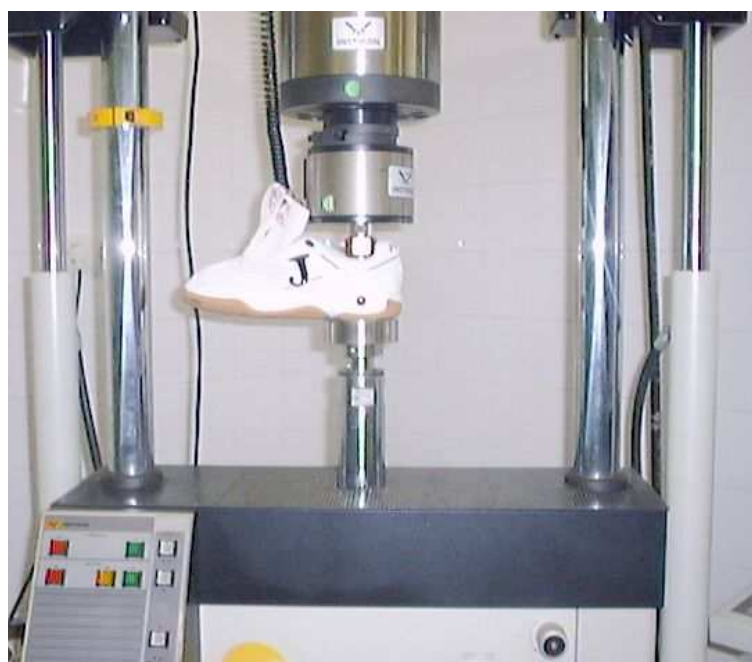


Figura 47. Máquina INSTRON 8501 utilizada para el ensayo de distribución de presiones.

- Punto de aplicación de las cargas: Al igual que en el caso del test de absorción de impactos, las propiedades mecánicas de los materiales dependen del punto de aplicación de las cargas, pues la geometría de la suela no es homogénea. Por tanto, el lugar donde se puede medir el espesor del material se convierte en un aspecto relevante.

Para el test de altas presiones, la medida se efectúa bajo el talón y la primera cabeza metatarsiana y, al igual que en el caso del test de absorción de impactos, el punto sobre el talón que para una talla 42 de hombre (tallaje francés) corresponde

a 42mm desde el punto más trasero del talón. El punto de aplicación sobre la cabeza del primer metatarsiano corresponde a 192mm (tallaje francés) desde el punto más trasero del talón para la talla 42 de hombre, lo cual corresponde a un 70% de la longitud total del pie (Figura 48).

En los ensayos efectuados en esta tesis, los test se aplicaron en la zona trasera de la suela, sobre el área del talón.

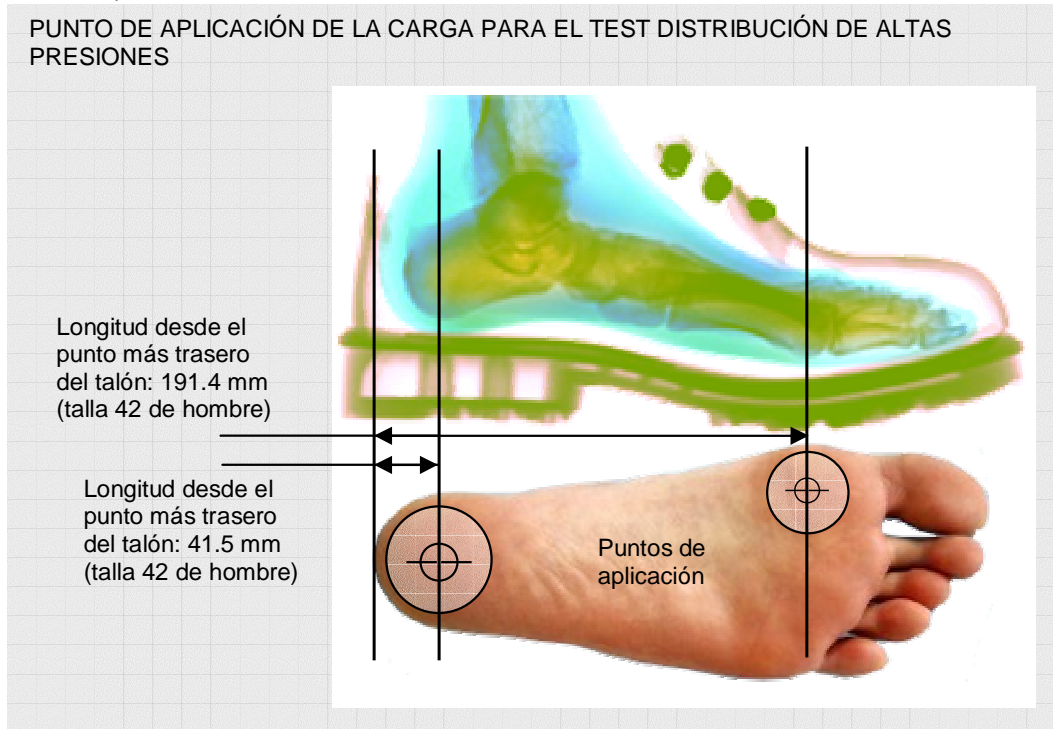


Figura 48. Punto de aplicación bajo la cabeza del primer metatarsiano para el test de distribución de altas presiones

VARIABLES DE MEDIDA

Las variables que caracterizan la capacidad de distribución de presiones del calzado son la máxima deformación y el ratio de absorción de energía de la suela:

- **Máxima deformación (D_{max}):** Corresponde al máximo nivel de compresión alcanzado por los materiales de la suela durante el test. Un material con alta capacidad de deformación recogerá mejor la forma de la planta del pie y distribuirá mejor la presión evitando puntos de altas presiones que puedan causar molestias.
- **Ratio de energía absorbida (E_{abs}):** Al igual que en caso del test de absorción de impactos, mide la capacidad de los materiales de la suela de absorber la energía que les llega, y por tanto reducir la que le llega al pie. En una correcta distribución de altas presiones, la energía debe ser devuelta al máximo para mejorar la propulsión.

7.4.1.7. Variables del test de distribución de bajas presiones

A continuación se describen las variables de control, las variables de medida del test de distribución de bajas presiones.

VARIABLES DE CONTROL

Durante el resto del ciclo de marcha, las presiones que aparecen sobre el resto de la planta del pie son mucho más bajas. Así, por ejemplo, en el medio-pie no superan los 100kPa (Rosenbaum et al., 1994). Además, en este caso la velocidad de aplicación no es un aspecto crítico. Por tanto, y al igual que en el caso de distribución de altas presiones, las variables de control que caracterizan el test de distribución de bajas presiones son la magnitud y duración de la fuerza aplicada, así como el punto de aplicación.

- Fuerza y velocidad de aplicación de las cargas: El test de distribución de bajas presiones es llevado a cabo mediante una máquina de ensayos universal INSTRON 8501. Básicamente el test evalúa la capacidad del calzado para distribuir las bajas presiones de manera adecuada bajo las zonas de la planta del pie que no corresponden ni al talón ni a la primera cabeza metatarsiana. En éste caso no existen diferencias por género en las variables de control del test. En el caso de bajas presiones la presión aplicada es de 200kPa durante 400ms (Tabla 27).

PARÁMETROS	BAJAS PRESIONES	UNIDADES
Duración	1300	ms
Tiempo de aplicación de la carga	400	ms
Fuerza máxima	200	kPa

Tabla 27. Caracterización de las Fuerza aplicada durante el test de distribución de bajas presiones

- Punto de aplicación de las cargas: De igual modo al resto de test, las propiedades mecánicas de los materiales dependen del punto de aplicación de las cargas, pues la geometría de la suela no es homogénea. Por tanto, al igual que en el test de distribución de altas presiones, el lugar donde medir el espesor del material es un aspecto relevante.

Para el test de distribución de bajas presiones las medidas se efectúan en cualquier punto de la suela que no sea ni el talón ni bajo la cabeza del primer metatarsiano, por ejemplo el punto intermedio de la huella plantar, considerándose espesores homogéneos de cada componente como en el caso de los otros test. En los ensayos efectuados en esta tesis, los test se aplicaron en la zona delantera de la suela, sobre el área del 3^{er} y 4^o meta (Figura 49).

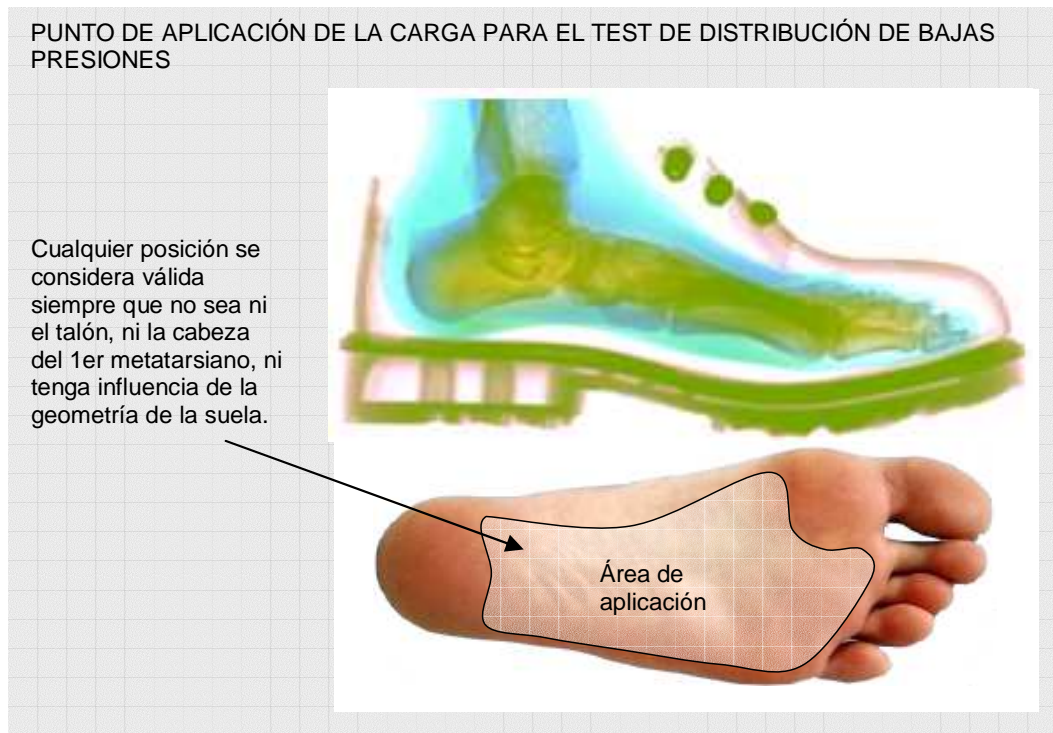


Figura 49. Punto de aplicación bajo la cabeza del primer metatarsiano para el test de distribución de bajas presiones

VARIABLES DE MEDIDA

Las variables que caracterizan la capacidad de distribución de presiones del calzado son máxima deformación por un lado y el ratio de absorción de energía de la suela por el otro:

- Máxima deformación (Dmax): Corresponde al máximo nivel de compresión alcanzado por los materiales de la suela durante el test. Al igual que en el caso del test de distribución a altas presiones, un material con alta capacidad de deformación recogerá mejor la forma de la planta del pie y distribuirá la presión más homogéneamente evitando puntos de altas presiones.
- Ratio de energía absorbida (Eabs): Al igual que en caso del test de absorción de impactos, mide la capacidad de los materiales de la suela de absorber la energía que les llega, y por tanto reducir la que le llega al pie. En una correcta distribución de bajas presiones, la energía recibida debe ser devuelta para facilitar la transferencia de energía desde el talón a los metas y no fatigar.

7.4.1.8. Implementación de los algoritmos

El siguiente diagrama (Figura 50) muestra el funcionamiento del algoritmo definido para los test de absorción de impactos, distribución de altas presiones y distribución de bajas presiones:

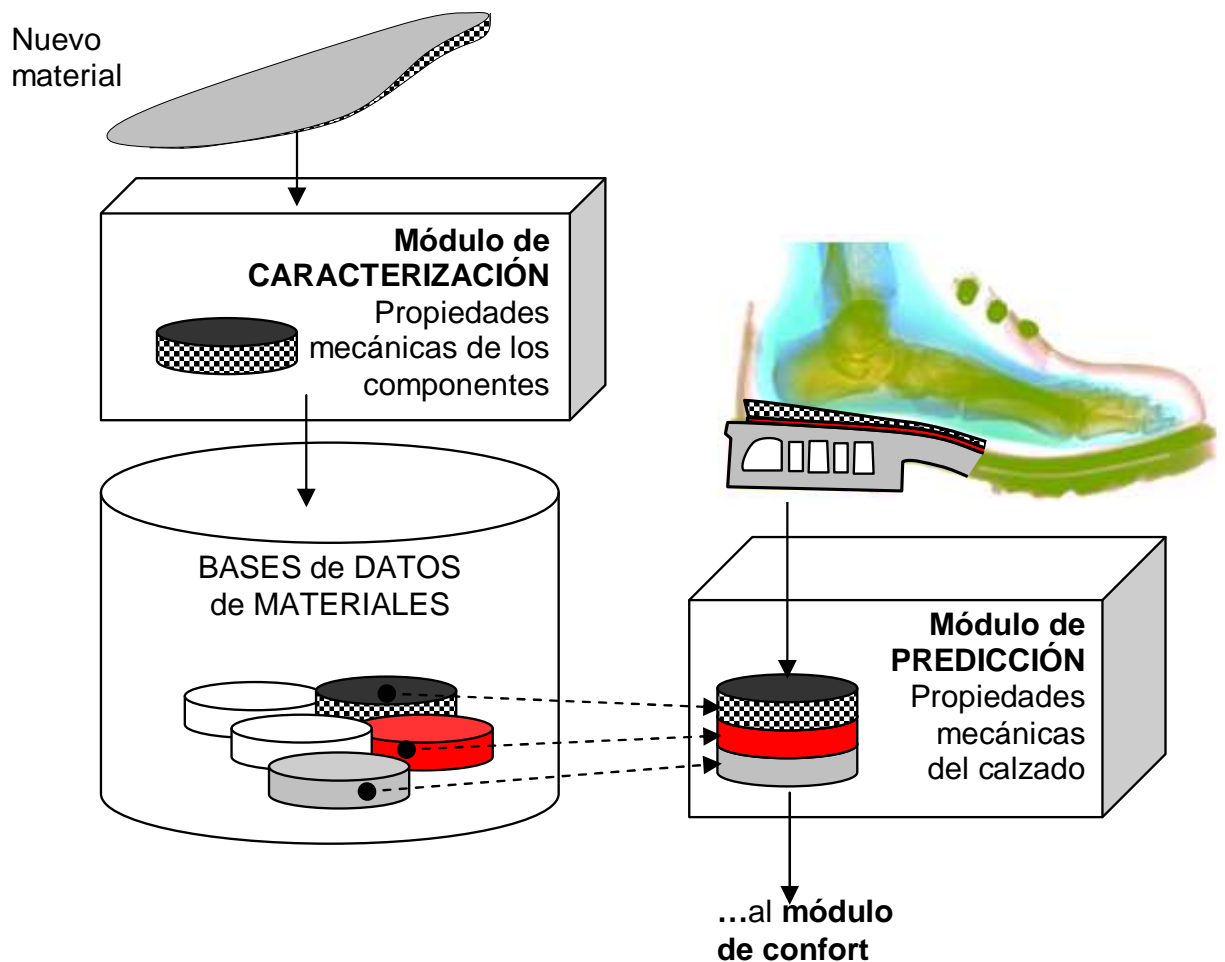


Figura 50. Funcionamiento global de las herramientas absorción de impactos, distribución de altas presiones y distribución de bajas presiones.

El algoritmo se divide en tres partes:

- El **módulo de caracterización**, cuyo objetivo es caracterizar el comportamiento mecánico de materiales.
- Una **base de datos** que contiene los resultados del módulo de caracterización mecánica, es decir, las propiedades mecánicas de los materiales.
- El **módulo de predicción**, cuyo objetivo es, a partir de la caracterización mecánica de los componentes del calzado, predecir el comportamiento global del mismo.

A continuación se detalla el funcionamiento de los dos módulos.

MÓDULO DE CARACTERIZACIÓN

El módulo de caracterización es el que se utiliza para ajustar el comportamiento mecánico de los materiales que componen el conjunto de la suela en el calzado. Para ello es necesario tener una muestra de dimensiones 10cm x 10cm del material del que está hecho el componente a caracterizar.

Una vez se tiene las muestras se siguen los siguientes pasos (Figura 51):

1º_ Se ensaya con maquinaria el nuevo material para obtener una curva de fuerza-deformación-tiempo. La maquinaria utilizada depende del test a desarrollar:

- la máquina de impactos desarrollada en el IBV específicamente para absorción de impactos (Figura 51).
- la máquina de ensayos universal INSTRON 8501 en el caso de distribución de altas o bajas presiones (Figura 51).

Los tiempos e intensidades de las fuerzas aplicadas vienen determinados por el perfil del usuario y la actividad que esté realizando (p.ej. hombre adulto caminando) y corresponden, según se ha descrito anteriormente, a los aplicados según el test.

2º_ Tras la realización de los ensayos, se ajustan los modelos de materiales definidos anteriormente a la curva Fuerza-Deformación resultado del ensayo y se escoge aquél que más ajusta su comportamiento por mínimos cuadrados. Para cada modelo de material, el algoritmo itera (el nº de iteraciones se ha fijado en 50) para optimizar el ajuste, y en cada iteración calcula el ajuste (la R^2) de cada modelo. Finalmente selecciona el modelo que ha generado la mayor R^2 .

3º_ Los coeficientes del modelo seleccionando (los valores de “a,b,c,d...” que configuran la ecuación general de modelos definida anteriormente) son almacenados en la base de datos de los materiales para permitir al módulo de predicción extraer el material y utilizarlo cuando sea necesario.

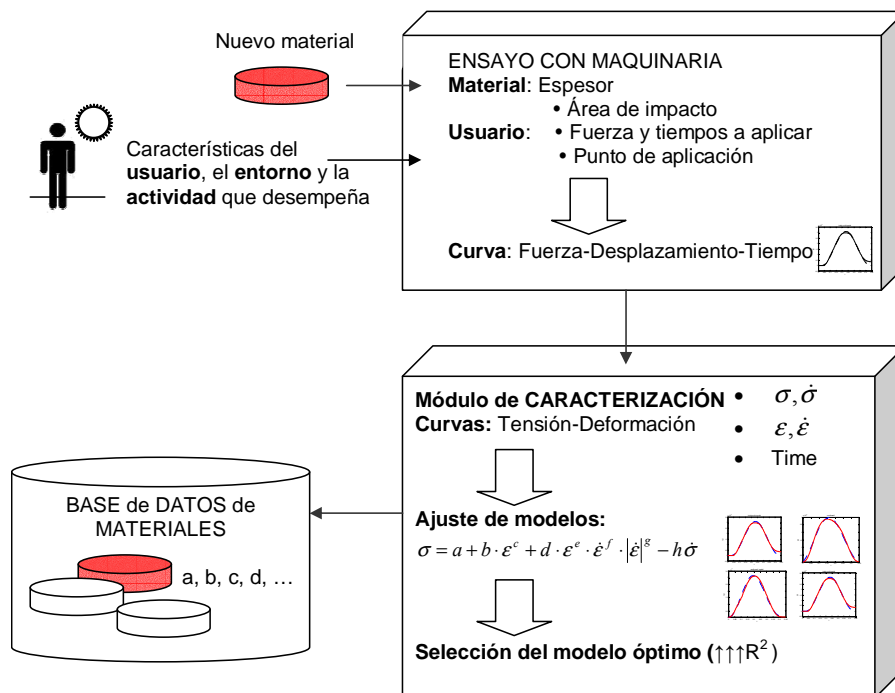


Figura 51. Funcionamiento detallado del Módulo de ajuste.

MÓDULO DE PREDICCIÓN

El **módulo de predicción** es el que se encarga de combinar el comportamiento mecánico de los distintos materiales (previamente modelados individualmente por el módulo de caracterización) y predecir cuál será el comportamiento global mecánico del conjunto. Como salida provee de las variables de medida del test correspondiente, que irán a parar al módulo de confort.

Para cuantificar el comportamiento mecánico de una combinación de materiales sigue los siguientes pasos (Figura 52):

1º_ Se provee de la lista de materiales que componen la suela y sus espesores ,así como del perfil del usuario y la actividad que éste realiza, para los cuales se desea predecir el comportamiento del calzado.

2º_ A continuación el sistema extrae de la base de datos los coeficientes de la ecuación diferencial que define cada uno de los materiales (y que previamente han debido ser almacenados por el módulo de caracterización) y reconstruye el modelo de cada material resolviendo la ecuación diferencial de cada material, lo que corresponde a reconstruir sus curvas Fuerza –deformación de cada componente.

4º_ Genera un modelo del comportamiento global del calzado, considerando los materiales de los componentes actuando conjuntamente. Para ello se suma linealmente el comportamiento de cada componente.

5º_ Calcula el comportamiento del material calculando las variables de medida del test correspondiente y envía estas variables al módulo de confort para que éste calcule la percepción de confort del usuario.

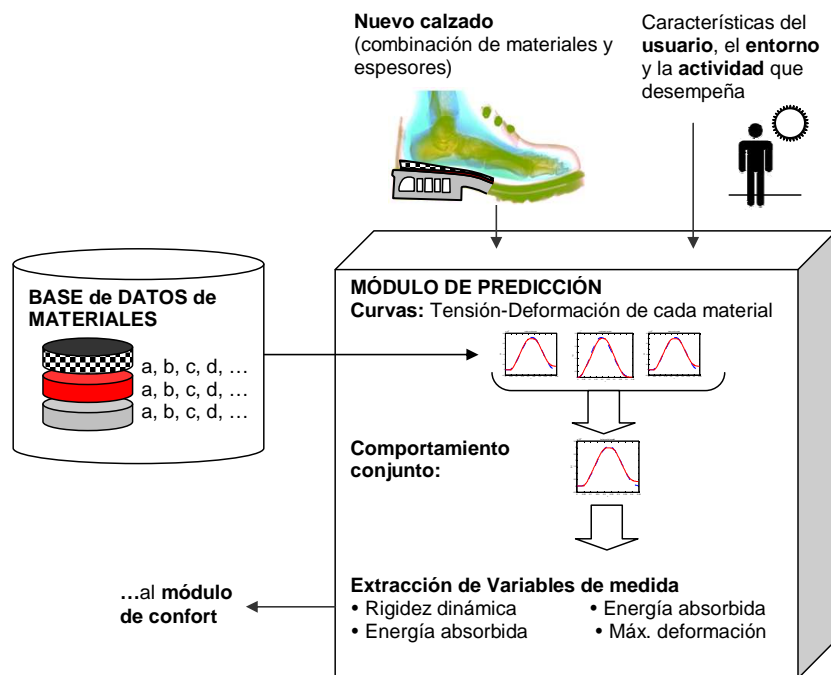


Figura 52. Funcionamiento detallado del Módulo de Predicción.

7.4.1.9. Validación de los modelos

El objetivo de este apartado fue validar los módulos de caracterización mecánica de los materiales y el módulo de predicción del comportamiento mecánico global del calzado. Para ello se llevaron a cabo los siguientes pasos para cada uno de los tres test considerados en este punto (Absorción de impactos, distribución de altas presiones y distribución de bajas presiones):

1º_ Se seleccionó una muestra de 11 zapatos (escogidos de entre los analizados para el estudio de la percepción del confort) representativa del mercado de calzado de calle (ANEXO).

2º_ Se modelaron los materiales de sus componentes a partir del módulo de caracterización mecánica para los tres test. Para ello, se llevaron a cabo ensayos con maquinaria en cada uno de los tres test de cada uno de los materiales de los componentes de la suela, plantilla y palmilla.

3º_ Se introdujeron dichos modelos en el sistema y se llevaron a cabo las predicciones de los comportamientos del calzado para cada uno de los test de presiones.

4º_ Finalmente, para cada uno de los test de este apartado, se comparó el resultado obtenido a partir del módulo de predicción del sistema virtual de ensayos con el resultado de los ensayos con maquinaria real elaborados en el estudio de la percepción del confort.

7.4.2. MODELO DEL AJUSTE

Este punto describe los métodos desarrollados para la consecución del modelo de ajuste. Para ello se siguieron los siguientes pasos:

1. Definición del alcance del modelo de ajuste.
2. Definición de las medidas geométricas del pie y la horma relevantes en el ajuste entre el pie y el calzado.
3. Obtención de la información geométrica de los pies de la población a la que va dirigido el calzado.
4. Implementación de los algoritmos de cálculo del ajuste.

7.4.2.1. Definición del alcance del modelo de ajuste

Definido el ajuste como la interacción mecánica entre el dorso del pie y el corte del calzado, surgen una serie de aspectos relevantes para el desarrollo de un modelo:

- Tipo de medida que se usa para la cuantificación de dicha interacción mecánica
- Definición de los elementos que interactúan (anatomía del pie y componentes del calzado),
- Actividad desarrollada por el usuario.

A continuación se abordan estos asuntos que acotan el alcance del modelo de ajuste desarrollado en la tesis.

- **Cuantificación del ajuste: medidas geométricas o de presiones**

Actualmente existen dos métodos de cuantificación del ajuste, no basados en la percepción, entre un calzado y una población de usuarios: la aproximación geométrica y la aproximación por presiones. Mientras que la aproximación geométrica se basa en la comparación de medidas de longitud, perímetro o volúmenes de la horma del calzado y el pie, la aproximación por presiones consiste en medir directamente las presiones que ejerce el calzado sobre el pie.

Aunque ambas aproximaciones son posibles hoy en día, la tecnología necesaria para medir las presiones debida al ajuste del corte es complicada y no existe un producto comercial específicamente desarrollado a tal efecto y disponible en el mercado, lo que justifica la escasez de estudios al respecto (Olaso et al, 2007; Jordan and Bartlett, 1995; Jordan et al., 1997) que representen avances significativos.

Por otra parte, la aproximación geométrica se basa en las medidas 3D de horma y pie, de las cuales existen numerosos estudios llevados a cabo (y por tanto amplia información), ya que existen numerosos desarrollos específicos en el mercado para capturar medidas geométricas del pie (e.g. principalmente escáneres especialmente adaptados para registrar la forma 3D del pie: INFOOT, http://www.iwl.jp/main/infoot_std.html). En el IBV, se cuenta con un equipo de estas características para el escaneado de pies y hormas en 3D, que ha permitido generar una amplia base de datos antropométrica de poblaciones de distintas regiones nacionales y europeas.

A partir de estas consideraciones, en este trabajo se optó por la aproximación geométrica, basada en la medición de medidas de la horma y su comparación con las medidas de los pies de la población para la que va destinado el calzado.

- **Definición del volumen interno del calzado**

El volumen final del calzado no es idéntico al de la horma debido a que el diseñador cuenta con la deformación de los materiales del corte, así como con la tipología y diseño del cierre, para que el calzado aloje correctamente el volumen del pie. Partiendo de un volumen inicial dado por la horma, el volumen interno final es resultado de la interacción (equilibrio de fuerzas que da lugar a distribución de presiones en el dorso) entre el pie y el corte, siendo muy difícil de caracterizar sin que el pie se encuentre dentro del mismo. De hecho, no existe actualmente en el mercado tecnología para caracterizar el volumen interno del zapato calzado, por lo que la aproximación geométrica a la cuantificación del ajuste sigue dependiendo hoy en día en la comparación de formas entre horma y pie, y no entre el volumen final del calzado y pie.

Considerando esta situación la aproximación adoptada en esta tesis es la comparación entre distintas medias de los volúmenes de hormas y pies.

- **Actividad desarrollada por el usuario: aproximación dinámica o estática**

El pie se deforma durante sus actividades (e.g. al caminar el pie se aplanan y expande sobre todo en la fase de impulsión (Olaso et al. 2007), lo que da lugar al concepto de ajuste dinámico, es decir, a la adaptación del calzado a los cambios de forma que experimenta el pie durante la realización de sus distintas funciones. Para poder llevar a cabo una cuantificación del ajuste dinámico mediante una aproximación geométrica habría que ser capaz de capturar la forma del pie y el volumen interno del calzado a lo largo del ciclo de marcha.

Actualmente no existe un desarrollo comercial capaz de abordar esta medición en el estado de la técnica, por lo que en esta tesis se optó por una aproximación al ajuste estática, considerando el volumen del pie en bipedestación.

7.4.2.2. Definición de las medidas geométricas del pie y la horma

Para la extracción de las medidas relevantes en el ajuste pie-calzado, a parte de la revisión del estado del arte, se llevó a cabo un análisis de los aspectos más importantes del ajuste mediante reuniones de expertos (podólogos, médicos y especialistas biomecánicos) siguiendo el siguiente proceso:

1. Análisis de los **aspectos más relevantes en el ajuste** considerando la interacción pie-calzado. Para el desarrollo de este punto se consideró el ajuste desde un punto de vista funcional, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - Aspectos geométricos de ajuste entre horma y pie en bipedestación.
 - Tipología y construcción del calzado (e.g. altura de tacón, tipología de cierre, etc.)
 - Cambios de forma del pie durante el ciclo de marcha (e.g. flexión en los metatarsianos y expansión del pie durante la fase de propulsión)
 - Necesidades funcionales del usuario en cuanto a ajuste a lo largo del ciclo de marcha (e.g. absorción de impactos, transferencia de fuerzas, propulsión, etc.)
2. Identificación de las **medidas geométricas de pie y horma** que los caracterizan. Para cada uno de los aspectos identificados y analizados en el punto anterior se extrajo cuáles eran las medidas geométricas de la horma y el pie que mejor describen la interacción definida.

A continuación se detallan los resultados de este proceso.

7.4.2.3. Análisis de los aspectos relevantes en el ajuste

Se definieron como zonas/secciones de ajuste relevantes las siguientes:

- Ajuste en longitud
- Ajuste en la línea de flexión
 - Ajuste de la distancia del talón al 1^{er} metatarsiano
 - Ajuste de la distancia del talón al 5^o metatarsiano
 - Ajuste del ancho de metatarsianos
 - Perímetro de la articulación metatarsofalángica.
- Ajuste en el empeine
 - Perímetro de entrada
- Ajuste de los dedos.
- Ajuste del talón.
- Posición de la apófisis del quinto metatarsiano.

Para cada una de estas zonas/secciones se analizaron los aspectos más relevantes desde el punto de vista de las necesidades de ajuste y de la interacción pie-calzado.

7.4.2.4. Obtención de las secciones del pie y horma

Como resultado del análisis de los aspectos relevantes para el ajuste se obtuvieron las **medidas del pie a considerar en la cuantificación del ajuste**. A continuación se muestra la lista de medidas consideradas (Tabla 28; Figura 53):

ASPECTO	MEDIDAS
Ajuste en longitud	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud total del pie
Línea de flexión de los metatarsianos	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud cabeza del 1^{er} metatarsiano • Longitud talón cabeza del 5^o metatarsiano • Anchura del antepié • Perímetro de la articulación metatarsofalángica
Ajuste en el empeine	<ul style="list-style-type: none"> • Perímetro de retención • Perímetro del empeine • Perímetro talón-empeine
Ajuste en talón	<ul style="list-style-type: none"> • Anchura de talón
Ajuste de los dedos	<ul style="list-style-type: none"> • Altura del dedo más alto • Perímetro de los dedos • Longitud de los dedos • Formula digital

Tabla 28. Medidas a considerar en la cuantificación del ajuste

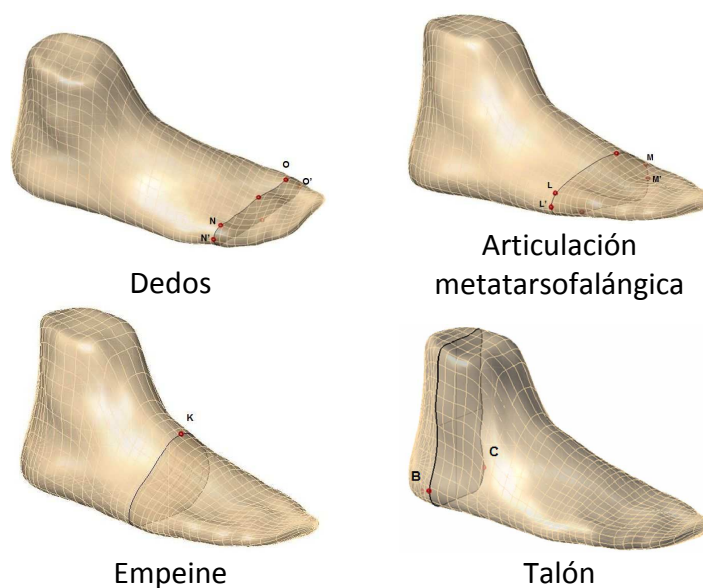


Figura 53. Secciones claves del pie para la cuantificación del ajuste

Para la caracterización de dichas medidas relevantes para el ajuste se siguió el siguiente proceso:

1. Identificaron una serie de puntos anatómicos que identifican las secciones a considerar sobre el pie.
2. Definición de las secciones de la horma a considerar mediante la traslación de los puntos anatómicos del pie a la horma.

A continuación se describen cada uno de estos pasos.

7.4.2.4.1. Identificación de los puntos anatómicos sobre el pie

Para la caracterización de dichas medidas relevantes para el ajuste se identificaron una serie de puntos anatómicos que identifican las secciones a considerar (Tabla 29;

Figura 54). Dichos puntos anatómicos se definieron mediante criterio de experto teniendo como referencia las medidas definidas como relevantes en la cuantificación del ajuste (Tabla 28).

PUNTOS	DESCRIPCIÓN
A	Punto más trasero del pie.
B	Punto más prominente del talón en la zona lateral (calculado al 15 % de la longitud del pie)
C	Punto más prominente del talón en la zona medial (calculado al 15 % de la longitud del pie)
D	Punto más prominente del tobillo exterior
E	Punto más bajo del tobillo exterior
F	Punto más prominente del tobillo interior
G	Punto más bajo del tobillo interior
H	Tuberosidad del 5º metatarso
I	Base del navicular
J	Punto de flexión pie/pierna
K	Punto más prominente del empeine
L	Cabeza del 5º metatarsiano
M	Cabeza del 1er metatarsiano
N	Articulación del 5º dedo
O	Articulación del 1er dedo
P	Punto más adelantado del pie

Tabla 29. Puntos anatómicos sobre el pie

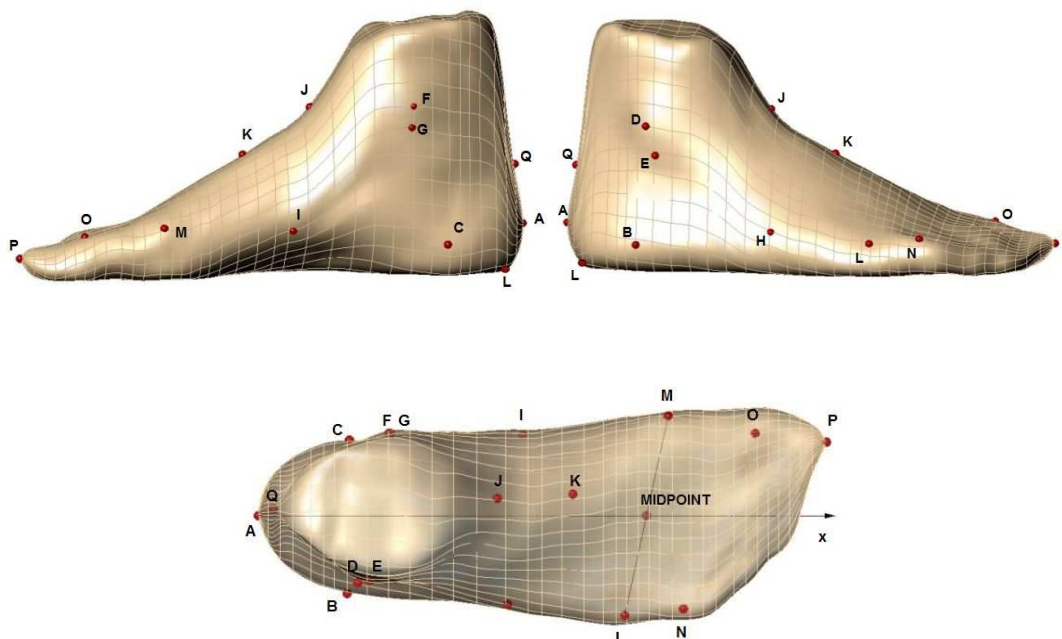


Figura 54. Definición de los puntos anatómicos clave sobre el pie

7.4.2.4.2. Obtención de las secciones relevantes de la horma

A partir de los puntos anatómicos del pie establecidos se definieron sus homólogos en la horma. Para ello se alinearon horma y pie. Dicha alineación se estableció sobre la línea definida por:

- en la horma, la línea entre el punto más trasero del talón, situado sobre la curva del talón, y el más adelantado de la puntera.
- en el pie, la línea entre el punto más trasero del talón, situado también sobre la curva del talón y el punto medio entre la línea que une la 1ª y 5ª articulaciones metatarsofalángicas.

Una vez alineadas se definieron puntos clave sobre la horma y las secciones correspondientes (Tabla 30; Figura 55).

PUNTOS	DESCRIPCIÓN
C	Punto más trasero del talón sobre el eje Z
P	Punto más adelantado de la horma sobre el plano ZX
D	Punto más prominente del talón en la zona lateral
E	Punto más prominente del talón en la zona medial
F	Punto más alto de la sección del empeine
G	Punto más bajo sobre la sección del empeine

H	Punto más prominente de la sección metatarsofalángica en la zona lateral
I	Punto más prominente de la sección metatarsofalángica en la zona medial
K	Punto más alto de la sección metatarsofalángica
J	Punto más bajo sobre la sección metatarsofalángica
L	Punto más prominente de la sección de los dedos en la zona lateral
M	Punto más prominente de la sección de los dedos en la zona lateral
O	Punto más alto de la sección de los dedos
N	Punto más bajo sobre la sección de los dedos

Tabla 30. Puntos clave sobre la horma

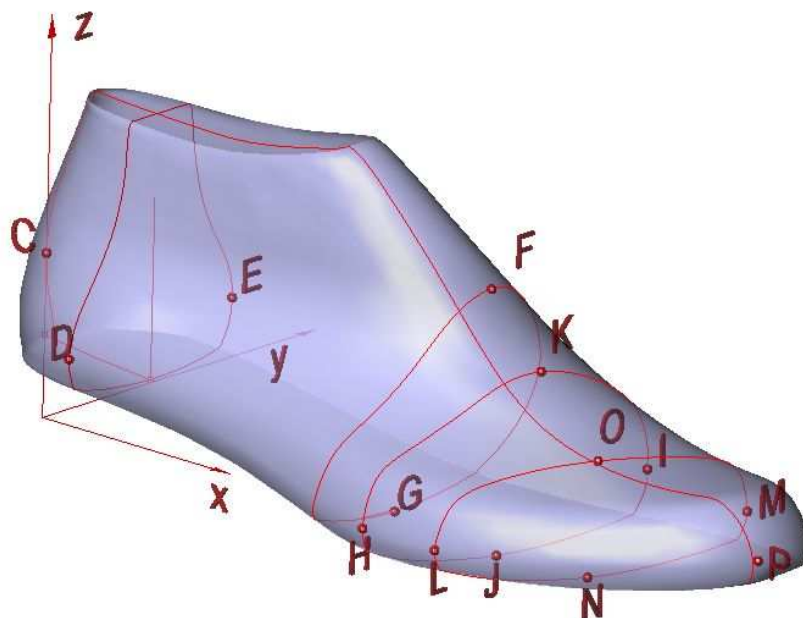
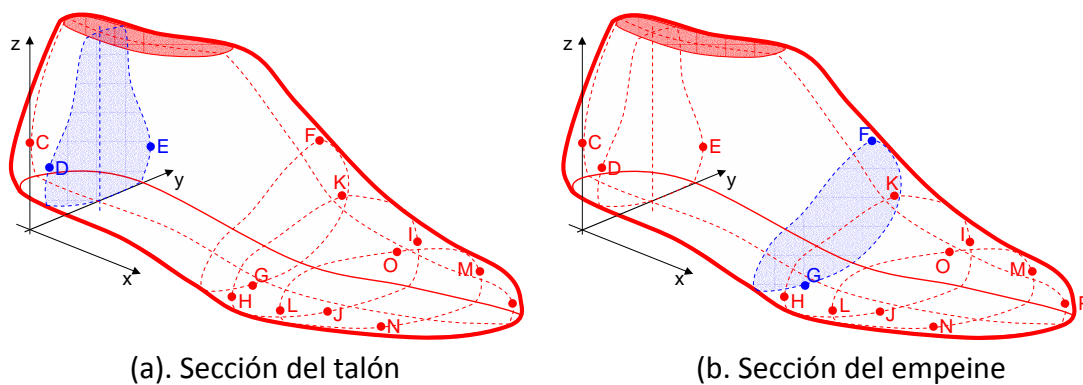


Figura 55. Puntos clave sobre la horma definiendo secciones clave de la horma.

La identificación de las secciones sobre la horma se basó en los puntos anatómicos del pie identificados en el paso anterior sobre la horma (Figura 55).



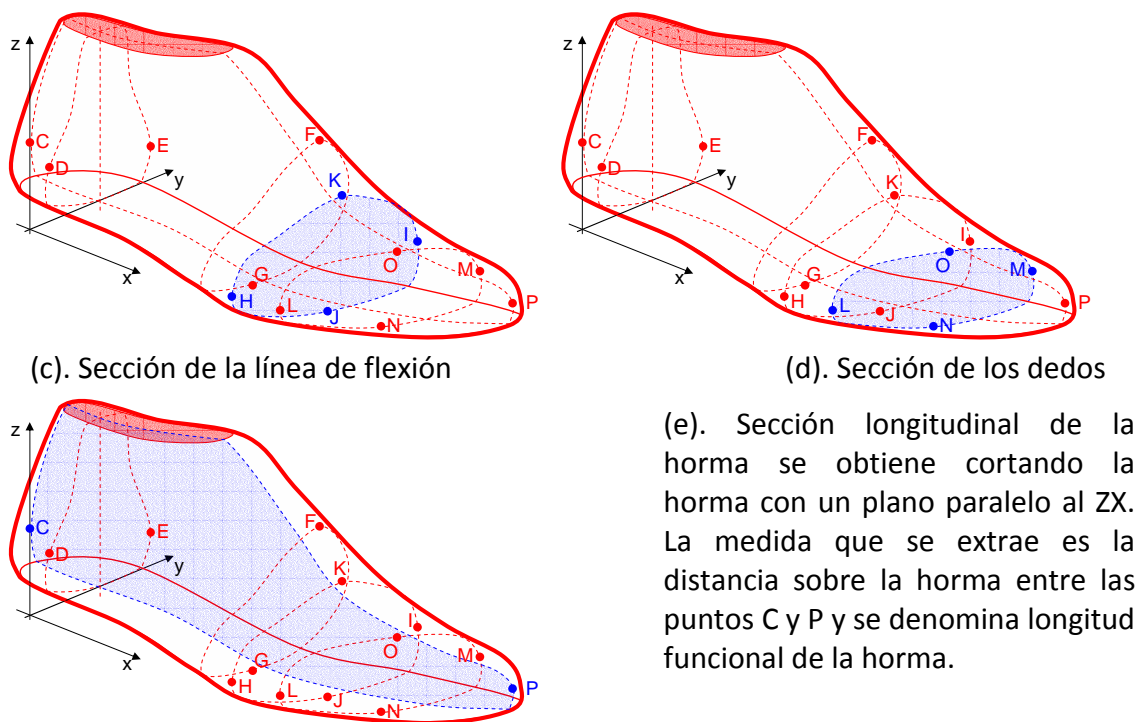


Figura 56. Secciones relevantes y sus puntos identificativos sobre la horma

La sección longitudinal sirve de referencia para el resto de secciones, de manera que la situación de éstas en la horma se lleva a cabo sobre la misma. A continuación (Tabla 31; Figura 57; Figura 58) se define la información necesaria para obtener el resto de secciones para el caso de la talla 42 de hombre.

SECCIONES	Posición sobre la sección longitudinal *	Angulo en el plano XY	Angulo en el plano XZ	Medidas extraídas
TALÓN	41.5 mm	90º	Perpendicular a la curva longitudinal	Anchura del talón $E_y - F_y$
EMPEINE	143.8	90º	Perpendicular a la curva longitudinal	Perímetro
FLEXIÓN	180.3 mm	12.6º	90º	Perímetro
DEDOS	215 mm	22º	90º	Altura $O_y - N_y$

(*) Distancia desde el punto D sobre la curva inferior de la sección longitudinal (Figura 56)

Tabla 31. Definición de las medidas de la horma para una talla 42 de hombre. Los datos son el resultado de la media de la base de datos 3D del IBV.

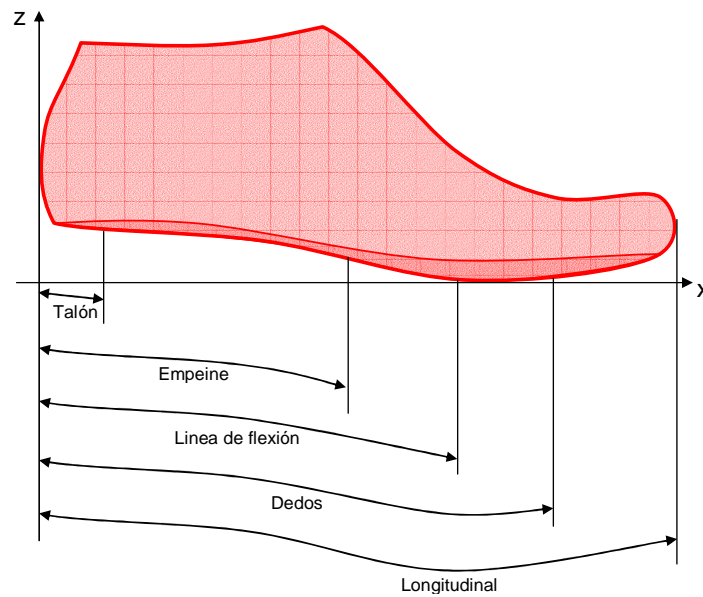


Figura 57. Posición de las distintas secciones de la horma desde el punto más trasero del talón.

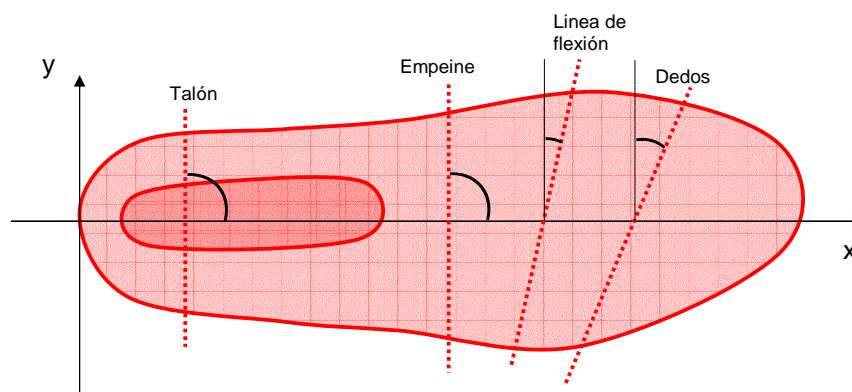


Figura 58. Secciones de la horma sobre el plano XY.

7.4.2.5. Información antropométrica de los pies de la población

El objetivo de este punto fue la extracción del valor medio, para cada una de las secciones antropométricas definidas en el apartado anterior, correspondiente a la población de la talla 42 de hombre adulto español.

El trabajo se llevó a cabo a partir de las bases de datos del IBV. Las bases de datos antropométricas del IBV están formadas por más de 5000 pies escaneados en 3D a lo largo de todo el territorio español.

7.4.2.6. Modelización de la interacción usuario-calzado

La cuantificación del ajuste para cada medida de la interacción pie-calzado se llevó a cabo extrayendo el **ratio entre la medida de la horma y la medida del pie**.

7.4.2.7. Implementación de los algoritmos

El siguiente diagrama (Figura 59) muestra el funcionamiento del algoritmo definido para el test de ajuste:

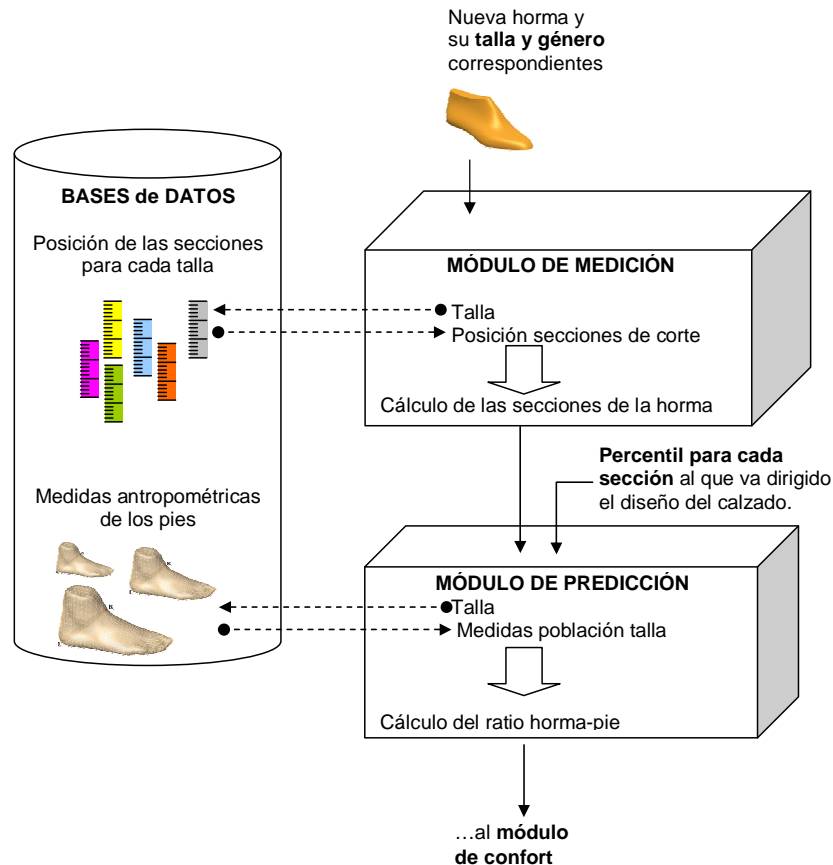


Figura 59. Funcionamiento detallado del Módulo de ajuste.

El algoritmo que se propone para el módulo de ajuste tiene dos partes:

- El **módulo de medición** de las hormas, cuyo objetivo es medir las secciones relevantes para el ajuste de hormas CAD
- El **módulo de predicción** del ajuste pie-horma, cuyo objetivo es, a partir de la caracterización geométrica de la horma y los percentiles de la población para cada sección del pie aportados por el diseñador, predecir el ajuste.

A continuación se describen más en detalle el funcionamiento de cada uno de estos módulos.

MÓDULO DE MEDICIÓN

El **modulo de medición** de las hormas es el que se utiliza para extraer las medidas en 3D de las hormas del calzado cuyo ajuste va a ser evaluado

El módulo, una vez se le introduce el fichero CAD de la horma, la talla y el género a los que corresponde, desarrolla los siguientes pasos (Figura 60):

1º_ Extrae de la base de datos las posiciones de las secciones definidas para la talla y población introducida.

2º_ Alinea la horma a lo largo de su eje longitudinal definido por los puntos C y P, y efectúa los cortes sobre la horma con la información obtenida de la base de datos, calculando finalmente la magnitud de las diferentes secciones.

3º_ Finalmente proporciona los resultados de las mediciones al algoritmo del módulo de predicción.

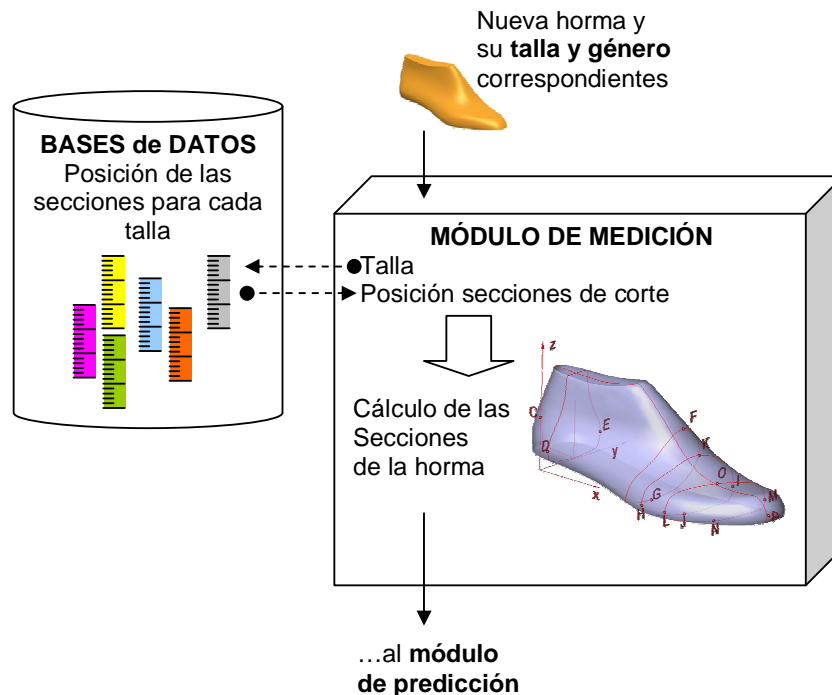


Figura 60. Funcionamiento detallado del Módulo de medición de las hormas.

MÓDULO DE PREDICCIÓN

El **módulo de predicción** es encargado de cuantificar el ajuste entre la horma introducida y las medidas de los pies de la población correspondiente a la talla y género a los que va destinada la horma, y proporcionar el resultado al módulo de confort.

Tanto las medidas de las secciones de la horma, como las de talla y género (previamente introducidas manualmente por el usuario) vienen del módulo de medición de las hormas, y las medidas de la población se encuentran en la base de datos.

Para cuantificar el ajuste proporcionado por una determinada horma se siguen los siguientes pasos (Figura 61):

1º_ Desde el módulo de medición se provee al módulo de las medidas de la horma, así como de la talla, el género y los percentiles de cada sección a los que va destinada dicha horma. La selección de los percentiles permite al diseñador definir el grupo poblacional para el que el calzado ajustará más o menos.

2º_A continuación extrae las medidas antropométricas de la base de datos la información de la población correspondiente a la talla y los percentiles introducidos.

3º_Finalmente, se contrastan las medidas de la horma con las medidas de la población extraídas de la base de datos y se computa, para cada una de ellas, el ratio “medida de horma / medida de pie”. La medida del pie corresponde a la media de la población definida por el género y talla, que en el caso de esta tesis es “talla 42 de hombre adulto español”.

4º_Finalmente proporciona el ratio “medida de horma / medida de pie” al módulo de confort.

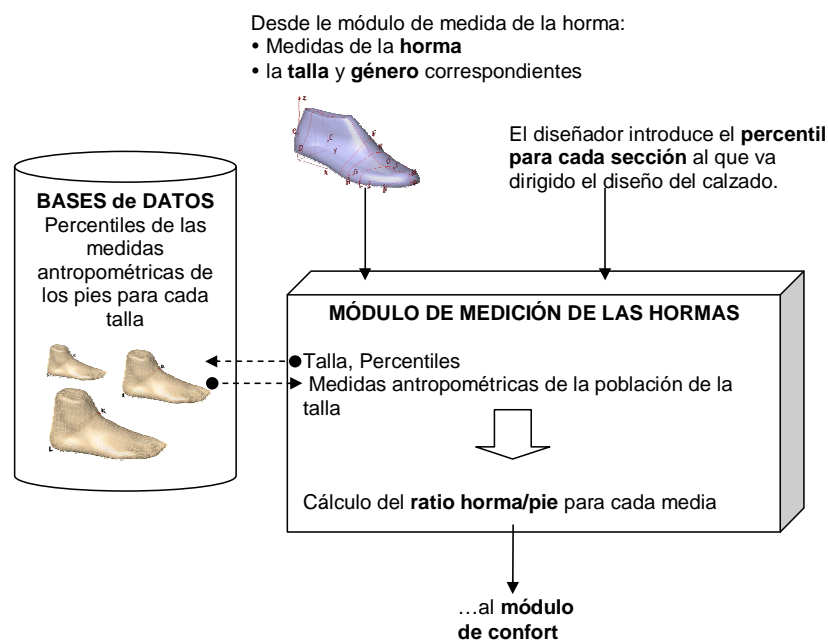


Figura 61. Funcionamiento detallado del Módulo de Predicción.

7.5. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA (FASE 4)

El desarrollo de la aplicación informática consistió en la implementación en lenguaje informático de los siguientes bloques y la definición e implementación de los flujos de información entre ellos.

- Bases de datos
- Módulos de caracterización de las propiedades del calzado
- Módulos de predicción de las propiedades funcionales
- Módulos de predicción del confort percibido
- Interfaz de usuario

La aplicación informática utilizada para la programación fue el MATLAB 7.0. Las bases de datos fueron implementadas en Microsoft EXCEL 2002 y archivos de texto “.txt”.

En el diagrama mostrado a continuación (Figura 62) se plasma la estructura de la aplicación informática.

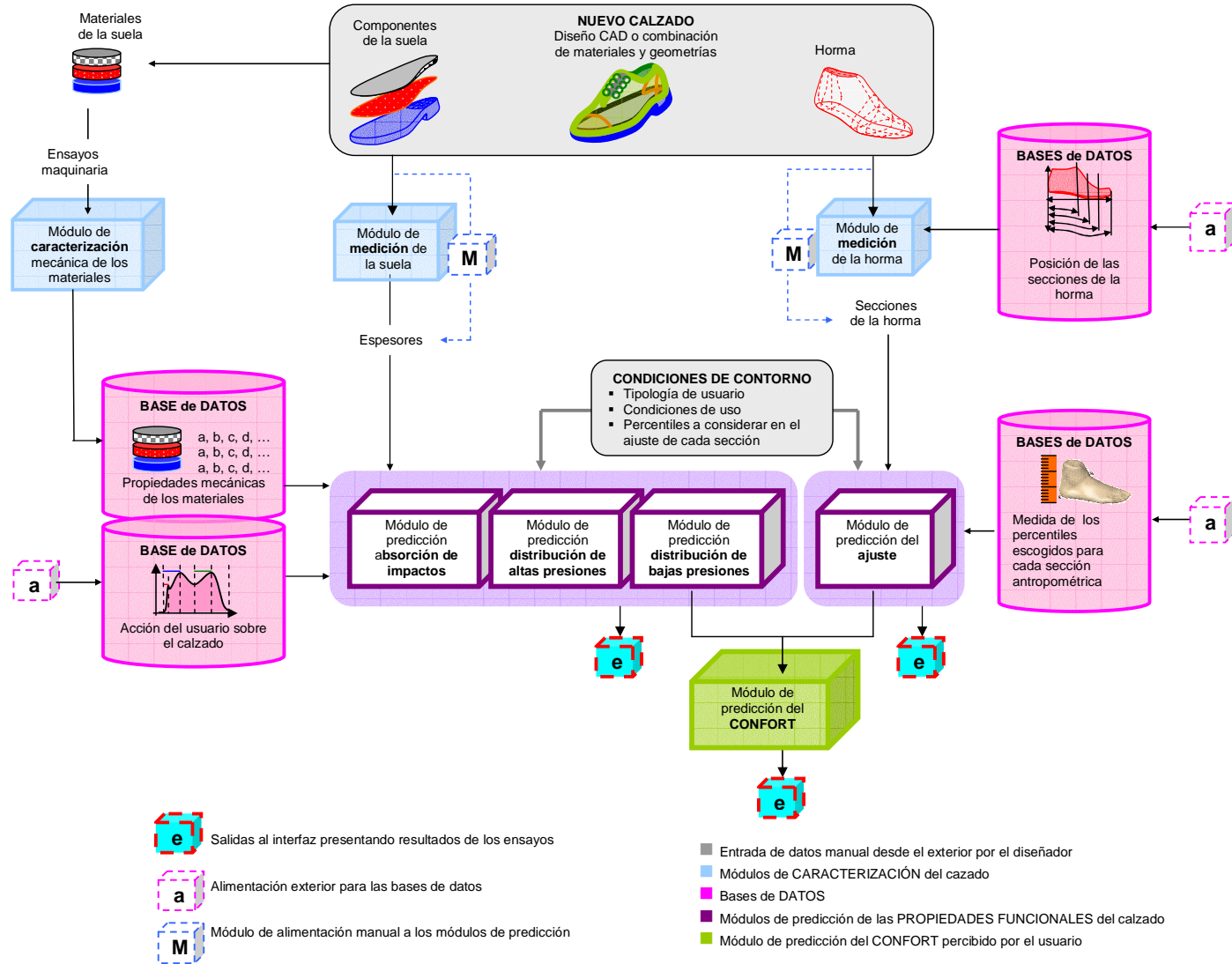


Figura 62. Gestión de la información de banco de ensayos virtuales para calzado.

7.5.1. GENERACIÓN DE LAS BASES DE DATOS

Para cada base de datos generada se siguió un proceso que dependió del tipo de información necesaria. A continuación se describe el contenido de cada una de ellas, su rol en la aplicación informática y el proceso seguido para su obtención:

- **Propiedades mecánicas de los materiales:** Corresponde a los coeficientes que caracterizan los modelos de cada material para cada uno de los test de absorción de impactos, distribución a altas presiones y distribución a bajas presiones. Es alimentada por el módulo de caracterización de las propiedades mecánicas de dichos test y provee de información a los módulos de predicción de las propiedades funcionales de dichos test.
Para su obtención se llevaron a cabo medidas objetivas mediante test de laboratorio de las propiedades funcionales relevantes para el confort de cada calzado de la muestra seleccionada en la FASE 3.
- **Patrón biomecánico del usuario:** Contiene las curvas de fuerza-tiempo que los distintos perfiles de usuario + actividad + entorno ejercen sobre el calzado para cada uno de los test de absorción de impactos, distribución a altas presiones y distribución a bajas presiones. En la tesis sólo se generaron las curvas para el perfil considerado “hombre adulto talla 42 caminando sobre terreno urbano”. Es alimentada exteriormente a base de ensayos biomecánicos con usuarios y provee de información a los módulos de predicción de las propiedades funcionales de dichos test.
Las curvas de fuerza-tiempo incluidas en la base de datos se obtuvieron a partir de bases de datos del IBV, generada mediante experimentación con usuarios en una plataforma de fuerzas Kineskan® desarrollada por el IBV.
- **Posición de las secciones de la horma:** Contiene las posiciones de las secciones de la horma a considerar en el cálculo del ajuste para un determinado perfil de usuario (género y talla). Es alimentada desde el exterior a partir de la medición de la anatomía de los pies y provee de información al módulo de medición de las hormas.
Esta base de datos fue generada a partir de las bases de datos antropométrica del IBV, obteniendo la posición media de cada sección para el caso considerado en la tesis “adulto talla 42 caminando sobre terreno urbano”.
- **Antropometría de las poblaciones:** Contiene datos antropométricos (percentiles 5, 25, 50, 75 y 95) de las poblaciones de pies para determinadas tipologías de usuario (talla y género). Es generada desde el exterior mediante el escaneado de pies de usuarios y el cálculo de los percentiles poblacionales. Alimenta el módulo de predicción del ajuste.
Esta base de datos fue generada a partir de las bases de datos antropométrica del IBV, obteniendo los percentiles 5, 25, 50, 75 y 95 de cada sección antropométrica para el caso considerado en la tesis “adulto talla 42 caminando sobre terreno urbano”.

7.5.2. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÓDULOS

El proceso de desarrollo de los módulos consistió en trasladar a lenguaje informático MATLAB® los algoritmos obtenidos previamente en las fases 2 y 3 que contienen los modelos matemáticos de las propiedades funcionales y el confort. Existen tres tipos de módulos:

- Los **módulos de caracterización** del calzado, cuyo objetivo es la extracción de información geométrica y mecánica de los componentes del calzado.
- Los **módulos de predicción** de las propiedades funcionales
- Los **módulos de predicción** del confort a partir de las propiedades funcionales.

A continuación se describen dichos módulos.

7.5.2.1. Módulos de caracterización del calzado

Existen tres módulos de caracterización del calzado:

- **Módulo de caracterización mecánica de los materiales:** A partir de los resultados de los ensayos mecánicos de los materiales de la suela, obtiene el modelo matemático que mejor ajusta al material y lo almacena en la base de datos de propiedades mecánicas de los materiales.
- **Módulo de medición de la suela:** A partir de un modelo CAD de un calzado, se desarrolló un módulo capaz de extraer los espesores de los componentes de la suela (palmilla de montaje, plantilla y suela) y alimentar con ellos los módulos de predicción de la absorción de impactos, distribución a altas presiones y distribución a bajas presiones. El software permite omitir este paso y proveer a los módulos de predicción los espesores de los componentes medidos de forma manual.
- **Módulo de medición de la horma:** A partir de una horma en CAD y la posición de las secciones dadas por la base de datos correspondiente, se desarrolló un módulo capaz de extraer las medidas de las secciones de la horma CAD y alimentar con ellos al módulo de predicción del ajuste. El software permite saltarse este paso y proveer al módulo de predicción del ajuste de las medidas de las secciones de manera manual.

7.5.2.2. Módulos de predicción de las propiedades funcionales

Existen dos módulos de predicción de las propiedades funcionales:

- **Módulo de predicción de la absorción de impactos, distribución a altas presiones y distribución a bajas presiones:** A partir de los modelos de los materiales introducidos en la base de datos por el módulo de caracterización, y los espesores correspondientes a cada componente medidos en el calzado mediante el módulo de medición de la suela, este módulo de predicción genera un modelo de

comportamiento conjunto de los componentes de la suela y le aplica la acción del usuario extraída de la base de datos correspondiente a partir de la tipología de usuario y la actividad que este desarrolle, obteniendo unos resultados que envía al módulo de predicción del confort.

- **Módulo de predicción del ajuste:** A partir de las secciones medidas sobre la horma obtenidas del módulo de medición, y cotejándola con las medidas antropométricas correspondientes a la población definida por la tipología de usuario, se calculan los “ratios horma / pie” de ajuste para las secciones relevantes para el confort y se envían al módulo de predicción del confort.

7.5.2.3. Módulos de predicción del confort percibido

El módulo de predicción del confort, para un diseño específico de calzado, introduce los resultados provenientes de los módulos de predicción de las propiedades funcionales en el modelo del confort y genera un ratio del confort percibido por los usuarios.

7.5.3. INTERFAZ DE USUARIO

El interfaz de usuario fue desarrollado mediante el uso de la aplicación específica a tal efecto de MATLAB®. Su desarrollo tuvo lugar en los siguientes pasos.

1º_ Se definieron las especificaciones a partir de reuniones con expertos del IBV (en el sector del calzado y en desarrollo de aplicaciones informáticas).

2º_ Se desarrolló una versión básica del interfaz, lo que permitió subsanar errores en la definición más básica del mismo antes de desarrollar la versión definitiva conectada a los módulos de caracterización y predicción

3º_ Se desarrolló la versión definitiva uniendo el interfaz a los módulos de caracterización y predicción.

El interfaz de usuario consta de tres partes principales:

- La **pantalla principal**, con dos áreas de control disponibles:
 - un menú superior, en la que los controles principales del programa son accesibles: crear, cargar, grabar diseños en CAD de calzado y sesiones de ensayos.
 - un árbol lateral de piezas que te permite controlar el diseño del calzado: asignar materiales, cambiar colores, indicar la función de cada elemento.
- El **interfaz gráfico**, con dos funciones principales:
 - Permite manipular los colores y orientaciones de los diseños en CAD
 - Informa al usuario de determinadas acciones como cuál es el componente del diseño CAD que está seleccionado.

- Un **asistente** que te guía a lo largo del proceso de ensayo del calzado para facilitar la entradas y salidas de datos. El asistente consiste en una serie de ventanas que se van abriendo sucesivamente a medida que se va configurando el ensayo. Específicamente sigue los siguientes pasos:

1º_ Selección de un diseño de calzado en CAD (para una entrada de datos manual se carga un diseño estándar).

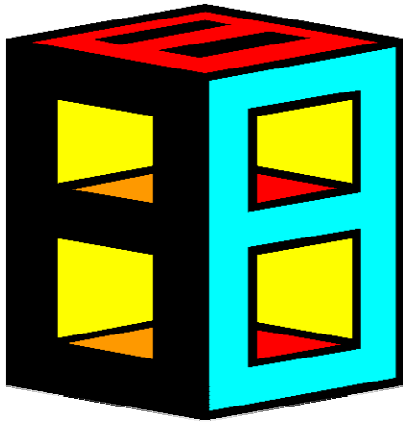
2º_ Configuración de la tipología de usuario y condiciones de uso.

3º_ Selección de bases de datos de materiales de la suela. La base de datos contiene las distintas posibilidades en cuanto al tipo de materiales utilizados en la caracterización de los componentes del calzado. Además, el sistema permite tener distintas bases de datos para diferentes tipologías de calzado.

4º_ Selección de ensayos a realizar. El software permite la realización de ensayos independientemente de si se desea llevara cabo la predicción del confort o no. Por otro lado si el objetivo es predecir el confort, el usuario selecciona ensayo de confort y se llevan a cabo automáticamente los ensayos necesarios según el modelo de confort desarrollado.

5º_ Como último paso, el asistente ofrece unas pantallas de resultados de los ensayos llevados a cabo que depende de las selecciones previas del usuario.

8. RESULTADOS



A continuación se muestran los resultados de los estudios llevados a cabo durante el proyecto.

- De la FASE 2, los resultados asociados al desarrollo del modelo de confort a partir de las propiedades funcionales
- De la FASE 3, los resultados asociados a la modelización de los test de maquinaria de las propiedades funcionales relevantes para el confort
- De la FASE 4, los resultados asociados al desarrollo de la aplicación informática.

8.1. LA PERCEPCIÓN DE CONFORT DEL USUARIO Y SU RELACIÓN CON LA PERCEPCIÓN DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DE LA INTERACCIÓN USUARIO-CALZADO

Del estudio de la percepción del confort, así como de la influencia de las propiedades funcionales del calzado en el mismo, se obtuvieron los siguientes resultados (FASE 2):

- Modelo de predicción de la percepción de confort del usuario a partir de la percepción de las propiedades funcionales del calzado. Identificación de las propiedades funcionales relevantes para el confort.
- Relación entre la percepción de las propiedades funcionales relevantes para el confort y su medida objetiva con maquinaria especializada. Identificación de los parámetros de los ensayos con maquinaria relevantes para la caracterización de las propiedades funcionales con influencia en el confort percibido.
- Modelo de predicción de la percepción de confort del usuario a partir de la medida objetiva con maquinaria especializada de las propiedades funcionales del calzado y resultado de su validación.

8.1.1. MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA PERCEPCIÓN DE CONFORT DEL USUARIO A PARTIR DE LA PERCEPCIÓN DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DEL CALZADO

Del análisis de la relación entre la percepción del confort global asociado al calzado y las percepciones del usuario de las propiedades funcionales del mismo se obtuvieron tres modelos significativos (Figura 63):

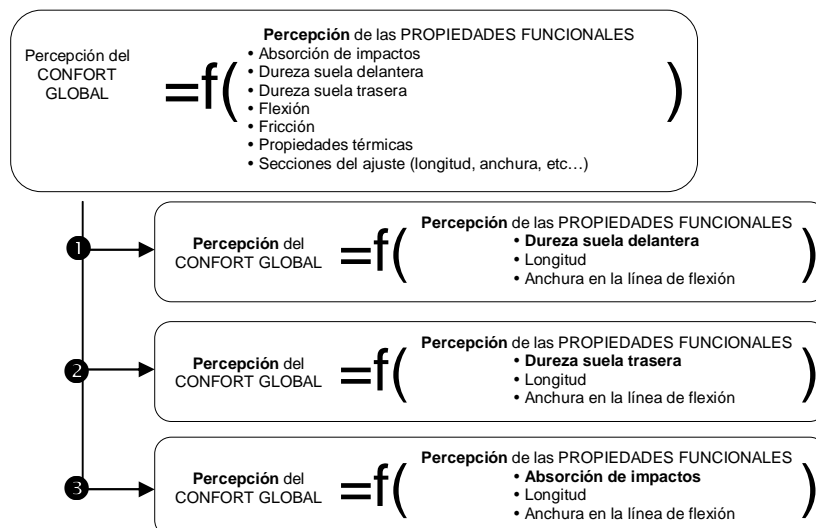


Figura 63. Modelos significativos de predicción de la percepción de confort del usuario a partir de la percepción de las propiedades funcionales del calzado

A continuación (Tabla 32; Tabla 33; Tabla 34) se describen cada uno de los tres modelos encontrados significativos:

MODELO 1 DE CONFORT a partir de la **percepción** de las propiedades funcionales

<p>Modelo lineal</p> $Cg = 14.316 - 0.869 * PDb - 1.577 * PL - 1.294 * PM$ <p>Donde:</p> <p>Cg = Percepción del confort global</p> <p>PDb = Percepción de la DUREZA de la suela DELANTERA</p> <p>PL = Percepción del AJUSTE en longitud</p> <p>PM = Percepción de la AJUSTE en la línea de flexión</p> <p>Calidad del ajuste $R^2 = 0.813$</p>	<p>Significatividad</p> <p>Modelo $p < 0.000$</p> <p>CTE $p < 0.003$</p> <p>PDb $p < 0.003$</p> <p>PL $p < 0.002$</p> <p>PM $p < 0.000$</p>
--	--

Tabla 32. Resumen del modelo de regresión obtenido relacionando la percepción del confort con las percepciones de la DUREZA de la suela DELANTERA.

MODELO 2 DE CONFORT a partir de la **percepción** de las propiedades funcionales

<p>Modelo lineal</p> $Cg = 12.362 - 0.774 * PDa - 1.285 * PL - 1.135 * PM$ <p>Donde:</p> <p>Cg = Percepción del confort global</p> <p>PDa = Percepción de la DUREZA de la suela TRASERA</p> <p>PL = Percepción del AJUSTE en longitud</p>	<p>Significatividad</p> <p>Modelo $p < 0.001$</p> <p>CTE $p < 0.003$</p> <p>PDa $p < 0.044$</p> <p>PL $p < 0.008$</p>
---	--

PM = Percepción de la AJUSTE en la línea de flexión	PM	p < 0.002
Calidad del ajuste R ² = 0.517		

Tabla 33. Resumen del modelo de regresión obtenido relacionando la percepción del confort con las percepciones de la DUREZA de la suela TRASERA.

MODELO ③ DE CONFORT a partir de la percepción de las propiedades funcionales	
Modelo lineal	Significatividad
$Cg = 7.085 + 0.862 * A - 1.442 * PL - 0.932 * PM$	Modelo p < 0.001
Donde:	
Cg = Percepción del confort global	CTE p < 0.003
A = Percepción de la AMORTIGUACION DE IMPACTOS	A p < 0.024
PL = Percepción del AJUSTE en longitud	PL p < 0.001
PM = Percepción de la AJUSTE en la línea de flexión	PM p < 0.005
Calidad del ajuste R ² = 0.530	

Tabla 34. Resumen del modelo de regresión obtenido relacionando la percepción del confort con las percepciones de la AMORTIGUACION DE IMPACTOS.

8.1.2. RELACIÓN ENTRE LA PERCEPCIÓN DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES RELEVANTES PARA EL CONFORT Y LA MEDIDA OBJETIVA CON MAQUINARIA ESPECIALIZADA

Para cada propiedad funcional identificada como relevante en los modelos de la percepción del confort se analizó la relación entre la percepción del usuario y el resultado de los ensayos con maquinaria (Figura 64) con el objetivo de identificar los parámetros relevantes en su caracterización objetiva.

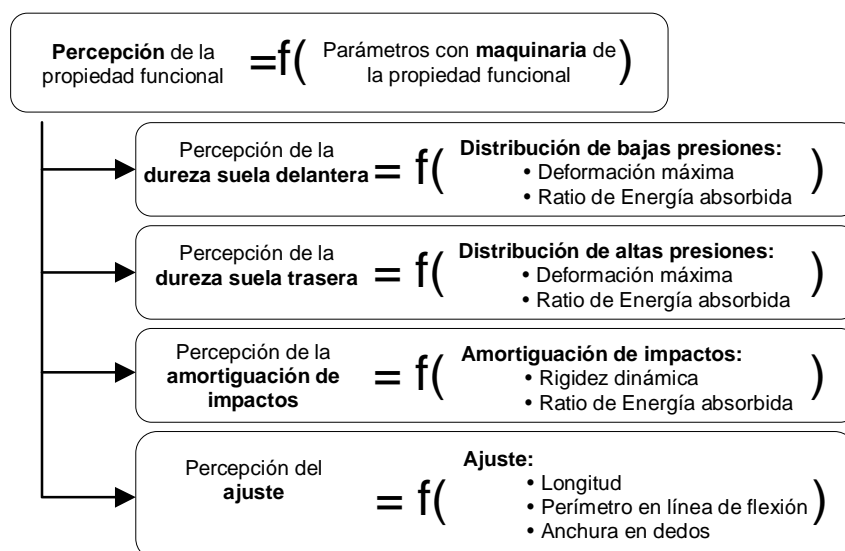


Figura 64. Relaciones analizadas entre la percepción de las propiedades funcionales relevantes para el confort y la medida objetiva con maquinaria especializada

Los resultados de las regresiones para cada propiedad funcional se muestran resumidos a continuación en la tabla (Tabla 35).

PERCEPCIÓN de la propiedad funcional	Parámetros OBJETIVOS de la propiedad funcional	Tipo de MODELO	SIG.	R ²
Dureza de la suela delantera	Deformación máxima	Lineal	0.030	0.36
	Ratio de Energía absorbida	-	-	-
Dureza de la suela trasera	Deformación máxima	Lineal	0.010	0.39
	Ratio de Energía absorbida	-	-	-
Amortiguación de impactos	Rigidez dinámica	Potencia	0.000	0.53
	Ratio de Energía absorbida	-	-	-
Ajuste	Holgura en longitudinal	Lineal	0.000	0.47
	Holgura en anchura en el talón	-	-	-
	Holgura en anchura en el empeine	-	-	-
	Holgura en anchura en la línea de flexión	Cuadrático	0.002	0.51

Tabla 35. Resumen de los modelos de regresión obtenidos para los aspectos funcionales.

A continuación (Figura 65; Figura 66; Figura 67; Figura 68; Figura 69) se muestran con más detalle los modelos que produjeron resultados significativos.

DISTRIBUCIÓN BAJAS PRESIONES

Modelo lineal

$$PD_b = 4.003 - 0.653 * D_b$$

$$p < 0.030 \quad R^2 = 0.361$$

Donde:

PD_b = Percepción de la dureza de la suela delantera.

D_b = Deformación máxima a bajas presiones (mm)

Percepción de la DUREZA DE LA SUELA DELANTERA (Distribución a bajas presiones)

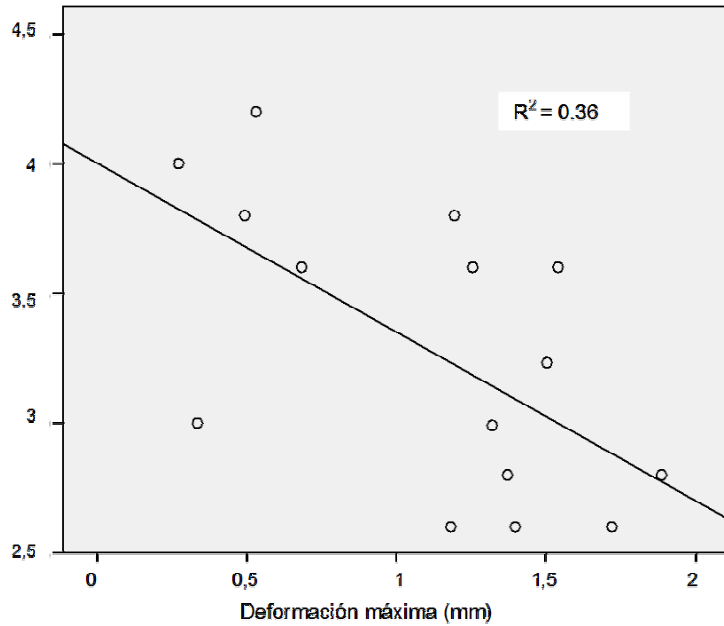


Figura 65. Modelo relacionando la percepción de la dureza de la suela delantera con la deformación máxima (mm) a bajas presiones medida objetivamente

DISTRIBUCIÓN ALTAS PRESIONES

Modelo lineal

$$PD_a = 3.401 - 0.133 * D_a$$

$$p < 0.010 \quad R^2 = 0.387$$

Donde:

PD_a = Percepción de la dureza de la suela trasera

D_a = Deformación máxima a altas presiones (mm)

Percepción de la DUREZA DEL TACÓN (Distribución a altas presiones)

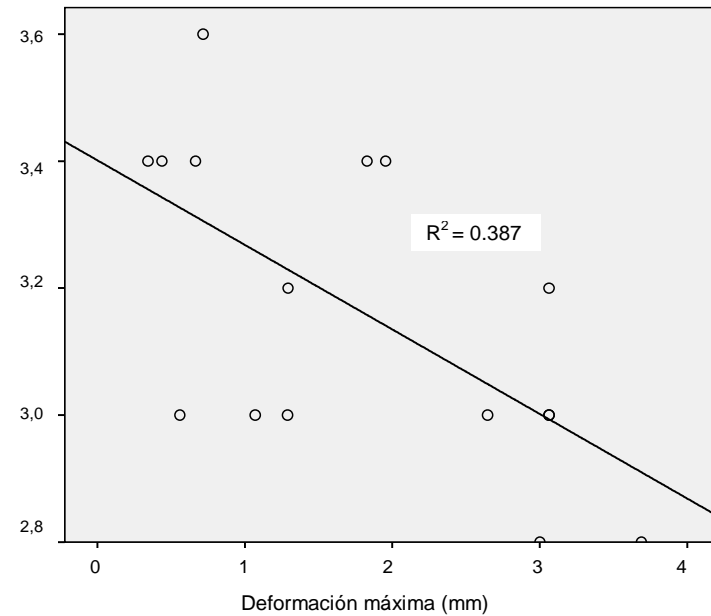


Figura 66. Modelo relacionando la percepción de la dureza del tacón con la deformación máxima (mm) a altas presiones medida objetivamente

AMORTIGUACIÓN DE IMPACTOS

Modelo potencia

$$PA = 6.051 A^{-0.105}$$

$p < 0.000$ $R^2=0.533$

Donde:

PA = Percepción de la Amortiguación

A = Rigidez dinámica (N/mm)

Percepción de la AMORTIGUACIÓN DE IMPACTOS

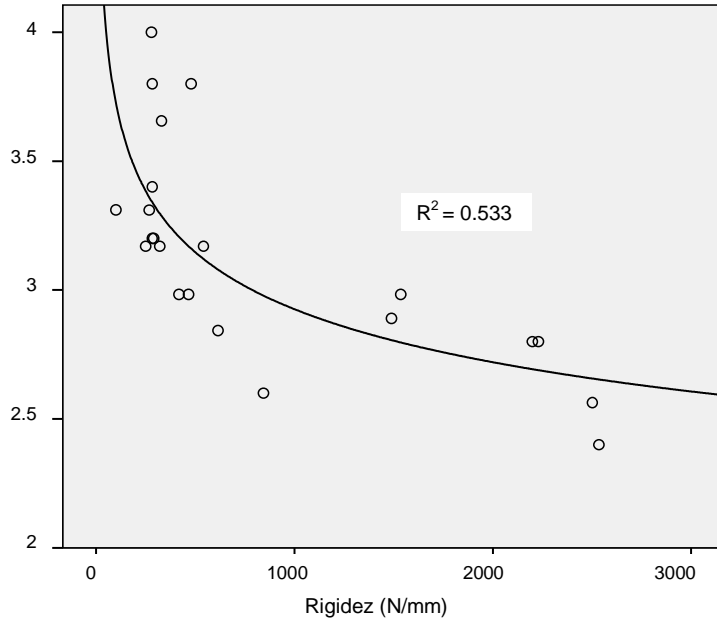


Figura 67. Modelo relacionando la percepción de la amortiguación de impactos con la Rigidez dinámica medida objetivamente

AJUSTE LONGITUDINAL

Modelo Lineal

$$PL = -5.77+7.58*Lhp$$

$p < 0.000$

$R^2=0.47$

Donde:

PL = Percepción del HOLGURA en longitud

Lhp = Ratio Horma/Pie de longitud

Percepción de la holgura en LONGITUD

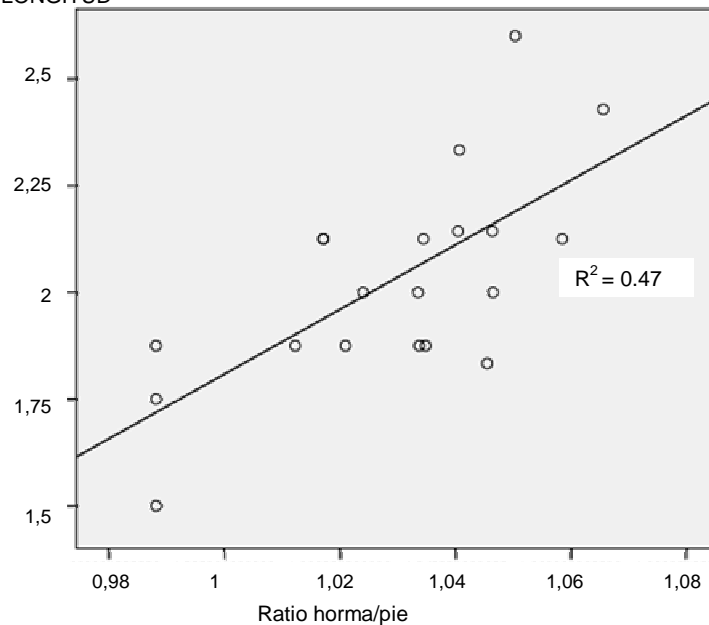


Figura 68. Modelo relacionando la percepción de la longitud con el ratio horma / pie medido objetivamente en esa sección

AJUSTE LÍNEA DE FLEXIÓN

Modelo Cuadrático

$$PM = -72.78 + 142.62 * M_{hp} - 67.85 * M_{hp}^2$$

$$p < 0.002 \quad R^2 = 0.51$$

Donde:

PM = Percepción del HOLGURA en la línea de flexión

M_{hp} = Ratio Horma/Pie en el perímetro de la línea de flexión

Percepción del holgura en la LÍNEA DE FLEXIÓN

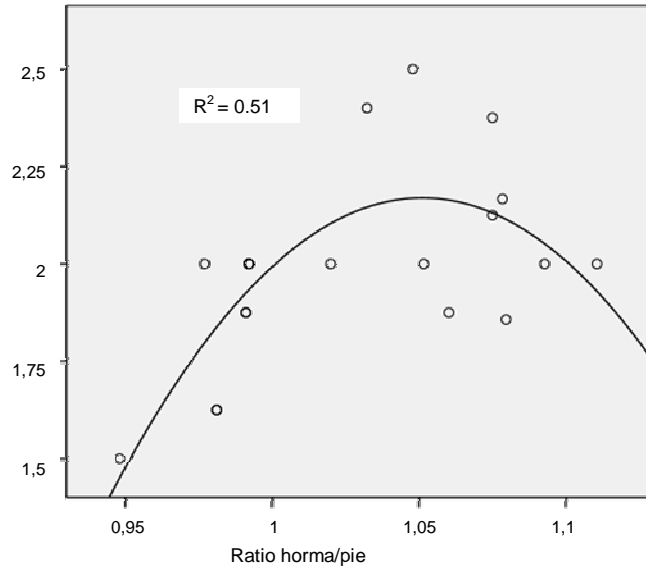


Figura 69. Modelo relacionando la percepción del ajuste en la línea de flexión con el ratio horma / pie medido objetivamente en esa sección

8.1.3. MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA PERCEPCIÓN DE CONFORT DEL USUARIO A PARTIR DE LA MEDIDA OBJETIVA DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES DEL CALZADO CON MAQUINARIA ESPECIALIZADA

Se analizó la relación entre la percepción del confort global asociado al calzado y las mediciones objetivas de las propiedades funcionales del mismo.

Sólo se consideraron las propiedades funcionales relevantes identificadas en el modelo de confort de percepción, y los parámetros de cada una de ellas identificados como relevantes en el análisis de la percepción de las propiedades funcionales (Figura 70).

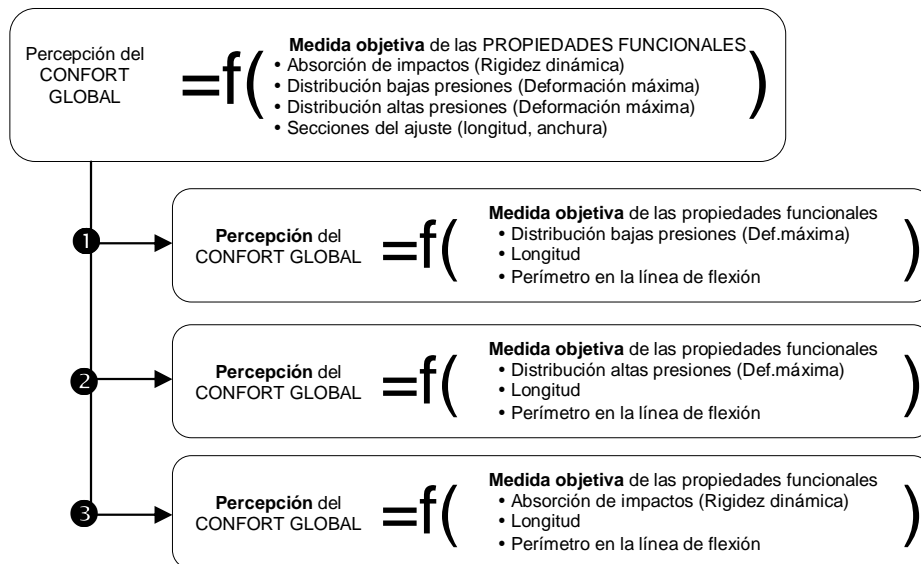


Figura 70. Modelo analizados de la percepción de confort del usuario a partir de la medida objetiva de las propiedades funcionales del calzado con maquinaria especializada

Los tres modelos analizados fueron encontrados significativos. A continuación se muestran los detalles de dichos modelos así como el resultado de su validación a partir de la medición de 5 zapatos (Tabla 36; Tabla 37; Tabla 38):

MODELO 1 DE CONFORT a partir de medidas objetivas de las propiedades funcionales	
Modelo lineal	Significatividad
$C_g = 22.206 + 1.119 * D_b - 12.061 * L_{hp} - 6.924 * M_{hp}$	Modelo $p < 0.005$
Donde:	
C_g = Percepción del confort global	CTE $p < 0.017$
D_b = Deformación máxima (mm) a bajas presiones	D_b $p < 0.007$
L_{hp} = Ratio Horma/Pie de longitud	L_{hp} $p < 0.048$
M_{hp} = Ratio Horma/Pie en el perímetro de la línea de flexión	M_{hp} $p < 0.037$
Calidad del ajuste $R^2 = 0.706$	

Tabla 36. Resumen del modelo de regresión obtenido relacionando la percepción del confort con la medidas objetiva de la DISTRIBUCIÓN DE BAJAS PRESIONES.

MODELO ② DE CONFORT a partir de medidas **objetivas** de las propiedades funcionales

Modelo lineal	Significatividad
$Cg = 16.672 + 0.414 * Da - 8.820 * Lhp - 4.676 * Mhp$	Modelo $p < 0.000$
Donde:	
Cg = Percepción del confort global	CTE $p < 0.090$
Da = Deformación máxima (mm) a altas presiones	Da $p < 0.017$
Lhp = Ratio Horma/Pie de longitud	Lhp $p < 0.043$
Mhp = Ratio Horma/Pie en el perímetro de la línea de flexión	Mhp $p < 0.023$
Calidad del ajuste $R^2 = 0.671$	

Tabla 37. Resumen del modelo de regresión obtenido relacionando la percepción del confort con la medidas objetiva de la DISTRIBUCIÓN DE ALTAS PRESIONES.

MODELO ③ DE CONFORT a partir de medidas **objetivas** de las propiedades funcionales

Modelo lineal	Significatividad
$Cg = 17.138 - 0.001 * A - 8.233 * Lhp - 4.761 * Mhp$	Modelo $p < 0.000$
Donde:	
Cg = Percepción del confort global	CTE $p < 0.000$
A = Absorción de impactos (Rigidez dinámica)	A $p < 0.003$
Lhp = Ratio Horma/Pie de longitud	Lhp $p < 0.010$
Mhp = Ratio Horma/Pie en el perímetro de la línea de flexión	Mhp $p < 0.001$
Calidad del ajuste $R^2 = 0.743$	

Tabla 38. Resumen del modelo de regresión obtenido relacionando la percepción del confort con la medidas objetiva de la AMORTIGUACION DE IMPACTOS.

En cuanto al resultado de la **validación de los modelos de confort** a partir de las medidas objetivas de las propiedades funcionales (Tabla 39):

CALZADO	Deformación máxima a bajas presiones (mm)	Deformación máxima a altas presiones (mm)	Absorción de impactos Rigidez dinámica (N/m)	Ajuste Ratio horma/ pie longitud	Ajuste Ratio horma/ pie anchura de la línea de flexión	CONFORT percibido por los usuarios
1	1.54	1.95	418.38	1.16	0.98	2.4
2	1.25	1.83	466.70	1.21	0.80	3.4
3	0.68	0.67	1535.85	1.18	1.02	1.8
4	1.72	3.69	279.39	1.18	1.02	2.8
5	1.18	1.76	479.26	1.26	1.02	1.6

Tabla 39. Resultados de los ensayos para la validación del modelo de de confort.

Y a continuación se muestran los resultados errores entre la percepción real y las predicciones de los modelos (Tabla 40; Figura 71).

CALZADO	CONFORT Predicción modelo 1	CONFORT Predicción modelo 2	CONFORT Predicción modelo 3
1	3.19	2.69	2.53
2	3.51	3.04	2.92
3	1.66	1.76	1.02
4	2.82	3.01	2.28
5	1.26	1.51	1.43
Error cuadrático medio	0.264	0.157	0.324
Error absoluto medio	0.126	0.091	0.189
Error absoluto medio normalizado (EN_{abs})	0.059	0.035	0.084
Sesgo Percibida -Predicha	-0.040	-0.001	0.166

Tabla 40. Resultados de la validación del modelo de confort a partir de las medidas objetivas de las propiedades funcionales.

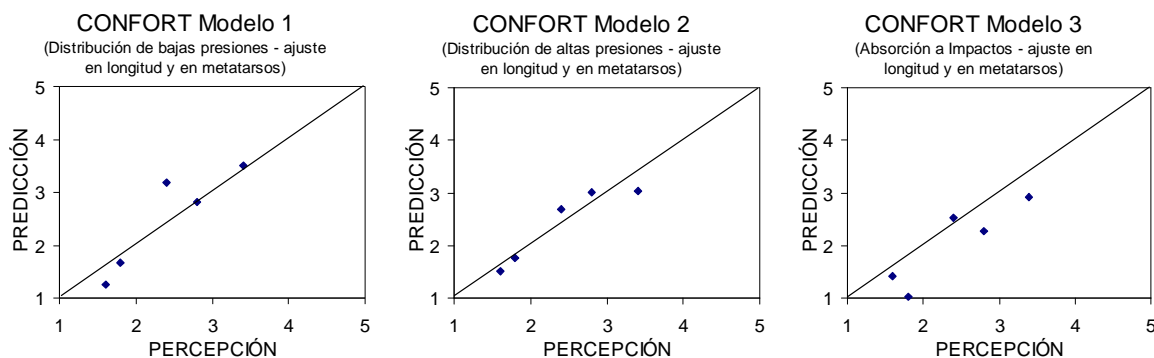


Figura 71. Relación entre la percepción del confort y la predicción del mismo obtenida a partir de las medidas objetivas de las propiedades funcionales.

Finalmente, en la aplicación informática se implementó el modelo 3 que incluye la absorción de impactos al ser el que mayor R^2 presentó.

8.2. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE LOS TEST DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES RELEVANTES PARA EL CONFORT

En este punto se muestran los resultados derivados del desarrollo de los modelos de los test de laboratorio que cuantifican las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado identificadas como relevantes para el confort (FASE 3). Los test de maquinaria modelados y validados corresponden a las siguientes propiedades funcionales:

- absorción de impactos
- distribución de altas presiones
- distribución de bajas presiones

En primer lugar se muestran los resultados correspondientes a la validación del módulo de caracterización mecánica, y a continuación los resultados correspondientes a la validación del modelo de predicción.

8.2.1. VALIDACIÓN DEL MÓDULO DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Para la validación del módulo de caracterización mecánica se llevaron a cabo ensayos con la maquinaria específica de cada test (absorción de impactos, distribución de altas presiones y distribución de bajas presiones) con cada uno de los componentes de los calzados de la muestra (7 plantillas y 5 suelas). Una vez obtenidos los resultados de los test mecánicos se aplicó el algoritmo de caracterización mecánica a cada material y se extrajo el nivel de ajuste de cada uno de los modelos matemáticos propuestos (11 modelos – ver apartado 7.3.1.1). Finalmente se llevó a cabo, para cada material, una ordenación de los modelos según el nivel de ajuste (R^2) alcanzado para identificar el modelo más óptimo de cada material.

Los resultados que se muestran son, para cada material ensayado:

- Nivel de ajuste (R^2) de los once modelos en cada uno de los tres test.
- Media del nivel de ajuste (R^2) de cada modelos en los tres test.

- Ordenación de los modelos matemáticos que mejor ajustaron en cada test para cada material ensayado.

A continuación se muestra los resultados del ajuste (R^2) de los modelos obtenidos para cada uno de los materiales utilizados, en cada test. La presentación de resultados muestra el nivel de ajuste alcanzado para los materiales de plantilla y suela para cada test (Tabla 41; Tabla 42; Tabla 43).

DISTRIBUCIÓN DE BAJAS PRESIONES

PLANTILLA	modelos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
black	0.937	0.981	0.980	0.974	0.350	0.996	0.955	0.955	0.955	0.972
green	0.934	0.988	0.987	0.005	0.227	0.996	0.943	0.943	0.943	0.956
grey	0.954	0.985	0.983	0.969	0.177	0.996	0.988	0.968	0.968	0.988
standard	0.936	0.976	0.976	0.953	0.195	0.996	0.953	0.953	0.953	0.967
907	0.936	0.970	0.968	0.957	0.235	0.996	0.956	0.956	0.956	0.961
908	0.976	0.989	0.989	0.986	0.064	0.998	0.986	0.986	0.986	0.986
909	0.903	0.980	0.974	0.916	0.920	0.996	0.916	0.916	0.916	0.916

SUELA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PU	0.971	0.999	0.999	0.971	0.971	0.996	0.971	0.971	0.000	0.971
TPU	0.939	0.968	0.966	0.970	0.970	0.998	0.970	0.970	0.000	0.989
S910	0.953	0.990	0.988	0.980	0.015	0.996	0.977	0.962	0.962	0.977
S911	0.969	0.998	0.997	0.972	0.008	0.996	0.971	0.971	0.971	0.971
S912	0.967	0.993	0.992	0.973	0.044	0.997	0.973	0.973	0.973	0.973

■ Mayor resultado obtenido para R^2 ; ■ Resultados de R^2 por encima de 0.9

Tabla 41. Media del ajuste (R^2) para la distribución de bajas presiones.

DISTRIBUCIÓN DE ALTAS PRESIONES

PLANTILLA	modelos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
black	0.921	0.966	0.964	0.957	0.273	0.998	0.957	0.957	0.957	0.975
green	0.922	0.974	0.972	0.953	0.183	0.998	0.953	0.953	0.953	0.972
grey	0.939	0.968	0.966	0.970	0.215	0.998	0.970	0.970	0.970	0.989
standard	0.922	0.971	0.968	0.949	0.169	0.998	0.948	0.948	0.948	0.960
907	0.903	0.973	0.968	0.925	0.925	0.998	0.925	0.925	0.925	0.928
908	0.944	0.965	0.963	0.996	0.034	0.998	0.979	0.979	0.979	0.996
909	0.858	0.983	0.966	0.876	0.896	0.996	0.876	0.876	0.876	0.884

SUELA	modelos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PU	0.931	0.999	0.998	0.932	0.004	0.986	0.932	0.932	0.932	0.933
TPU	0.962	0.996	0.994	0.967	0.966	0.997	0.966	0.966	0.000	0.968
S910	0.935	0.993	0.989	0.945	0.025	0.990	0.944	0.944	0.944	0.950
S911	0.954	0.995	0.995	0.976	0.978	0.993	0.971	0.958	0.958	0.961
S912	0.967	0.993	0.990	0.974	0.005	0.996	0.986	0.974	0.974	0.986

■ Mayor resultado obtenido para R²; ■ Resultados de R² por encima de 0.9

Tabla 42. Media del ajuste (R²) para la distribución de altas presiones.

ABSORCIÓN DE IMPACTOS

PLANTILLA	modelos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
black	0.784	0.839	0.877	0.959	0.851	0.977	0.937	0.830	0.848	0.825
green	0.861	0.869	0.902	0.915	0.533	0.373	0.408	0.903	0.910	0.064
grey	0.838	0.870	0.891	0.928	0.884	0.977	0.919	0.855	0.862	0.918
standard	0.622	0.888	0.886	0.694	0.241	0.997	0.693	0.693	0.000	0.697
907	0.667	0.653	0.699	0.870	0.435	0.927	0.499	0.864	0.888	0.208
908	0.736	0.890	0.890	0.933	0.868	0.912	0.901	0.815	0.849	0.901
909	0.636	0.705	0.712	0.749	0.484	0.985	0.493	0.754	0.810	0.199

SUELA	modelos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PU	0.729	0.902	0.898	0.797	0.520	0.967	0.736	0.736	0.736	0.813
TPU	0.715	0.953	0.937	0.782	0.540	0.993	0.729	0.729	0.736	0.860
S910	0.591	0.796	0.793	0.933	0.814	0.849	0.705	0.665	0.757	0.622
S911	0.643	0.894	0.871	0.812	0.407	0.967	0.839	0.733	0.788	0.920
S912	0.756	0.811	0.790	0.893	0.496	0.952	0.479	0.893	0.909	0.190

■ Mayor resultado obtenido para R²; ■ Resultados de R² por encima de 0.9

Tabla 43. Media del ajuste (R²) para la Absorción de impactos.

A continuación se muestra la media del ajuste (R²) de los tres test de cada modelo para cada uno de los materiales utilizados (Tabla 44; Figura 72; Figura 73).

MEDIA DEL AJUSTE (R²) DE LOS TRES TEST

PLANTILLA	modelos									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
black	0.880	0.928	0.940	0.964	0.491	0.990	0.950	0.914	0.920	0.924
green	0.906	0.944	0.954	0.625	0.314	0.789	0.768	0.933	0.935	0.664
grey	0.910	0.941	0.947	0.956	0.425	0.990	0.959	0.931	0.933	0.965
standard	0.826	0.945	0.943	0.865	0.202	0.997	0.865	0.865	0.634	0.875
907	0.835	0.865	0.879	0.917	0.532	0.974	0.793	0.915	0.923	0.699
908	0.885	0.948	0.947	0.972	0.322	0.969	0.955	0.927	0.938	0.961
909	0.799	0.889	0.884	0.847	0.766	0.992	0.762	0.849	0.867	0.666

SUELA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PU	0.877	0.967	0.965	0.9	0.499	0.983	0.88	0.88	0.556	0.906
TPU	0.872	0.973	0.966	0.906	0.825	0.996	0.888	0.888	0.245	0.939
910	0.826	0.926	0.923	0.952	0.285	0.945	0.875	0.857	0.887	0.85
911	0.855	0.962	0.954	0.92	0.464	0.985	0.927	0.887	0.906	0.951
912	0.897	0.932	0.924	0.947	0.182	0.982	0.813	0.947	0.952	0.716

■ Mayor resultado obtenido para R²; ■ Resultados de R² por encima de 0.9

Tabla 44. Media del ajuste (R²) para los tres test (Absorción de impactos, distribución de altas presiones, distribución de bajas presiones).

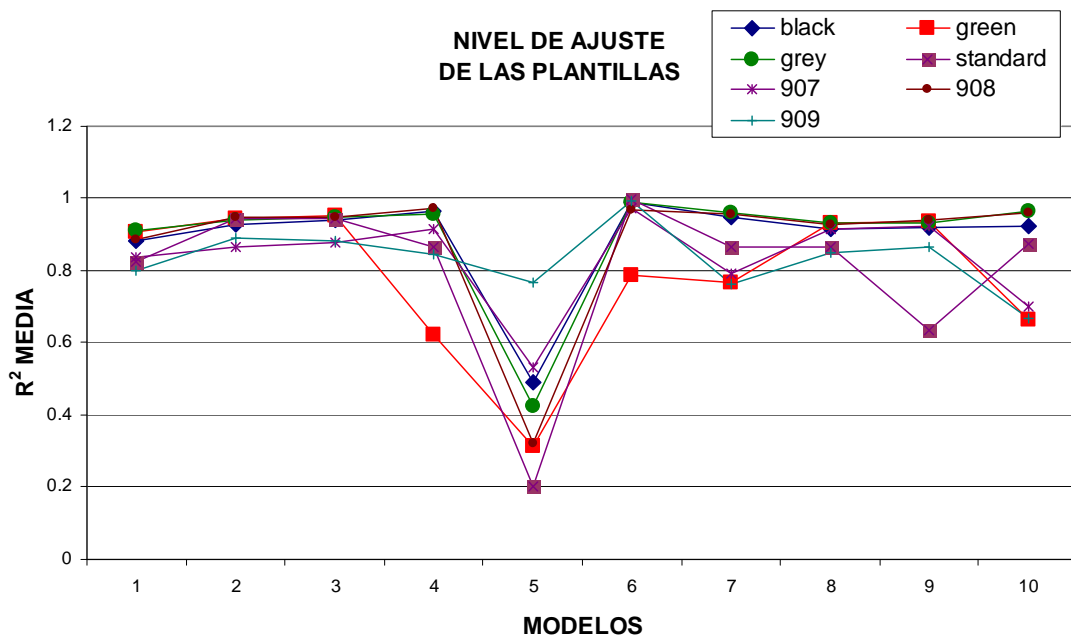


Figura 72. Media del ajuste (R²) para los tres test (Absorción de impactos, distribución de altas presiones, distribución de bajas presiones) de las plantillas.

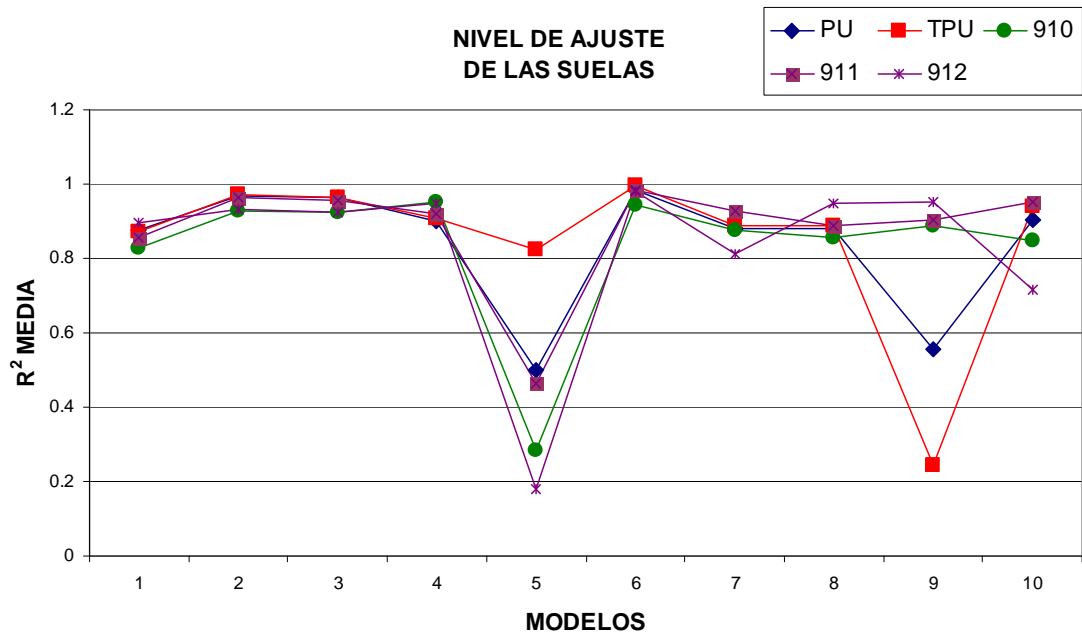
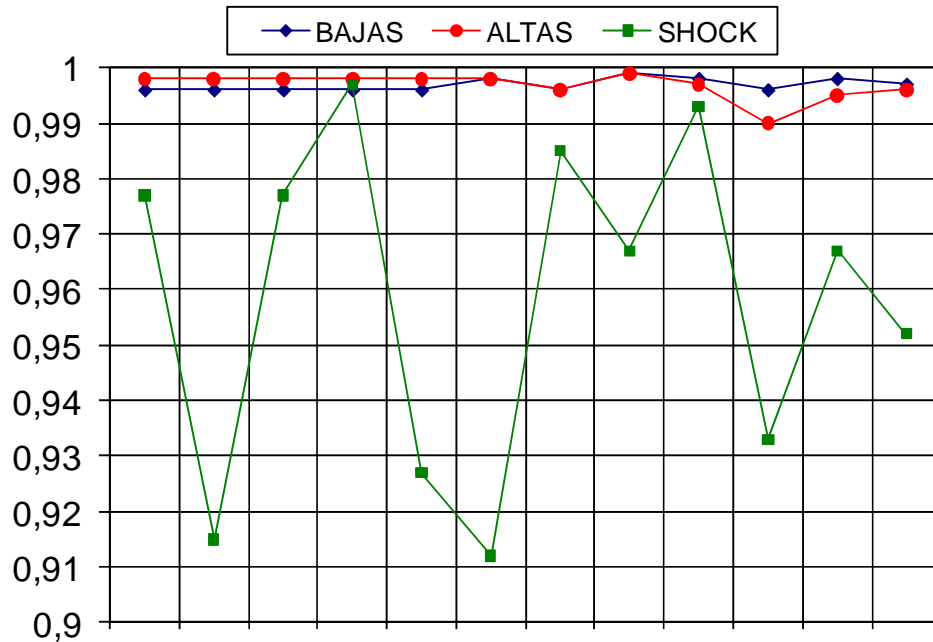


Figura 73. Media del ajuste (R^2) para los tres test (Absorción de impactos, distribución de altas presiones, distribución de bajas presiones) de las suelas.

Y finalmente se muestra los resultados de la ordenación de los modelos matemáticos que mejor ajustaron en cada test para cada material ensayado (Figura 74).

AJUSTE MÁXIMO ALCANZADO POR CADA MATERIAL EN CADA TEST



	Black	Green	Grey	Standard	P907	P908	P909	PU	TPU	S910	S911	S912
DISTR. BAJAS PRES	6	6	6	6	6	6	6	2;3	6	6	2	6
DISTR. ALTAS PRES.	6	6	6	6	6	1	6	2	6	2	2;3	6
ABS. IMPACTOS	6	4	6	6	6	4	6	6	6	4	6	6

Figura 74. Modelo con mejor ajuste para cada test (tabla) y nivel de ajuste alcanzado (R²) por los modelos (figura) para los materiales ensayados

Como se puede observar, el modelo 6 es el que mejor ajusta para:

- 9 de los 12 componentes testados en el test de absorción de impactos
- 8 de los 12 en el test de distribución de altas presiones
- 10 de los 12 en el test de distribución de bajas presiones.

8.2.2. VALIDACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN

Para la validación del módulo de predicción se desarrollaron, para cada uno de los test (absorción de impactos, distribución de altas presiones y distribución de bajas presiones), ensayos de maquinaria con 11 calzados de la muestra, así como ensayos virtuales siguiendo el algoritmo de predicción descrito. Tras ello se compararon los resultados y se extrajeron los errores entre las medidas reales y las predicciones virtuales.

A continuación (Figura 75; Figura 76; Figura 77; Tabla 45; Tabla 46; Tabla 47) se muestran los resultados de los ensayos con muestras reales de calzado, así como los ensayos virtuales a partir de los componentes modelados para cada uno de los tres test.

DISTRIBUCIÓN DE BAJAS PRESIONES		DEFORMACIÓN MÁXIMA (mm)	
ZAPATO	SUELA PLANTILLA	REAL	VIRTUAL
1	TPU-Black	1.17	1.29
2	TPU-Grey	1.55	1.82
3	PU-Green	1.40	1.82
4	PU-Standard	1.45	1.71
5	S910-P907	1.69	1.64
6	S910-P908	3.17	3.12
7	S910-P909	2.32	2.23
8	S911-P907	2.09	2.03
9	S911-P908	3.57	3.51
10	S912-P908	2.68	2.66
11	S912-P909	1.82	1.76

Tabla 45. Ensayos de distribución de bajas presiones reales y virtuales de cada calzado.

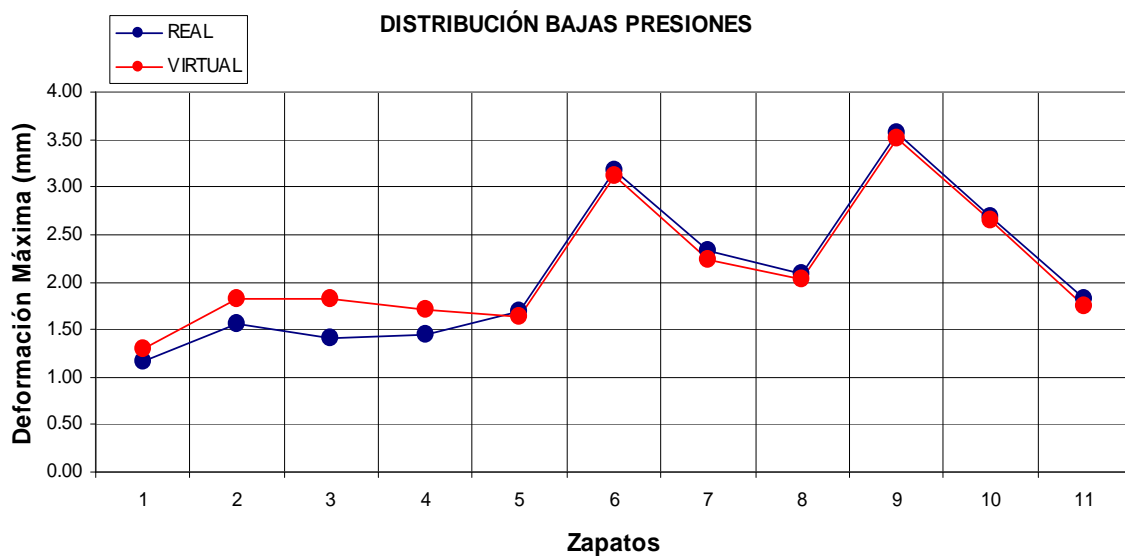


Figura 75. Ratios de Deformación máxima reales y virtuales de cada calzado obtenida en los ensayos de distribución de bajas presiones.

DISTRIBUCIÓN DE ALTAS PRESIONES		DEFORMACIÓN MÁXIMA (mm)	
ZAPATO	SUELA-PLANTILLA	REAL	VIRTUAL
1	TPU-Black	1.49	1.60
2	TPU-Grey	2.05	2.12
3	PU-Green	2.42	2.58
4	PU-Standard	2.14	2.42
5	S910-P907	2.53	2.33
6	S910-P908	4.25	4.28
7	S910-P909	3.10	3.42
8	S911-P907	3.50	2.76
9	S911-P908	5.22	4.36
10	S912-P908	3.31	2.68
11	S912-P909	2.15	2.06

Tabla 46. Ensayos de distribución de altas presiones reales y virtuales de cada calzado.

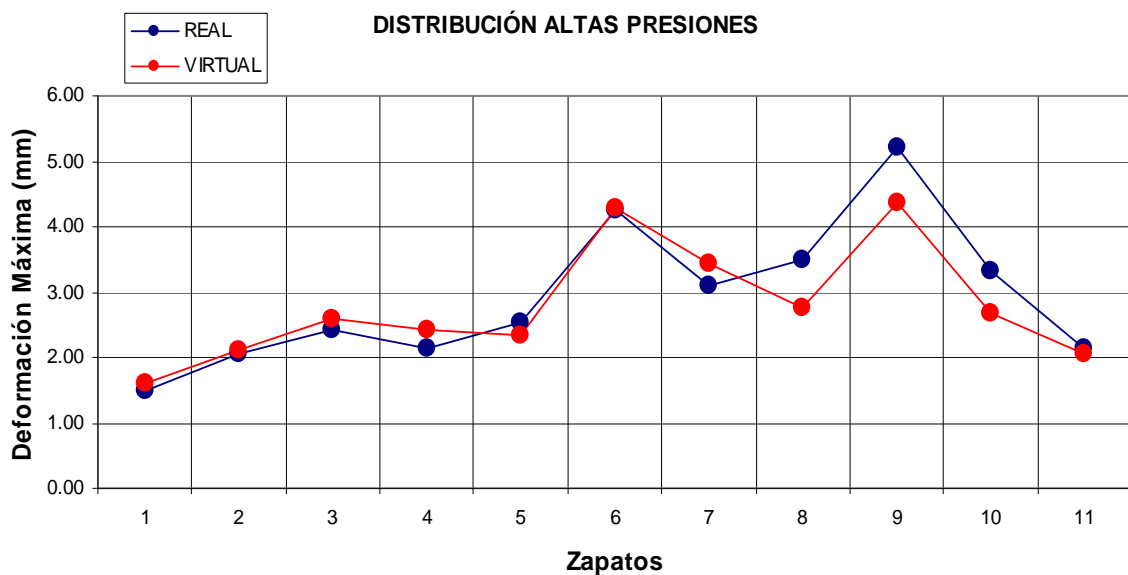


Figura 76. Ratios de Deformación máxima reales y virtuales de cada calzado obtenida en los ensayos de distribución de altas presiones.

ABSORCIÓN DE IMPACTOS		RIGIDEZ (N/mm)	
ZAPATO	SUELA PLANTILLA	REAL	VIRTUAL
1	TPU-Black	32027	56197
2	TPU-Grey	42192	58602
3	PU-Green	35165	50789
4	PU-Standard	54760	51840
5	S910-P907	87575	64574
6	S910-P908	52590	46595
7	S910-P909	63681	50361
8	S911-P907	104702	79018
9	S911-P908	56573	49976
10	S912-P908	55965	54215
11	S912-P909	79690	84080

Tabla 47. Ensayos de absorción de impactos reales y virtuales de cada calzado.

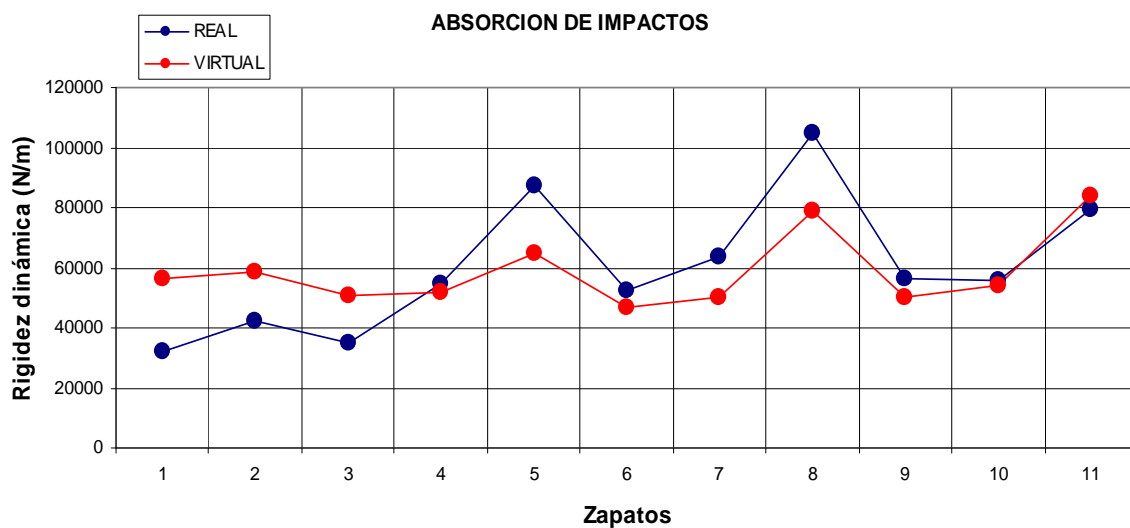


Figura 77. Rigidez reales y virtuales de cada calzado obtenida en los ensayos de absorción de impactos.

Finalmente, a continuación se muestran los resultados de las correlaciones Pearson y errores entre las medidas reales y las predicciones virtuales (Tabla 48).

CORRELACIONES Y ERRORES ENTRE LAS MEDIDAS REALES Y LAS PREDICCIONES VIRTUALES	Correlación de Pearson ($p < 0.001$)	Error cuadrático medio	Error absoluto medio	Error absoluto medio normalizado EN_{abs}	Sesgo R-V
DISTRIBUCIÓN DE BAJAS PRESIONES Deformación máxima	0.835	0.18 mm	0.13 mm	0.08	-0.06 mm
DISTRIBUCIÓN DE ALTAS PRESIONES Deformación máxima	0.932	0.42 mm	0.32 mm	0.10	0.14 mm
ABSORCIÓN DE IMPACTOS Rigidez dinámica	0.881	15297 N/m	12714 N/m	0.24	1697 N/m

Tabla 48. Correlaciones y errores entre las medidas reales y las predicciones virtuales.

Como se puede observar el test que menor error absoluto medio normalizado (EN_{abs}) genera es el de distribución bajas presiones (8%), seguido por el de distribución altas presiones (10%) y la amortiguación de impactos (24%).

8.3. APLICACIÓN INFORMÁTICA

En la aplicación informática se implementaron:

- Los módulos de los test virtuales de las cuatro propiedades funcionales implicadas en los modelos de confort: ajuste, distribución de altas y bajas presiones, y absorción de impactos.
- El módulo de confort que mayor variabilidad explicaba (con mayor R^2), que corresponde al modelo 3 (ver apartado 8.13.) con considera los parámetros de ajuste en longitud, anchura en la línea de flexión y la rigidez dinámica de la absorción de impactos.

A continuación se muestran y describen, en primer lugar la **pantalla principal** (Figura 78), y a continuación el resto de pantallas del interfaz del usuario de la aplicación informática desarrollada.

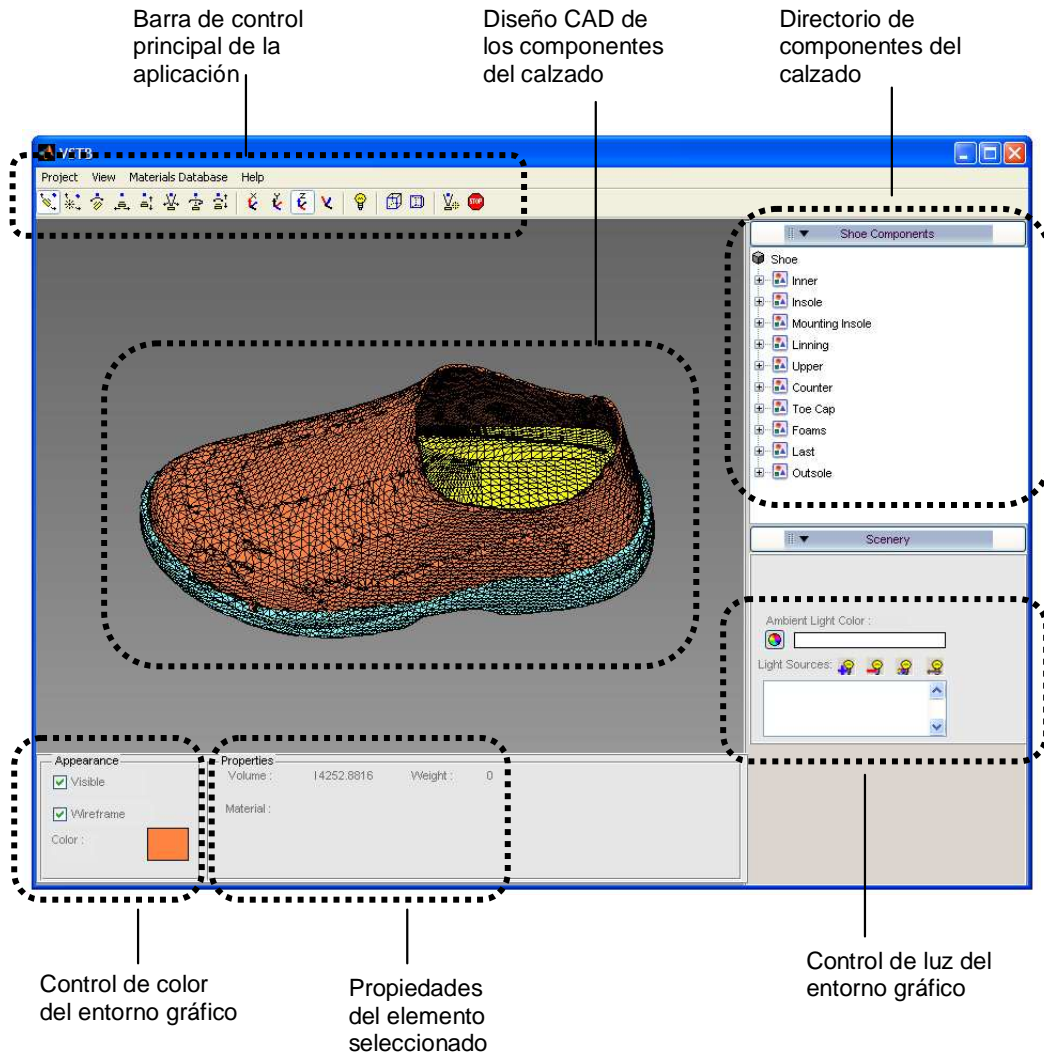


Figura 78. Pantalla principal de la aplicación informática

A continuación se muestran las distintas pantallas que se van abriendo secuencialmente en el asistente para evaluar las propiedades funcionales de un prototipo virtual.

- Pantalla de configuración de los factores y condiciones del entorno (Figura 79)

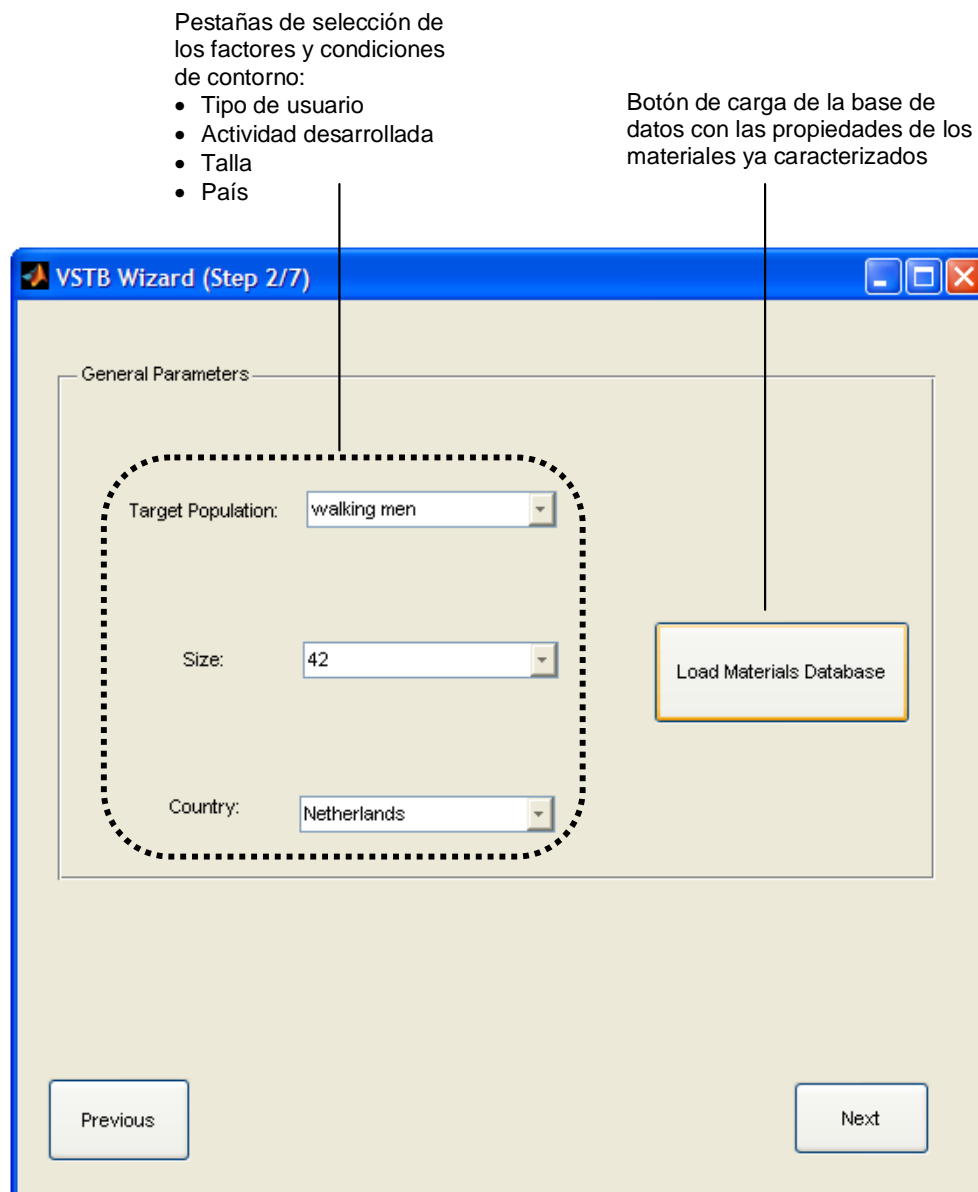


Figura 79. Pantalla del asistente en que se configura el usuario y las condiciones de uso.

- Pantalla de configuración de los test (Figura 80)

Geometría (espesores) de la suela, palmilla y plantilla:

- Entrada manual de la geometría
- Cálculo automático de al geometría

Materiales de la suela, palmilla y plantilla

Caracterización de los componentes de la suela

Caracterización de la población antropométrica a considerar

Figura 80. Pantalla del asistente en que se configuran los test de absorción de impactos y distribución de altas y bajas presiones identificando el material y el espesor, así como el test de ajuste definiendo los percentiles de cada sección para los que se quiere ajustar el calzado

- Pantalla de confirmación de que los parámetros escogidos son correctos, es decir, que existe suficiente información en las bases de datos para llevar a cabo los test configurados (Figura 81).

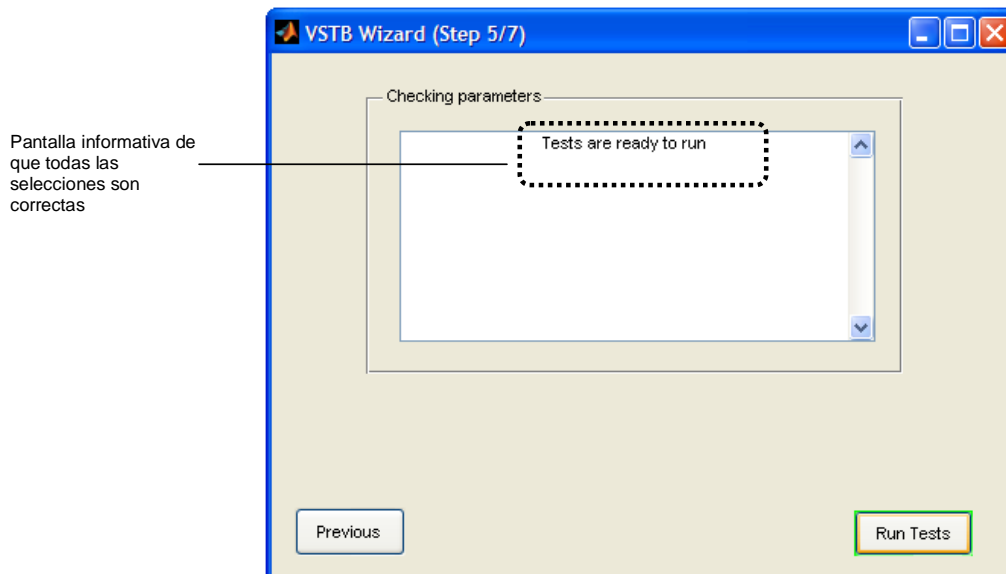


Figura 81. Pantalla del asistente en que se confirma que existe la información suficiente para efectuar los test

- Pantalla de resultados en la que se muestran tanto los resultados físicos de los test como el nivel de confort obtenido con dichas propiedades (Figura 82)

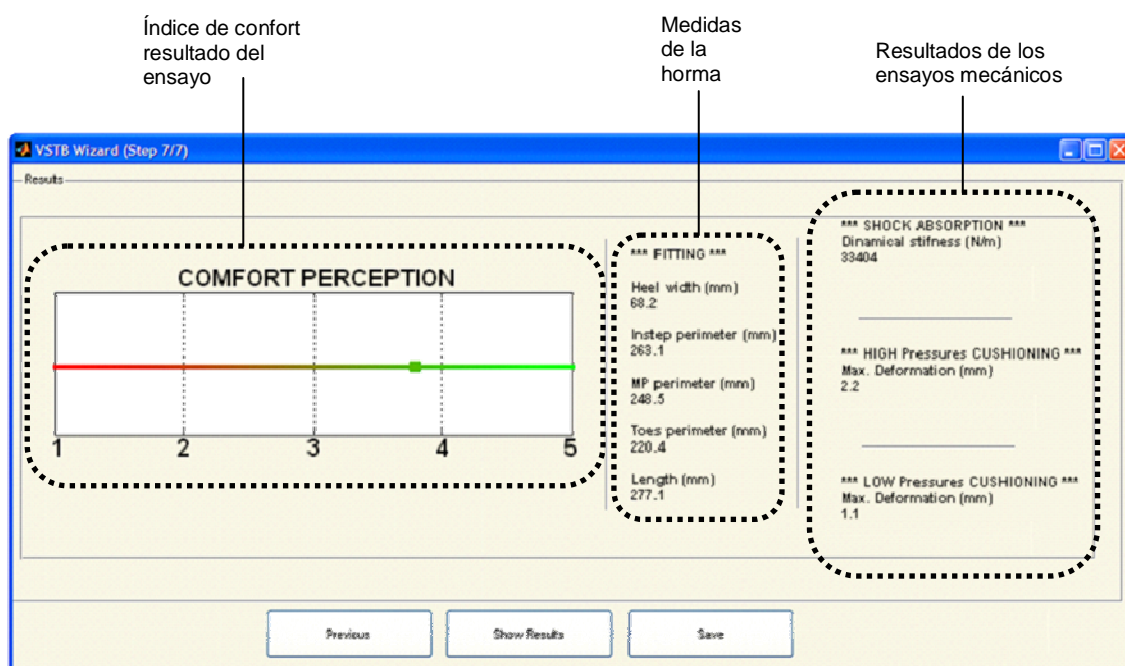
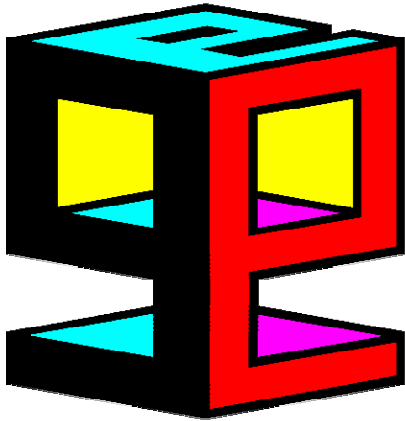


Figura 82. Pantalla del asistente en que se muestran los resultados de los test y la evaluación del confort efectuada.



9. DISCUSIÓN

En este apartado se discuten las aportaciones al estado del arte del trabajo desarrollado en esta tesis. Se comienza analizando las aportaciones más generales para, a continuación analizar el enfoque metodológico aplicado en la tesis y las aportaciones metodológicas alcanzadas durante su desarrollo.

A continuación, se analizan los factores y condiciones del entorno con influencia en el confort y las propiedades funcionales consideradas para la caracterización de la interacción usuario-calzado.

Más adelante, se discuten los resultados relativos a la percepción de confort global y su relación con la percepción de las propiedades funcionales que definen la interacción usuario-calzado, basándose en los resultados de los modelos de confort percibido y la relación entre las propiedades funcionales percibidas y las medidas mediante test de laboratorio.

Finalmente se analizan los resultados relativos a la modelización matemática de los test de laboratorio de las propiedades funcionales relevantes para el confort en el caso de estudio.

9.1. APORTACIÓN GLOBAL

El trabajo elaborado en esta tesis ha permitido avanzar tanto en el terreno científico-técnico como en el industrial. Por un lado se ha arrojado luz en el área del confort asociado al calzado y por el otro se ha desarrollado una nueva herramienta para el diseño de calzado capaz de mejorar el confort de los nuevos productos sin la necesidad de fabricarlos.

Específicamente, se han efectuado dos aportaciones principales al estado del arte que derivan directamente de la aplicación de un nuevo enfoque aplicado al estudio de la relación entre propiedades funcionales y confort, que considera la naturaleza multidimensional y subjetiva de la relación, y de la consideración de las características específicas (capacidades y necesidades) de los diseñadores como usuarios de la herramienta CAE.

A continuación se detallan dichas aportaciones principales.

9.1.1. ENFOQUE HOLÍSTICO

El análisis de la relación entre las propiedades funcionales y el confort percibido se llevó a cabo bajo un enfoque holístico, considerando en conjunto todas las propiedades funcionales que caracterizan la interacción entre usuario y calzado. A la luz del consenso existente entre los expertos acerca de la naturaleza multifactorial del confort, se consideró necesario abordar el estudio del mismo bajo un enfoque multidimensional, contemplándose todas las propiedades funcionales consideradas como relevantes en la bibliografía.

La mayoría de estudios en la bibliografía o bien se quedan en un análisis cualitativo de la importancia de las propiedades funcionales en el confort (Miller et al. 2000), o bien

se centran en muy pocas propiedades funcionales (que es el caso de la mayoría). Y de entre los que se centran en un nº reducido de propiedades funcionales (para el ajuste ver Witana et al. (2004); para distribución de presiones o la amortiguación de impactos ver Lange et al. 2009 y Witana et al. 2008), ninguno de ellos cuantifica la relevancia respecto a la percepción del confort global de la propiedad funcional que analiza.

Por tanto es la primera vez que se genera un modelo de confort considerando un conjunto completo de propiedades funcionales, cuantificando además la importancia de cada una de ellas en el confort percibido.

9.1.2. ENFOQUE CAE-CAT

Hasta el momento, las herramientas capaces de evaluar las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado exigen prototipos reales para poder ser ensayados mediante maquinaria especializada desarrollada específicamente a tal efecto. Dicha maquinaria es cara y exige de conocimientos científico-técnicos específicos, por lo que en la mayoría de los casos son inabordables para las empresas.

Por otro lado, los modelos virtuales existentes, capaces de llevar a cabo ensayos virtuales a partir de prototipos virtuales se basan en tecnologías de modelado que exigen tiempo y un alto grado de conocimientos científicos, por lo que las herramientas CAD existentes en el mercado para el diseño de calzados adolecen de la capacidad de evaluación funcional.

El trabajo desarrollado en esta tesis ha permitido probar la existencia y caracterizar la relación entre los parámetros de los test con maquinaria de las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado y la percepción de las mismas por parte de los usuarios. A partir de esta relación se ha llevado a cabo la modelización de los test virtuales de evaluación funcional desde una perspectiva CAE-CAT. Esta tecnología combina la potencia de ensayos reales para la caracterización de las propiedades de ciertas componentes del calzado clave para ciertas propiedades funcionales (p.ej. rigidez de los materiales de la suela) y de ensayos virtuales para la caracterización del comportamiento conjunto de los componentes, es decir, del calzado ya fabricado.

Por tanto, la aplicación de un enfoque CAE-CAT para el desarrollo de la aplicación informática resultado de la tesis, capaz de evaluar el confort final de un calzado a partir de un diseño CAD y sin la necesidad de fabricarlo, contando con un conocimiento de informática medio y un ordenador de sobremesa convencional, es la primera tecnología similar en el sector del calzado.

9.2. APORTACIÓN METODOLÓGICA

El trabajo desarrollado en esta tesis se divide en tres grandes bloques: un primer bloque de estudio del fenómeno de **interacción entre usuario y calzado**, otro de desarrollo de los **modelos de los test de las propiedades funcionales** que intervienen en esa interacción, y otro de desarrollo de la **aplicación informática**.

De manera global, la metodología aplicada ha permitido la generación de modelos de predicción del confort a partir de la cuantificación de las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado mediante test de máquina. Este resultado configura el

camino para el desarrollo de futuros modelos de confort para distintos usuarios y calzados en distintas condiciones de contorno.

A continuación, en primer lugar, se discuten las aportaciones del enfoque metodológico aplicado en cada una de las tres fases.

9.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LA INTERACCIÓN CALZADO-USUARIO Y SU RELACIÓN CON EL CONFORT PERCIBIDO

El primer bloque de trabajo fue la caracterización de la interacción entre el calzado y el usuario bajo ciertas condiciones de contorno y su relación con el confort percibido. El trabajo fue llevado a cabo bajo la hipótesis de que las características de factores y condiciones de contorno definen la importancia de las propiedades funcionales en el confort percibido.

Dicha caracterización de la interacción entre calzado y usuario se llevó a cabo en un proceso de reducción de la información. En primer lugar se identificaron todas las propiedades funcionales existentes en la interacción usuario-calzado a partir de un análisis del estado del arte, para a continuación, fijar unas determinadas características de los factores y las condiciones de contorno con el objetivo de reducir la variabilidad del fenómeno a estudiar.

Una vez identificadas las propiedades funcionales y fijados los factores y las condiciones de contorno, el análisis de la relación entre las propiedades funcionales y el confort percibido se abordó, en primer lugar, desde el punto de vista de la percepción del usuario. Este enfoque subjetivo permitió identificar cuáles son las propiedades funcionales relevantes para el confort para, a continuación, llevar a cabo un análisis objetivo de las mismas, a partir de medidas con maquinaria especializada en laboratorio.

Existe un trabajo (Witana et al. 2004) en el que se indica que un modelo de confort asociado al ajuste debería considerar el ajuste en todas las secciones relevantes del pie ponderadas por un valor que dependería de la sensibilidad del sujeto. En este estudio se pone de manifiesto la necesidad de considerar la subjetividad del sujeto a la hora de crear un modelo de confort. Sin embargo, en ninguno de los trabajos encontrados en la bibliografía, en los que se analiza las relaciones entre medidas subjetivas y objetivas de las propiedades funcionales y el confort, se aplica una aproximación similar para definir un set de propiedades funcionales relevantes para el confort global. Por contra, en los trabajos existentes, se parte de un grupo pre-establecido de propiedades funcionales y se analiza su influencia en el confort global o parcial de cada propiedad a partir de medidas (e.g Lange et al. 2009; Miller et al. 2000), sin llevar a cabo ningún tipo de discriminación respecto a la relación con el confort global percibido con el objetivo de desarrollar un modelo.

Por tanto, es una aportación de esta tesis la aplicación de dicho enfoque subjetivo/perceptivo para la identificación de las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado para el desarrollo de un modelo de confort.

9.2.2. MODELOS DE LOS TEST DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES

La modelización llevada a cabo de las propiedades de las componentes del calzado relacionadas con la **distribución de presiones o la absorción de impactos** considera la gran variabilidad en cuanto a tipologías de comportamiento de los materiales

existentes para las componentes de suela y plantilla. Aunque existen referencias en la bibliografía abordando la problemática de caracterización de las propiedades de los materiales en la interacción usuario-calzado (Witana et al. 2009), existen muy pocas referencias modelando dicho comportamiento mediante modelos matemáticos, estando todas las aportaciones centradas en la técnica de los elementos finitos.

En esta tesis se han modelado los materiales mediante modelos reológicos que, aunque conllevan una disminución en la resolución, aportan rapidez y sencillez de cálculo, características necesarias para asegurar la usabilidad de la aplicación informática por los usuarios con las características establecidas desde un principio.

Respecto a la medición del **ajuste**, en la tesis se plantearon en un principio las dos aproximaciones existentes en la bibliografía para la caracterización de esta propiedad funcional: la cuantificación de las presiones entre corte y dorso del pie (Jordan y Bartlett, 1995; Jordan et al.1997), y la cuantificación de las interacciones geométricas entre horma y morfología del pie (Witana et al. 2004; Goonetilleke et al. 2000). Se optó por la opción geométrica debido a la existencia de bases de datos y la existencia de tecnología suficiente para su cuantificación. La aproximación por presiones para una aplicación como la planteada en la tesis se consideró poco realista, ya que técnicamente no existen equipos comerciales versátiles capaces de ser utilizados con facilidad y no existen bases de datos con las que generar patrones de normalidad.

9.2.3. APLICACIÓN INFORMÁTICA

9.2.3.1. Lenguajes y formatos de archivos

La aplicación informática presenta dos tipos de archivos o programas informáticos para los que se escogieron distintos lenguajes de programación para su desarrollo que optimizan sus prestaciones.

Para el desarrollo de los algoritmos de computación (Módulos de caracterización de las propiedades del calzado, Módulos de predicción de las propiedades funcionales, Módulos de predicción del confort percibido), así como para el desarrollo del Interfaz de usuario, se escogió como plataforma de programación el MATLAB. El lenguaje informático desarrollado para esta plataforma, si bien presenta como inconveniente que la rapidez de procesado no es muy elevada, es muy versátil y permite desarrollar algoritmos fácilmente, ofreciendo muchas posibilidades gráficas que faciliten el desarrollo de interfaces gráficas de interacción con los usuarios. Por otra parte, las tareas de los algoritmos implementados que más capacidad de computación exigen son las relacionadas con la obtención de modelos de materiales, y gracias a la tipología de modelos escogidos (reológicos), el MATLAB posee potencia suficiente para las tareas de computación de la aplicación.

Las bases de datos implementadas se desarrollaron en Microsoft EXCEL 2002 y archivos de texto “.txt”. El objetivo en este caso era asegurar que los ordenadores donde fuera a implementarse la aplicación informática (ordenadores de los diseñadores y fabricantes) permitieran la manipulación de estos ficheros para complementarlos con nuevos datos que alimentaran las bases de datos. Por tanto, se escogieron dichos formatos por estar ambos ampliamente extendidos en el mercado.

9.2.3.2. Interfaz de usuario y usabilidad

La acogida industrial de una nueva aplicación informática para facilitar el trabajo diario de una empresa muy a menudo es pobre debido a la complejidad de uso de la misma. Se ha de considerar que el calzado es un sector en el que la mayoría de las empresas presenta un nivel tecnológico limitado, siendo muy a menudo difícil introducir nuevos protocolos de trabajo basados en las nuevas tecnologías.

Con el objetivo de asegurar la facilidad de uso de la aplicación informática por parte de sus usuarios potenciales, se implementó un interfaz de usuario con dos partes principales (Figuras 77-87): una pantalla principal de control desde la que se puede acceder a todas las funciones, dirigida a usuarios acostumbrados a manejar aplicaciones informáticas, y un asistente de evaluación y mejora de los diseños que guía a los usuarios no versados en el uso de aplicaciones informáticas, de manera que les permite usar el programa de manera muy intuitiva y sencilla

9.3. TAMAÑO DE LAS MUESTRAS: ANÁLISIS POST-HOC DE LA POTENCIA DE TEST

En los estudios previos (Mündermann et al., 2002; Au y Goonetilleke, 2007; Witana et al. 2004; Witana et al., 2003; Witana et al. 2009; Langte et al. 2009; Milani et al., 1997), analizando la influencia del calzado en la percepción de distintos aspectos de la interacción usuario-calzado del usuario, el número de sujetos utilizados en la investigación varía desde 9 a 27 usuarios (Tabla 49).

ESTUDIO	Nº SUJETOS	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA sexo; edad (años); peso (kg); altura (cm)	CONDICIONES DE ESTUDIO (tipos de calzado ensayados)
Lange et al, 2009	15	15 Hombres; 20.07 (± 1.1) años; 74.53(± 4.71) kg; 176.8(± 3.63) cm;	3 Calzados militares (botas)
Witana et al 2009	16	16 Hombres; [20, 35] años	3 Superficies para caminar
Au y Goonetilleke 2007	20	20 Mujeres; 30 (± 7.3) años; 51.7(± 76.6) kg	4 Calzados de señora
Witana et al 2004	20	20 Hombres	4 Calzados de vestir
Witana et al 2003	20	20 Hombres; [19, 21.4] años; [52, 84] kg	3 Calzados de vestir
Mündermann et al. 2002	9	5 hombres y 4 mujeres; 26.7(± 4.9) años; 71.7(± 8.5) kg; 171.2(± 7.1) cm;	4 Calzados de correr
Miller et al. 2000	18	12 hombres y 6 mujeres	3 Calzados de correr
Milani et al. 1997	27	27 Hombres; [27, 31] años; 179 (± 4.5) cm	8 Calzados de correr

Tabla 49. Muestra de sujetos considerada en distintos estudios de la percepción del confort y las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado

Existe gran variabilidad intrínseca en los procesos perceptivos, dependiente de las condiciones de ensayo y la población considerada en el estudio, que exige un número de sujetos necesario que permita obtener una potencia de test suficiente para extraer relaciones entre las variables consideradas. Por otra parte, se ha de considerar que el objetivo de esta tesis no es caracterizar la respuesta de una población cubriendo toda la variabilidad existente, sino realizar una primera aproximación para identificar la respuesta de los usuarios frente a su interacción con el calzado.

Con todo, según Cohen (1988), la potencia estadística de **regresiones lineales** se puede determinar post-hoc a partir del tamaño de la muestra y la R^2 obtenida. Este método de cálculo permite obtener, dada una Potencia de test considerada como suficiente, la R^2 mínima detectable en una regresión lineal. En cuanto a la potencia estadística de **correlaciones de Pearson**, y también según Cohen (1988), el número de datos necesarios para obtener una potencia de test de entre 0.8 y 0.9 es calculable a partir del coeficiente de correlación que se considere mínimo, y a la inversa, el coeficiente de correlación mínimo detectable es calculable a partir del número de datos para una potencia de test de entre 0.8 y 0.9.

En esta tesis se efectuaron dos diseños de experimentos:

- uno para el desarrollo de modelos de confort (apartado 7.2) en los cuales se contó con una muestra de 20 sujetos y 20 calzados (todos los sujetos evaluaron la percepción de todos los calzados en la muestra, y todos los calzados de la muestra fueron evaluados mediante ensayos objetivos de maquinaria)
- otro para el desarrollo de modelos matemáticos de las propiedades funcionales (apartado 7.3) que contó con una muestra de 11 calzados.

Asumiendo la necesidad de tener una potencia de test de al menos 0.8, y aplicando las tesis de Cohen (1988), para el primer diseño de experimentos la R^2 mínima detectable como significativa es de 0.3 para las **regresiones lineales simples** (1 variable explicativa, como las efectuadas en las regresiones relacionando variables objetivas de los test de maquinaria y subjetivas de la percepción del usuario), y 0.41 para las **regresiones lineales múltiples** (con 3 variables explicativas, como las efectuadas en los modelos de confort).

Para el caso de las **regresiones no lineales**, se adoptó una solución ajustada a las necesidades en cada caso:

- En el **modelo potencial** de la percepción de la amortiguación de impactos a partir de la rigidez dinámica el caso es similar al de las regresiones lineales simples al ser un modelo linealizable simplemente tomando logaritmos a ambos lados.
- En el **modelo cuadrático** de la percepción del Ajuste en la línea de flexión, a partir de la relación horma-pie en dicha sección, la situación es similar al de una regresión lineal múltiple con 2 variables explicativas. En este caso, la R^2 mínima detectable como significativa es de 0.36 para potencias de test de al menos 0.8.

Por otro lado, para el segundo diseño de experimentos el **coeficiente de correlación de Pearson** mínimo detectable para tener una potencia de entre 0.8 y 0.9 es de 0.7 para las comparativas entre las medidas reales y virtuales de las propiedades funcionales del calzado, y de 0.4 para las comparativas entre los parámetros de las medidas objetivas de distintas propiedades funcionales relevantes para el confort (Tabla 50).

ANÁLISIS	PARÁMETROS DEL ESTUDIO	TEST	VALORES SIGNIFICATIVOS MÍNIMOS DETECTABLES *
Modelos de confort a partir de la medida de las propiedades funcionales (prop. func. subjetivas apartados 8.1.1; prop. func. objetivas apartados 8.1.3)	20 calzados 3 variables explicativas	Regresión lineal múltiple	Potencia = 0.8 $R^2 = 0.41$
Modelos de la percepción de las propiedades funcionales a partir de la medida objetiva (apartado 8.1.2)	20 calzados 2 variables explicativas	Modelo cuadrático Modelo potencial (linealizando)	Potencia = 0.8 $R^2 = 0.36$
Modelos de la percepción de las propiedades funcionales a partir de la medida objetiva (apartado 8.1.2)	20 calzados 1 variable explicativa	Regresión lineal	Potencia = 0.8 $R^2 = 0.3$
Modelos virtuales de los test de maquinaria de las propiedades funcionales (apartado 8.2.2)	11 calzados	Correlación de Pearson	Potencia = [0.8,0.9] Coef.Corr = 0.7
Relación entre parámetros de medidas objetivas de las propiedades funcionales relevantes para el confort (apartado 9.6.3)	20 calzados	Correlación de Pearson	Potencia = [0.8,0.9] Coef.Corr = 0.4

(*) El valor significativo mínimo detectable de R^2 significa que por debajo de ese valor los resultados no tienen la potencia de test que se indica

Tabla 50. Valores mínimos detectables en los análisis estadísticos para una potencia de test mayor o igual que 0.8. En todos los casos el nº de datos corresponde al nº de calzados considerados en el análisis

Todos los resultados de este trabajo muestran valores por encima del mínimo detectable definidos en la Tabla 50, lo que valida el tamaño escogido para las muestras según los objetivos perseguidos.

9.4. FACTORES Y CONDICIONES DE CONTORNO RELACIONADOS CON LA PERCEPCIÓN DEL CONFORT

Como se ha comentado, a partir de la bibliografía se analizaron los factores y condiciones de contorno considerados como relevantes para el confort del usuario. Este análisis permitió acotar el trabajo de la tesis para la consecución de sus objetivos. Respecto al **usuario**, son importantes aspectos tanto físicos como psicológicos. Aspectos físicos del usuario son, entre otros, el género, la raza, la edad, la talla, sus capacidades sensoriales, su condición física, las patologías, etc. Aspectos psicológicos relevantes son, por ejemplo, las preferencias estéticas o perceptivas, o la permeabilidad frente a la moda. Tras la valoración de todos estos aspectos, el trabajo desarrollado en esta tesis consideró los aspectos físicos, asumiendo los aspectos psicológicos como parte de la variabilidad intrínseca del sujeto. Específicamente, se consideraron el género, la edad y la talla, ya que son estos aspectos los que, para los diseñadores, determinan las características de un determinado modelo de calzado de calle.

Por otra parte, la **desestimación de los aspectos psicológicos** del usuario conlleva una pérdida de potencia en la capacidad de predicción del modelo. Sin embargo, la alta variabilidad intrínseca de cada sujeto en cuanto a sus preferencias estéticas es evidenciada en la gran variedad estética existente en el calzado de calle, así como en el rápido ratio de renovación de las colecciones (menor a 3 meses). Todo ello unido a la falta de herramientas actuales capaces de analizar dichas variables psicológicas antes de que cambien, llevó a la asunción de la inclusión de la componente psicológica como un reto de futuro.

Finalmente, se definió, como caso de estudio, un perfil de usuario determinado: hombre adulto de entre 20 a 60 años de la talla 42. El rango de edad fue definido para cubrir la edad adulta de un ser humano, evitando los primeros momentos de desarrollo de la marcha humana (que se acepta que culmina su desarrollo alrededor de los 15 años) y la etapa posterior de la tercera edad. La talla 42 fue seleccionada por ser la talla base en la que trabajan los diseñadores.

En cuanto a la tipología de **calzado**, la tesis se centró en el estudio de calzado urbano casual considerado desde un punto de vista amplio. La elección vino determinada tanto por el objetivo de intentar cubrir un amplio rango de distintas construcciones de calzado (bajo el paraguas de calzado casual entran muchos y diferentes diseños), como por la intención de considerar un tipo de calzado que ha tenido en los últimos años una amplia difusión en el mercado.

En general, los modelos de calzado casual cerrado de hombre, salvo excepciones muy raras, poseen características geométricas bastante similares. En este sentido, la característica que presenta mayor variación es el sistema de cierre, pudiendo ser de muy distintos tipos (p.ej. mocasín, acordonado, velcro, etc.). Esta característica influye de forma notable en el ajuste, por lo que se consideró una muestra representativa de los distintas tipologías de cierre en el mercado. Además, las propiedades mecánicas de los materiales de los componentes, tanto de las suelas y plantillas, como del corte, también tienen una importante influencia en las propiedades funcionales del calzado,

por lo que, de manera similar, la muestra de estudio escogida cubre los distintos tipos de suelas, plantillas y cortes existentes.

Por otro lado, se excluyeron calzados con tipologías constructivas o propiedades mecánicas de sus materiales susceptibles de modificar el patrón de marcha de manera sistemática (p.ej. tacones excesivos).

En cuanto a las **condiciones de contorno**, el análisis expuso la gran cantidad de factores que pueden afectar a la interacción usuario-calzado y, por ende, al confort percibido por el usuario. Se estructuraron en tipología de superficie, actividad desarrollada durante el uso del calzado y condiciones ambientales de temperatura y humedad. Las condiciones de contorno aplicadas en el trabajo de esta tesis vinieron impuestas por el escenario global escogido: un entorno de tienda de calzado en el que el usuario efectúa una prueba de calce para comprobar el confort de un determinado modelo de zapato. Este escenario se caracteriza por unas determinadas condiciones como son una superficie dura y limpia (con ausencia de contaminantes), unas condiciones ambientales no severas (alrededor de 25°C y a cubierto) y una actividad consistente en una prueba de calce de entre 5 a 10 minutos (bipedestación alternada con pequeños episodios caminando). Las condiciones de contorno específicas que se escogen condicionan los resultados de las pruebas desarrolladas, ya que marcan la relevancia de las propiedades funcionales analizadas en el confort percibido por los usuarios. Por ejemplo, el confort térmico fue una de las propiedades funcionales que resultaron irrelevantes para el confort, debido a la poca estimulación que presenta dicha propiedad bajo las condiciones de contorno características de un entorno de tienda. Lo mismo ocurrió con la fricción, ya que las superficies de las tiendas no presentan condiciones estimulantes para dicha propiedad, como la presencia de contaminantes que reduzcan la fricción.

9.5. PROPIEDADES FUNCIONALES RELEVANTES PARA EL CONFORT Y TEST DE MEDIDA OBJETIVA

Las propiedades funcionales asociadas al calzado son resultado de la experiencia acumulada durante muchos años de investigación en biomecánica, fisiología y podología. En general, sirven para estudiar el efecto que el entorno tiene sobre el usuario de calzado para facilitar una marcha confortable, estimulando sensorialmente y evitando dolores o incluso posibles lesiones a corto y largo plazo.

El análisis del conocimiento existente permitió identificar como relevantes para satisfacer las necesidades de confort de los usuarios las siguientes propiedades funcionales: ajuste, flexibilidad, absorción de impactos, fricción, distribución de presiones y confort térmico. Además el estudio reveló la existencia de unanimidad en cuanto a los test de laboratorio para la cuantificación objetiva de las propiedades funcionales existentes en Europa.

9.6. DESARROLLO DEL MODELO DE PERCEPCIÓN DEL CONFORT

Como se ha comentado anteriormente, para el desarrollo del modelo de confort se efectuó una aproximación sucesiva a la problemática en tres pasos. En primer lugar se analizó la relación entre la percepción que los usuarios tienen de las distintas

propiedades funcionales y del confort. Esto permitió extraer las propiedades funcionales relevantes para el confort percibido. A continuación se analizó la relación entre la percepción de dichas propiedades funcionales relevantes y su medida objetiva. Para ambos enfoques se pusieron a punto metodologías de análisis (cuestionarios para la percepción subjetiva, y ensayos con maquinaria especializada para la medida objetiva) para caracterizar las propiedades funcionales de la interacción de los usuarios con el calzado. Esto permitió obtener los parámetros relevantes en la cuantificación de las propiedades funcionales. Finalmente se obtuvo el modelo de confort extrayendo la relación entre dichos parámetros objetivos relevantes y el confort global percibido.

A continuación se discuten los resultados de los tres análisis descritos en el párrafo anterior.

9.6.1. RELACIÓN ENTRE LA PERCEPCIÓN DE LOS USUARIOS DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES Y DEL CONFORT

Los resultados (apartado 8.1.1) muestran que más del 80% (R^2 de 0.81) de la percepción global del confort de los usuarios puede explicarse mediante la percepción de la dureza de la suela delantera, la percepción del ajuste en longitud y la percepción del ajuste en la sección de la línea de flexión. Si se intercambia la percepción de la dureza delantera por la percepción de la dureza trasera, el porcentaje de varianza explicado desciende hasta explicar alrededor de un 50% de la varianza (R^2 de 0.52), y de forma similar ocurre si se intercambia por la amortiguación (R^2 de 0.53).

Este resultado sugiere que, para el caso del estudio planteado en la tesis, las propiedades funcionales más importantes en la valoración del confort son el ajuste, la distribución de presiones y la amortiguación. El resultado es consistente con Mündermann et al (2002) al demostrar que los usuarios son capaces de percibir distintas propiedades funcionales asociadas a distintas percepciones del confort, yendo más allá al cuantificar la influencia de la percepción de cada propiedad funcional en el confort. El estudio de Mündermann et al (2002) se centra en calzado deportivo de correr, por lo que otra aportación de esta tesis es hacer extensiva esta conclusión al calzado casual de calle.

Por otra parte, comparando con la relación entre propiedades funcionales medidas objetivamente mediante maquinaria y medidas a través de la percepción de los usuarios, el resultado es coherente con el estudio de Miller et al. (2000) acerca de la relación entre el confort percibido y las propiedades medidas objetivamente mediante maquinaria especializada en que el ajuste parece ser el aspecto crítico para la percepción de confort, unido a otras variables mecánicas como el acolchamiento. Además, en concordancia con los resultados de Miller et al. (2000) , este resultado sugiere que para que un calzado sea aceptado como confortable no basta con asegurar una de las propiedades funcionales, sino que se han de satisfacer ciertos límites perceptivos de distintas propiedades funcionales conjuntamente.

Considerando individualmente las propiedades funcionales del modelo, los resultados sugieren que la influencia de la percepción del **ajuste** varía inversamente tanto para el ajuste en longitud como para el ajuste en anchura, mostrando ambas una relación inversamente proporcional con el confort percibido (cuanto más ajustado menos

confort). Por un lado, el hecho de que sean estas dos variables las que están relacionadas con el confort está respaldado por la experiencia de fabricantes, al coincidir con el hecho de que sean las dos variables que los aparatos utilizados para cuantificar el ajuste han considerado tradicionalmente (Goonetilleke et al. 2000). Por otra parte, los resultados no concuerdan con los de Mündermann et al. (2002), que no obtienen datos significativos con respecto al ajuste. La causa parece estar en que su diseño de experimentos (específicamente su muestra de calzados) no estimulaba suficientemente esta propiedad funcional.

Considerando la percepción del **ajuste en longitud**, el resultado es coherente con la noción de que un calzado no debe apretar nunca en longitud y que por tanto el ajuste suelto es preferido antes que apretado. Este resultado es coherente con el estudio de Witana et al. (2004) que sugiere una correlación positiva (0.22 $p < 0.01$) entre el confort asociado al ajuste global percibido y el espacio libre para los dedos.

En cuanto a los resultados respecto a la influencia del **ajuste en la sección de la línea de flexión**, se ha de considerar que las mayores variaciones de tamaño del pie a lo largo del ciclo normal de marcha se dan en anchura, a lo largo de la sección de flexión (Peet, 1988). Además, las diferencias entre las medidas del pie y las hormas, por criterios estéticos principalmente, suelen ser mayores en la anchura de la zona delantera del calzado. El resultado es coherente con el estudio de Witana et al. (2004) que muestra una correlación positiva (0.35 $p < 0.01$) entre confort asociado al ajuste global y confort asociado al ajuste en la zona delantera del pie. De igual forma es coherente con el estudio de Au y Goonetilleke (2007), en el que encuentran que la región de la articulación metatarsofalángica es una de las zonas más relacionadas por los usuarios con el confort del calzado, siendo el ajuste en esta región preferido como adecuado o suelto antes que apretado.

Para las otras tres variables que conforman las tres variaciones de modelo de confort obtenidas (**percepción de la dureza de la suela delantera, de la dureza de la suela trasera y de la amortiguación de impactos**) los resultados muestran una relación directa con el confort: cuanto más blando sea o más amortigue el material de la suela mayor será el confort percibido. El resultado es coherente con el estudio de Mündermann et al. (2001; 2002) donde se indica la importancia en la percepción del confort de la dureza de la suela tanto en la zona del talón como en la zona delantera. Al igual que en los resultados de la tesis, los resultados de dicho estudio sugieren que cuanto más blando sea el material de la suela mayor confort es percibido. Aunque los aspectos psicológicos no se contemplan en esta tesis, este resultado concuerda con el obtenido por Alcántara et al. (2005) en la aplicación del diferencial semántico a la percepción de calzado de calle. En su estudio encuentra que las percepciones de "amoldable", "blando", "cómodo", "suave", y "rígido" se alinean en el mismo eje semántico del "confort", lo que indica que son conceptos fuertemente asociados por el usuario.

Por otra parte, el resultado del análisis muestra que existen tres variables asociadas a la dureza de la suela capaces de formar un modelo de confort (aunque con distintas capacidades predictivas). Esto sugiere que la percepción de las propiedades funcionales consideradas no son independientes entre sí, existiendo solapamientos en la percepción del usuario. Así, existe una alta correlación (Tabla 51) entre la percepción

de la dureza de la suela delantera (utilizada para cuantificar la percepción de la distribución de bajas presiones) y la percepción del usuario de la dureza de la suela trasera y la absorción de impactos que concuerda con los resultados del análisis.

	PERCEPCIÓN DUREZA SUELA DELANTERA	PERCEPCIÓN DUREZA SUELA TRASERA	PERCEPCIÓN AMORTIGUACIÓN IMPACTOS
DUREZA SUELA DELANTERA (Percepción)	---	0.794 (p<0.000)	- 0.768 (p<0.000)
DUREZA SUELA TRASERA (Percepción)		---	- 0.702 (p<0.000)
AMORTIGUACIÓN IMPACTOS (Percepción)			---

Tabla 51. Correlaciones entre las percepciones de flexión, amortiguación de impactos y la distribución de altas y bajas presiones

Este resultado sugiere que, con respecto al confort, el usuario tiende a relacionar la evaluación de la absorción de impactos y la distribución de presiones, percibiéndolas en parte como similares. Este resultado, unido a los resultados del estudio de Witana et al. (2009) que sugieren que la percepción de las propiedades mecánicas de la suela delantera influyen en la percepción de las propiedades mecánicas de la suela trasera y viceversa, justifica la necesidad de una aproximación global en el estudio de la influencia del diseño del calzado en el confort percibido como la efectuada en esta tesis, en el sentido de considerar la influencia de distintas propiedades funcionales conjuntamente, que permita analizar las relaciones entre ellas además de las relaciones con el confort.

Los resultados sugieren que estas variables son sustitutivas en el modelo de predicción, siendo la percepción de dureza de suela delantera la variable que mayor capacidad de predicción (mayor R2) aporta al modelo. Además, el que sea la variable referida a la dureza de la suela delantera la que muestra mayor capacidad de predicción concuerda con los resultados del estudio de Mündermann et al. (2002), donde se sugiere que la percepción del acolchamiento en la zona delantera del pie induce mayores diferencias en el confort que en la zona trasera, aunque estas diferencias son pequeñas (Figura 83).

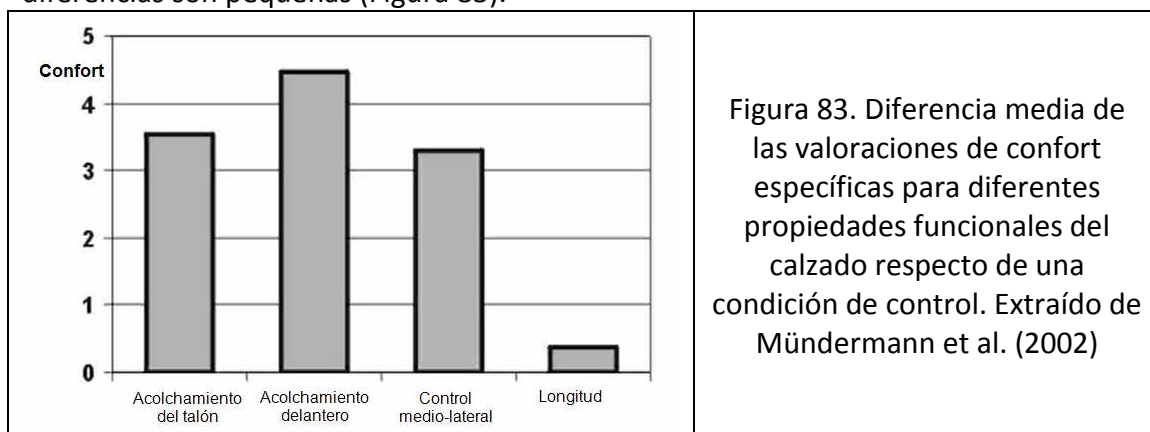
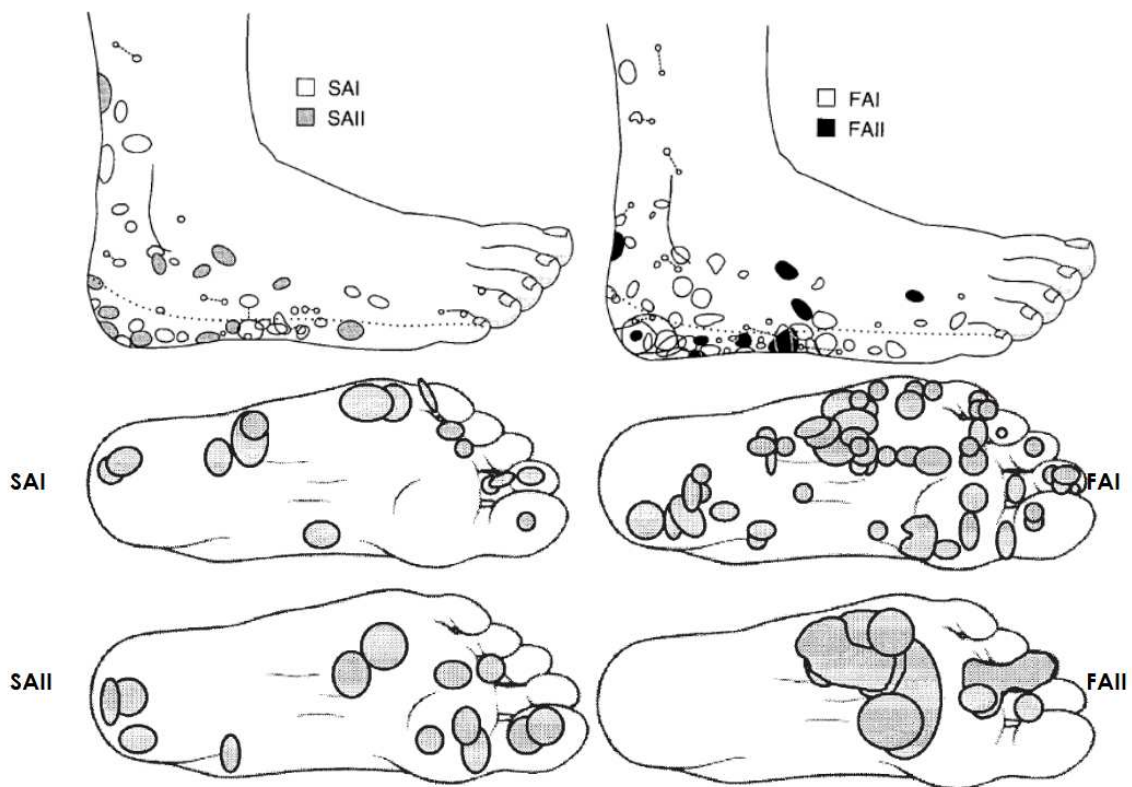


Figura 83. Diferencia media de las valoraciones de confort específicas para diferentes propiedades funcionales del calzado respecto de una condición de control. Extraído de Mündermann et al. (2002)

Por otro lado, el hecho de que la percepción de la dureza de la suela delantera sea la variable que mayor capacidad de predicción ofrece de las tres variables (absorción de impactos, dureza suela delantera, dureza suela trasera), puede tener una justificación en el protocolo de captación de estímulos sensoriales que se lleva a cabo durante la prueba en tienda del calzado. Estudios llevados a cabo sugieren una alta concentración de mecano-receptores en la zona delantera del pie (Kennedy y Inglis, 2002) (Figura 84), lo que capacitaría mejor esta zona para la percepción de las propiedades mecánicas de la suela.



SA I	SA II	FA I	FA II
Discos de Merkel	Corpúsculos de Ruffini	Corpúsculos de Meissner	Corpúsculos de Pacini
Adaptación lenta	Adaptación lenta	Adaptación rápida	Adaptación rápida
Discriminación estática de formas, ejes y texturas gruesas.	Tienen un supuesto rol en la propiocepción	Vibraciones de baja frecuencia (30–50 Hz)	Vibraciones de alta frecuencia, probablemente transmitidas al esqueleto.

Figura 84. Distribución espacial de los mecanoreceptores y sus áreas receptoras en la planta del pie de adultos (Kennedy and Inglis, 2002), en el lado lateral y dorsal del pie (Trulsson, 2001), y su supuesto rol en la percepción táctil (Purves et al, 2001)

Esto concuerda con el estudio de González et al. (1999) sobre los diferentes niveles de sensibilidad a las presiones en la planta del pie en el que se sugiere que la zona trasera de la planta del pie es mucho más resistente a la presión que la zona delantera, mucho más sensible (Figura 85).

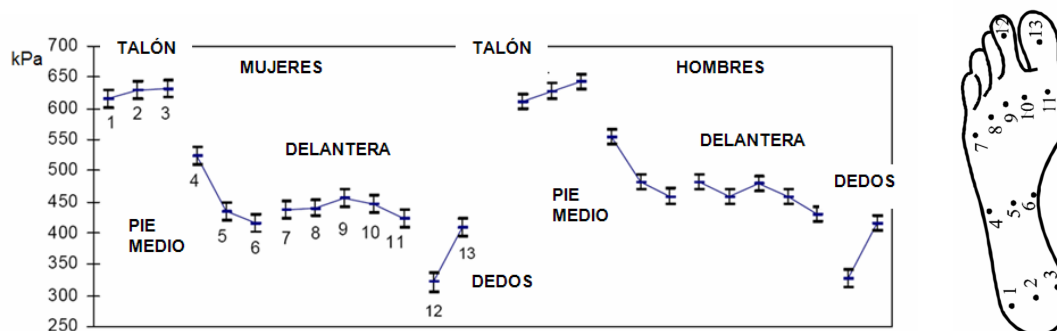


Figura 85. Límite de presiones para la percepción del dolor en distintas zonas de la zona plantar. González et al. (1999)

Además, se ha de considerar la influencia del proceso de percepción, que no depende sólo de la inervación de mecanorreceptores en la piel, sino también de la capacidad de los usuarios de estimularlos. Así, cuando a un usuario se le pregunta por la percepción de la dureza de la suela delantera, éste es capaz de mover el pie delantero y los dedos dentro del calzado, con las limitaciones que supone, y estimular la percepción de esta manera para poder generar un juicio. Sin embargo, cuando se le pregunta por la percepción de la absorción de impactos o la dureza de la suela trasera, prácticamente sólo puede estimular su percepción caminando un poco, y no moviendo la parte trasera del pie dentro del calzado, pues por un lado las articulaciones de la zona trasera del pie no presentan tanto rango de movimiento como las de la zona delantera del pie y, por el otro, el ajuste entre calzado y la zona trasera del pie es mucho más firme que entre la zona delantera del pie y el calzado. Por tanto, la mayor capacidad sensorial y mayor capacidad de estimulación de la zona delantera del pie permite percibir mucho mejor las propiedades funcionales relacionadas con las características mecánicas de los materiales de la suela del calzado (absorción de impactos y distribución de presiones).

Finalmente, el hecho de que no todas las propiedades funcionales queden representadas en el modelo obtenido de percepción del confort parece deberse a las características del caso de estudio elegido para la tesis, en el que no se estimularon lo suficiente.

La **flexión**, propiedad funcional que en principio parece que debería ser relevante, no lo es en este caso. Este resultado coincide con los resultados del estudio de Lange et al. (2009) que sugieren que el confort no está relacionado con la rigidez a flexión del calzado utilizado.

De forma análoga, los resultados sugieren que la percepción de la **fricción** no es significativa para la predicción del confort percibido por los usuarios a causa quizás de que los calzados de la muestra seleccionada presentaban unos coeficientes de fricción similares y, por lo tanto, no se estimularon diferencias en la percepción. El resultado es

coherente con el estudio llevado a cabo por Zamora et al. (2008) en el que no se encontraron diferencias asociadas al confort al caminar sobre una muestra de pavimentos de distinta rugosidad que cubría un amplio rango de coeficientes dinámicos de fricción.

Finalmente, el **confort térmico**, aspecto que en otras ocasiones sería claramente relevante, no es significativo bajo las condiciones ambientales de este estudio. Bajo un clima más extremo, por ejemplo con temperaturas bajo cero o temperaturas muy altas y humedad alta, esta propiedad funcional obtendría una mayor notoriedad en la predicción del confort asociado al calzado (González, 2007).

Considerando las variables asociadas al ajuste, la sección del **talón** no muestra relación significativa con el confort. Este resultado no sorprende pues se trata de una sección en la que el pie no experimenta apenas cambio de forma durante el ciclo de marcha (Witana et al., 2004; Luximon et al., 2003), al contrario que en el caso de la sección de la línea de flexión, por lo que el ajuste es básicamente estático al no sufrir apenas variaciones durante el ciclo de marcha (sí que existen ciertas variaciones, debidas al tejido blando del talón, esto es la almohadilla del talón, que sí que expande, pero es una zona que depende en general más de la morfometría de la plantilla que de la horma, siendo además una zona donde la sensibilidad a la compresión es más reducida por tratarse principalmente de tejido graso (Chu & Yazdani-Ardakani, 1986) y no comprometer estructuras sensibles al dolor como tendones o ligamentos). Esto, unido a que la variabilidad morfológica en la población de usuarios de esta zona es menor, y a que la rigidez del calcáneo no produce grandes variaciones morfológicas a lo largo del ciclo de marcha, permite a los fabricantes diseñar hormas que en general ajustan mucho mejor al pie en esta zona (Cheng and Perng 1999) que en las otras secciones consideradas, justificando la baja relación entre la percepción de los usuarios en esta sección y la percepción del confort.

Por otra parte, los resultados son coherentes con los obtenidos por Au y Goonetilleke (2007), que no obtienen resultados significativos en la relación entre confort/disconfort en estas regiones para calzados de tacón.

De igual forma, la percepción del ajuste en la sección del **empeine** no queda incluida en el modelo de confort. Este resultado se podía esperar en el caso de estudio analizado en esta tesis debido a los distintos tipos de cierre que la muestra de calzados seleccionada contiene (mocasines, acordonado, velcro, etc.). El ajuste en esta sección está muy influenciado por la capacidad de regulación del sistema de cierre del calzado, por lo que se permitió a los usuarios regular el cierre a su gusto con el objetivo de asegurarse que los usuarios se calzaban de manera normal a como lo hacen habitualmente, y no influir en su percepción imponiendo un determinado nivel de ajuste en el empeine. Por otra parte, en sus estudios, Witana et al. (2004) encuentran una relación en el mediopié (prácticamente a la altura del empeine) entre percepción de la preferencia de ajuste y medición del ajuste, quizás debido a que consideran la anchura (y no el perímetro) y a que la muestra de calzado que utilizan es homogénea en cuanto al tipo de sistema de cierre. Por tanto, retrospectivamente, la opción de considerar la anchura de esta sección en lugar del perímetro podría haber generado resultados significativos entre la percepción del ajuste y el confort, ya que no parece

tan dependiente del nivel de apriete del cierre. Por otra parte, Au y Goonetilleke (2007) no encuentran resultados significativos respecto a la percepción del ajuste en esta zona, quizás debido a que se trata de calzado de tacón de señora y este aspecto es, aun si cabe, menos crítico en ese caso, aunque los autores los asocian a la capacidad de regulación del sistema de cierre.

Igualmente, la **sección de los dedos** no aparece representada en el modelo de confort. Las causas de la baja capacidad de predicción a pesar de la significatividad pueden ser principalmente dos. Por un lado, esta sección presenta una alta variabilidad morfológica entre sujetos lo que hace que la variabilidad aumente. Por otra parte, el diseño de las punteras de calzado, elemento del mismo que define el ajuste de la zona de dedos, es muy sensible a la moda en el calzado de calle, aunque sobre todo en calzado de mujer, y quizás no fueran lo suficientemente diferentes en la muestra seleccionada para estimular la percepción del ajuste en esta sección.

9.6.2. RELACIÓN ENTRE LA PERCEPCIÓN Y LA MEDIDA OBJETIVA DE LAS PROPIEDADES FUNCIONALES RELEVANTES PARA EL CONFORT

Se analizó la relación de la percepción de los usuarios de las distintas propiedades funcionales identificadas como relevantes para el confort comparándola con la medida objetiva a partir de los test de laboratorio. Específicamente se analizaron las siguientes relaciones (Tabla 52):

Percepción subjetiva	Test objetivo
Ajuste en longitud	Amortiguación de impactos
Ajuste en anchura	Ajuste en la línea de flexión
Dureza de suela delantera	Distribución de bajas presiones
Dureza de suela trasera	Distribución de altas presiones

Tabla 52. Variables subjetivas y objetivas analizadas de la propiedades funcionales

De forma global, los resultados (apartado 8.1.2) muestran una capacidad de predicción significativa para las cuatro relaciones analizadas. Por otra parte parece que las propiedades funcionales relevantes para el confort en las que la percepción tiene menos relación con la medida objetiva son las relativas a la distribución de presiones, quizás por la dificultad de comprensión del concepto por parte de los usuarios.

A continuación se discuten los resultados de cada una de las propiedades funcionales del calzado.

9.6.2.1. Relación entre la medida subjetiva y objetiva del ajuste

Para la valoración de la relación entre las medidas objetivas y subjetivas del ajuste se consideraron las dos secciones del pie relacionadas con el confort: la sección longitudinal y la articulación metatarsofalángica o línea de flexión.

Para la medida del ajuste en la línea de flexión se consideró el perímetro como medida, y no la anchura. La razón radica en que, por su naturaleza, se consideró el pie como un volumen cambiante a lo largo del ciclo de marcha, que exige un tratamiento de la forma para cuantificar el ajuste con el volumen interno del calzado. Un tratamiento unidimensional, como, por ejemplo, el de Witana et al. (2004) o Miller et al. (2000), simplifica más aún la propiedad del ajuste lo que supone una pérdida de información mayor.

Por otra parte, en esta tesis se consideró el ratio horma/pie y no la diferencia horma-pie (Witana et al. 2004; Miller et al. 2000), porque el ratio adimensionaliza la medida, lo que permite relacionar resultados entre diferentes tallas.

Respecto a la relación entre la medida y la percepción del ajuste, las medidas consideradas de la horma (Longitudinal y Línea de flexión) muestran relaciones significativas entre las medidas objetivas y la percepción (apartado 8.1.2, Tabla 35). Este resultado es coherente con los resultados obtenidos por Witana et al. (2004), que encontraron una alta correlación entre la percepción del ajuste en puntos distintos de la antropometría del pie y las diferencias dimensionales entre horma y pie de la región del pie delantero y del pie medio.

Los resultados muestran que casi la mitad de la percepción de ajuste en **longitud** es predecible a partir del ratio entre las medidas de la horma y el pie en longitud (R^2 de 0.47). Los resultados muestran que cuanto mayor es la diferencia de longitud entre la horma y el pie, el calzado es percibido como más holgado en largo. Esto es coherente con el hecho de que dentro de una misma talla (p.ej. la talla 42, que ha sido la escogida para este estudio), existe una buena percepción del nivel de ajuste, a pesar del filtro que impone la talla.

Los resultados sugieren un caso similar para la **línea de flexión** en cuanto a la relación entre la medida objetiva y subjetiva (R^2 de 0.51). Esta es la sección que mayor variación de forma sufre durante el ciclo de marcha y por ello debe ser en la que más se percibe el ajuste del calzado. La variación en anchura que experimenta el pie en esta sección consiste en una expansión del pie en sentido lateral, desde el 1^{er} meta hacia el 5^o meta (Olaso et al. 2007) que causa un mayor apriete en la zona lateral (cabeza del 5^o metatarso), principalmente durante la fase de propulsión y despegue. Este mayor apriete justifica la capacidad de percepción de los usuarios en esta sección. Además, este resultado concuerda con los resultados de la bibliografía: parece ser que es la zona delantera del pie donde mayor relación existe entre las medidas objetivas y subjetivas del ajuste del calzado (Witana et al. 2004)

9.6.2.2. Relación entre la medida subjetiva y objetiva de la distribución de presiones

El parámetro de deformación máxima de los test de distribución de altas presiones y de distribución de bajas presiones presenta una baja capacidad de predicción (R^2 de 0.387 y 0.361 respectivamente) coherente con la alta dispersión alrededor de las líneas ajustadas.

Al contrario que en el caso de la amortiguación de impactos, que parecen ser comprendidos por los usuarios en mayor medida, el concepto de distribución de presiones parece más difícil de comprender. Existen distintas causas que pueden estar influyendo en este resultado.

Por un lado, la dificultad de comprensión del concepto fuerza a modificar la pregunta que se hace a los usuarios para cuantificar la distribución de presiones. En esta tesis, con el objetivo de facilitar dicha comprensión por parte de los usuarios, se pidió que cuantificaran la dureza del material de la suela en distintas partes del calzado (dureza trasera para altas presiones y dureza delantera para bajas presiones). El hecho de cambiar la pregunta puede estar influyendo negativamente en los juicios perceptivos realizados.

Por otro lado, el resultado puede deberse también en parte a que los test utilizados en la tesis para cuantificar la distribución de presiones simulan peor la realidad que, por ejemplo, los test de flexibilidad o de absorción de impactos. El fenómeno simulado por el test, esto es la distribución de presiones del calzado, es una propiedad dinámica, que varía constantemente a lo largo del tiempo durante la marcha, pero que también es cuantificada por el usuario en bipedestación, moviendo el pie dentro del calzado y tanteando la superficie de la plantilla con la planta del pie. Simular este proceso es bastante complicado por lo que en el laboratorio se opta por aplicar una carga de presiones de similar magnitud y velocidad de aplicación.

Además, existe un factor que el test de distribución de presiones no considera que es la anatomía de la plantilla que puede haber influido aumentando la variabilidad en la percepción y en la medición de laboratorio.

Resumiendo, los resultados sugieren que la distribución de presiones es un aspecto complicado de medir de la interacción con el usuario, influenciado por diversos aspectos, entre ellos la capacidad de deformación máxima medida con los test de distribución de presiones aplicados en esta tesis.

Finalmente, la no significatividad en la relación entre la percepción y el ratio de energía absorbida es coherente con el resultado de absorción de impactos previamente comentado. Además es coherente con los resultados del estudio de Goonetilleke (1999) en el que sugiere que el ratio de energía absorbida no es importante para la absorción de impactos en la zona trasera del pie.

9.6.2.3. Relación entre la medida subjetiva y objetiva de la Amortiguación de impactos

La amortiguación de impactos muestra que la percepción es predecible, obteniéndose unos resultados bastante aceptables (R^2 de 0.54), siendo la rigidez dinámica un parámetro con una capacidad de predicción de la percepción de absorción de impactos del calzado de más del 50%.

Respecto a la asociación de energía, la no significatividad de los resultados es coherente con el resultado de distribución de presiones previamente comentado.

Por otra parte, la relación obtenida entre la percepción de la absorción de impactos y la medida objetiva de la rigidez dinámica es logarítmica. Esto sugiere que a partir de una determinada rigidez límite (alrededor de 1000 N/mm) la percepción apenas cambia con el aumento de rigidez dinámica.

9.6.3. RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS OBJETIVOS RELEVANTES PARA EL CONFORT Y LA PERCEPCIÓN DEL CONFORT GLOBAL

El estudio de las relaciones entre los parámetros relevantes para la cuantificación objetiva de las propiedades funcionales y la percepción del confort global dio como resultado la existencia de un modelo del confort global percibido en el que las propiedades objetivas referidas a la absorción de impactos y la distribución de altas y bajas presiones son sustitutivas.

Los resultados (apartado 8.1.3) muestran que alrededor del 70% (R^2 de 0.706) del confort percibido global se puede predecir a partir de las medidas objetivas de la deformación máxima del material alcanzada durante el ensayo de la distribución de bajas presiones y de los ratios de ajuste horma/pie en longitud y en el perímetro de la línea de flexión. Intercambiando la deformación máxima de la distribución a bajas presiones por la deformación máxima de la distribución a altas presiones se obtiene un segundo modelo significativo que explica una varianza de alrededor del 67% (R^2 de 0.671) y cambiándola por la rigidez de la amortiguación de impactos se obtiene un tercer modelo cuya varianza explicada pasa a ser de cerca del 74% (R^2 de 0.743).

De nuevo al igual que en el caso del modelo a partir de la percepción de las propiedades funcionales, el hecho de que las tres propiedades (distribución de bajas presiones, distribución de altas presiones y absorción de impactos) aparezcan como sustitutivas en los modelos de confort sugiere que **las medidas de las distintas propiedades funcionales no son independientes entre sí**. Así, los resultados de las correlaciones calculadas para los resultados de los test objetivos de las tres variables muestran resultados altos de correlación (Tabla 53).

	DISTRIBUCIÓN DE BAJAS PRESIONES	DISTRIBUCIÓN DE ALTAS PRESIONES	AMORTIGUACIÓN IMPACTOS
DISTRIBUCIÓN DE BAJAS PRESIONES (Deformación máxima)	---	0.851 (p<0.001)	- 0.937 (p<0.001)
DISTRIBUCIÓN DE ALTAS PRESIONES (Deformación máxima)		---	- 0.827 (p<0.000)
AMORTIGUACIÓN IMPACTOS (Rigidez dinámica)			---

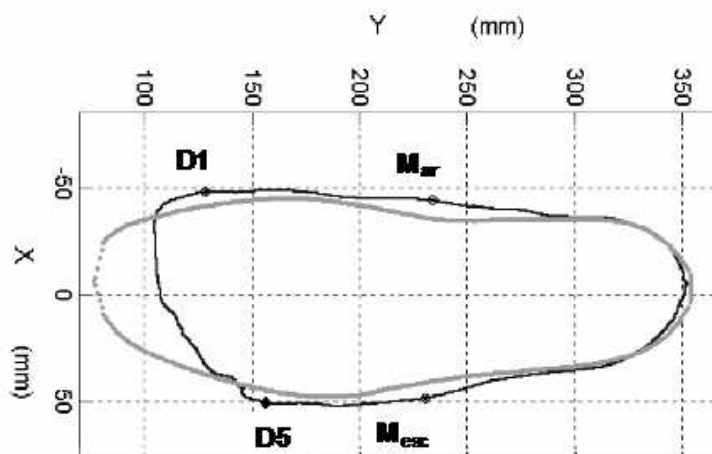
Tabla 53. Correlaciones entre las medidas objetivas de amortiguación de impactos y la distribución de altas y bajas presiones

El hecho de que las medidas de la amortiguación de impactos y las distribuciones de bajas y altas presiones estén correlacionadas puede deberse a que los test de laboratorio correspondientes cuantifican medidas basadas en las propiedades mecánicas del material, y lo único que diferencia los protocolos de los test de laboratorio son la velocidad y magnitud de aplicación de la carga, así como el parámetro que se extrae de la curva Fuerza-deformación obtenida, que en cada caso varía.

Este resultado es coherente con las correlaciones entre la percepción de estas propiedades funcionales encontradas mencionadas antes. Por otra parte, se ha de destacar que dichas correlaciones son mayores en las medidas objetivas (los parámetros) que en las medidas subjetivas (las percepciones). Este hecho muestra que existe una variabilidad intrínseca en la percepción del sujeto de las propiedades funcionales que es mayor que la variabilidad de los test de las mismas propiedades funcionales, lo cual concuerda con la mayor similitud de las varianzas explicadas entre los modelos de confort a partir de las propiedades objetivas que a partir de las percibidas (Tabla 51).

En cuanto a las variables asociadas al **ajuste**, las tres variaciones de modelo obtenidas como significativas consideran el ajuste en longitud y en la sección en la línea de flexión. Coincidiendo con los resultados del modelo de confort a partir de la percepción de las propiedades funcionales, las tres variaciones de modelo sugieren que para ambos parámetros de medida del ajuste, el ratio horma/pie en longitud y el ratio horma/pie en el perímetro de la sección de la articulación metatarsofalángica, un mayor apriete va en perjuicio del confort.

Con respecto a la **sección de la línea de flexión**, el resultado es coherente con el resultado de Witana et al. (2004), que sugiere que el aumento de la holgura en la zona delantera del pie va a favor del aumento del confort relativo al ajuste, existiendo entre ambos una relación lineal (Tabla 54).



MODELOS del confort asociado al ajuste en la zona delantera del pie

MODELO 1 $Cd = 0.434 * (D1+D5)+3.7$
 $R^2 = 0.82$

MODELO 2 $Cd = 0.758 * D1+3.9$
 $R^2 = 0.91$

Cd = Confort asociado al ajuste en la zona delantera del pie

$D1$ = Distancia entre horma y pie en el lateral del 1er dedo

$D5$ = Distancia entre horma y pie en el lateral del 5º dedo

Mar = Distancia entre horma y pie en el lateral del arco

$Mesc$ = Distancia entre horma y pie en la zona medial a la altura del escafoides del 5º metatarsiano

Tabla 54. Modelos de la percepción del confort asociado al ajuste (adaptado de Witana et al. 2004)

Pero además, el resultado de esta tesis confirma que el **ajuste en longitud** es relevante para el confort percibido. La diferenciación de preferencia en el ajuste por secciones encontrada en esta tesis es relevante desde el punto de vista del diseño de calzado, pues muestra la necesidad de diferenciar zonas del pie a la hora de valorar el ajuste. En el estudio desarrollado por Witana et al. (2004) mencionado anteriormente se obtuvo además un modelo lineal (Tabla 55) del confort asociado al ajuste global percibido en el que se explica la percepción global del ajuste, puntuado en una escala de -3 a 3, a partir de los máximos, mínimos y media de las diferencias entre las medidas de la horma y el pie de cuatro regiones del pie: trasera, pie medio, pie delantero y dedos.

$$Ct = 7.9 - 0.75028 * \text{Min} - 0.68591 * \text{Max} + 1.60197 * \text{Med} \quad R^2=0.97$$

Donde, considerando cuatro regiones del pie, trasera, pie medio, pie delantero y dedos:

Min = Mínimas diferencias dimensionales de entre las 4 regiones

Max = Máximas diferencias dimensionales de entre las 4 regiones

Med = Média de las diferencias dimensionales de entre las 4 regiones

Tabla 55. Modelo de la percepción del ajuste obtenido por Witana et al. (2004).

Este modelo no diferencia el rol de cada una de las regiones consideradas del pie en el confort asociado al ajuste percibido, ya que tanto el mínimo como el máximo pueden pertenecer a cualquiera de las regiones consideradas, y la media las considera conjuntamente. No considera pues la intensidad de la influencia de cada una de las secciones en la percepción del confort asociado al ajuste, lo cual limita su aplicación desde el punto de vista del diseño de calzado, y además no genera conocimiento que ayude a entender el fenómeno de ajuste. Por otra parte, el modelo desarrollado en esta tesis a partir de las medidas objetivas de las propiedades funcionales sí que diferencia entre regiones del pie, identificando claramente la influencia de cada una de ellas, lo que supone un avance muy valioso para el diseño.

9.7. DESARROLLO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE PROPIEDADES FUNCIONALES A IMPLEMENTAR EN LA APLICACIÓN INFORMÁTICA CAT

Tras la identificación de las propiedades funcionales relevantes para el confort percibido se desarrollaron los modelos matemáticos de los test de laboratorio capaces de cuantificarlas, además de otros módulos complementarios. Específicamente se desarrollaron los módulos de cuantificación del ajuste, distribución de altas y bajas presiones y absorción de impactos (Tabla 56):

TEST MODELADO	PARÁMETROS MODELADOS EN LA APLICACIÓN INFORMÁTICA
AJUSTE	Longitud*, perímetro en la articulación metatarsofalángica*, anchura de talón, perímetro de en la zona de dedos, perímetro en el empeine
DISTRIBUCIÓN A BAJAS PRESIONES	Deformación máxima*
DISTRIBUCIÓN A BAJAS PRESIONES	Deformación máxima*
ABSORCIÓN DE IMPACTOS	Rigidez dinámica*

* Indica que se trata de un parámetro relevante para la percepción del confort bajo las condiciones modeladas en esta tesis

Tabla 56. Parámetros modelados de los test relevantes para el confort percibido

A continuación se discuten los resultados derivados del desarrollo de los módulos de cada test.

9.7.1. TEST VIRTUALES DE ABSORCIÓN DE IMPACTOS, DISTRIBUCIÓN DE ALTAS Y BAJAS PRESIONES

Los test de absorción de impactos, distribución de altas presiones y distribución de bajas presiones que se desarrollan en el laboratorio para cuantificar las propiedades funcionales del mismo nombre comparten muchos aspectos en común, lo que permitió el desarrollo conjunto de los tres módulos.

Cada uno de estos tres módulos se compone de dos partes:

- Una primera parte, similar para los tres módulos, en la que las propiedades de los materiales que componen la suela del calzado son caracterizados mediante un test en laboratorio.
- Una segunda parte, en este caso específica de cada test, en la que el comportamiento conjunto de dichos materiales para conformar el comportamiento global del calzado es modelado para a continuación extraer los parámetros del test correspondiente que definen el comportamiento funcional del diseño.

Cada uno de las dos partes se desarrolló y validó para los tres módulos. El resultado de la primera parte se denominó el **módulo de caracterización mecánica**, y el resultado de las dos últimas el **módulo de predicción**.

A continuación se discuten los resultados del proceso de desarrollo y validación de estos dos módulos.

9.7.1.1. Módulo de caracterización mecánica

El módulo de caracterización mecánica se basa en la modelización del comportamiento de material de un componente de la suela por separado frente al esfuerzo al que se le somete en cada uno de los test (distribución de altas presiones, distribución de bajas presiones y absorción de impactos).

Su objetivo es encontrar cuál es el modelo mecánico que mejor se ajusta al comportamiento del material en cada uno de los test. Para identificar el modelo óptimo correspondiente al comportamiento para un determinado test, en primer lugar se aplica el test de laboratorio al material para caracterizar la respuesta a deformación del material bajo la Fuerza aplicada, que corresponde a la fuerza que ejerce una persona sobre el material durante el ciclo de marcha según un patrón biomecánico medio de acuerdo a las condiciones establecidas por el test. A continuación se lleva a cabo el ajuste de una lista de modelos pre-programados a partir de las señales Fuerza-Deformación obtenidas y se escoge el que mejor ajusta (mayor R^2)

A continuación se discute la selección de la lista de modelos de comportamiento elegida para los materiales y se comentan los resultados de la validación del módulo de caracterización mecánica.

9.7.1.1.1. Modelos de comportamiento de los materiales

La decisión de qué **técnicas de modelado** considerar fue una solución de compromiso entre la necesidad real y la capacidad de la tecnología y conocimientos existentes en el entorno de trabajo al que va dirigido el software a desarrollar por la tesis.

Existen diversas posibilidades en cuanto a las técnicas de modelado de los materiales, cada una de ellas con distinto tipo de prestaciones y restricciones. Por un lado, se encuentra la posibilidad de utilizar la técnica de cálculo basada en modelos de elementos finitos para modelar los materiales y su geometría, que ofrece una mayor exactitud que la que pueden ofrecer los modelos reológicos utilizados en esta tesis, así como una cantidad de información mucho más profunda en cuanto a cantidad y en cuanto a su nivel de detalle. Sin embargo, esta metodología fue desechada al principio debido tanto a las necesidades de capacidad de procesamiento como de conocimientos técnicos necesarios para poder aplicarlo, ya que se trata de requisitos que no se pueden cumplir en el entorno al que va dirigido la aplicación informática: ordenadores de capacidad media de procesamiento, enfocados al diseño gráfico y no al procesamiento numérico, y utilizados por diseñadores expertos en diseño estético y funcional pero no en ingeniería mecánica. Así, se optó por la utilización de modelos reológicos para el modelado de los materiales debido a su mayor rapidez de cálculo y facilidad de uso, una vez decidido el modelo específico a utilizar.

Para resolver este último punto, es decir la identificación del **modelo reológico óptimo** para un material dado, se optó por la construcción de una lista de modelos reológicos capaces de cubrir el amplio rango de comportamientos de los materiales existentes en el mercado (la lista de modelos reológicos disponibles creada contiene modelos de comportamiento tanto lineal como no lineal, todos ellos unidimensionales, capaces de modelar el comportamiento en la dirección de la aplicación de la carga) y hacer que el módulo de caracterización mecánica calcule el ajuste del comportamiento del material en todos ellos para quedarse con el que mejor ajustara (mayor R^2). Esta decisión se fundamenta en la gran diversidad de materiales para los componentes de la suela que existen en cuanto a sus diferentes naturalezas, definidas por su composición química y estructura (Whittle, 1997), y en la gran cantidad de materiales nuevos que surgen por temporada. Por ello no es razonable plantearse un único modelo capaz de reflejar de

manera fiable el comportamiento de todos los materiales. Por el contrario, una lista de modelos representando muy diversos comportamientos disponibles permite asegurar un ajuste correcto a materiales con distintas propiedades. Además, la velocidad de cálculo del ajuste de un comportamiento para cada uno de los modelos es razonablemente baja (con el uso de un ordenador con una velocidad de procesado medio, el tiempo de modelar el comportamiento mecánico de un material frente a un test no supera los 10 segundos aproximadamente) lo que permite llevar a cabo esta aproximación independientemente de las prestaciones de la aplicación informática.

9.7.1.1.2. Validación del módulo de caracterización mecánica

Los resultados (apartado 8.2.1) muestran que, de forma global el **modelo 6** (Tabla 57) es el que mejor ajusta el comportamiento mecánico tanto de los materiales de plantilla como de suela, mientras que el **modelo 5 y el 9** son los que peor ajustan. Los tres modelos corresponden a una combinación de muelle no-lineal y amortiguador en paralelo.

Modelo que MEJOR ajusta	Modelo 6	Muelle no lineal con amortiguador no lineal	$s = j * e^k + l * e' ^n$
Modelos que PEOR ajustan	Modelo 5	Tejido blando del talón	$s = j * e^k + l * e^m * e' ^n$
	Modelo 9	Muelle no lineal con amortiguador no lineal	$s = j * e^k + l * e^m * e' $

Tabla 57. Modelos que mejor y que peor ajustaron.

Por tanto, de manera global, el **modelo 6** parece ser el que mejor ajusta el comportamiento de los materiales para los distintos test. Además, considerando los materiales por separado, el **modelo 6** es el que mejor ajusta para 27 de las 36 (=12 componentes x 3 test) combinaciones de componentes y test ensayados, lo que representa un 75% de los casos. Este modelo se trata de un modelo no-lineal, lo que es coherente con la bibliografía que afirma que los materiales empleados son generalmente de naturaleza viscoelástica y no lineal (Whittle, 1997; Rome, 1990).

En cuanto a las diferencias entre modelos lineales y no lineales, todos los **modelos lineales** ajustan razonablemente bien el comportamiento de los materiales de suela y plantilla, estando las medias de los ajustes por encima de una R^2 de 0.8 excepto en un caso (material de plantilla "Green"). Por su parte los **modelos no lineales** presentan un nivel de ajuste con más dispersión dependiendo del material considerado, siendo las R^2 medias no siempre superiores al 0.8.

Respecto a las diferencias de ajuste entre los tests, considerando los distintos tests por separado:

- **Módulo de distribución de bajas presiones:** Los resultados muestran que el **modelo 6** es el que mejor ajusta para plantilla en todos los casos, y también para suela, aunque el **modelo 2** queda cerca.

- **Módulo de distribución de altas presiones:** Los resultados muestran que, para los materiales de plantilla el **modelo 6** es el modelo que mejor ajusta, siendo el **modelo 2** el que mejor ajusta para los materiales de suela, aunque el **modelo 6** queda cerca.
- **Módulo de absorción de impactos:** Los resultados muestran que, tanto para los materiales de plantilla como de suela, el modelo que mejor ajusta es el **modelo 6** excepto en tres materiales que es el **modelo 4**.

Por tanto, considerando los test por separado también los resultados sugieren que el modelo óptimo es el modelo 6.

Por otra parte, los resultados sugieren que los test de distribución de altas presiones y bajas presiones tanto para suelas como para plantillas obtienen mejores ajustes en general que el test de absorción de impactos. En general, para el test de absorción de impactos, la calidad del ajuste de los modelos es baja. Una posible causa de esto es la velocidad de aplicación de la carga, que al llevar a cabo una descarga de energía muy rápida sobre el material suscita una deformación muy rápida y menos repetible que dificulta el ajuste del modelo matemático.

Con todo, el **modelo 6** provee de un ajuste correcto incluso en la absorción de impactos tanto de plantillas como de suelas, siendo los ajustes de este modelo siempre superiores a 0.9 excepto en un caso de las plantillas en el que se obtiene un ajuste bastante bajo de $R^2=0.373$ (plantilla "Green") y otro de suelas de $R^2=0.849$ (suela 910). El bajo ajuste obtenido por la plantilla "Green" en el **modelo 6**, comparado con el ajuste obtenido por el resto de componentes, parece ser resultado de su diferente composición. Esta plantilla era la única de la muestra compuesta de un material tipo gel, cuya composición es muy difícil de identificar debido a la gran variedad de materiales con distintos comportamientos que quedan incluidas en esta familia (apartado 8.2.1).

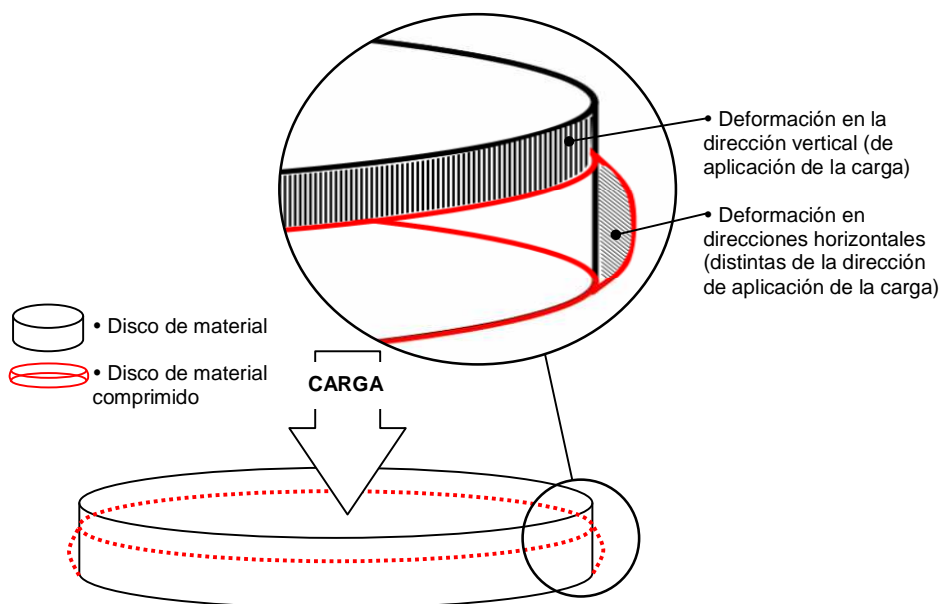


Figura 86. Esquema conceptual de la deformación que tiene lugar por un disco de material al aplicarle una carga vertical: se produce una deformación en la dirección de aplicación de la carga, pero además en las direcciones horizontales que consumen energía.

Una de las posibles causas para este resultado puede recaer en el hecho de que los materiales tipo gel. La simplificación asumida en esta tesis de considerar un modelo unidireccional en la caracterización del material, hace que se desprecie la energía utilizada en la deformación del material en las direcciones distintas de la de aplicación de la carga (Figura 86), y puede ser la causa de que, en los materiales como los geles, que no se compactan tanto al aplicarseles una carga vertical (en comparación con las EVAS, PU y TPU) sino que se deforman manteniendo el volumen, los resultados sean peores.

Considerar modelos más completos que incluyeran el estudio de deformaciones y tensiones en direcciones distintas a la de la dirección de aplicación de la carga exige la aplicación de técnicas de elementos finitos, lo cual queda fuera de las posibilidades de una aplicación informática para la ayuda al diseñador por sus costes en tiempo de procesado, y por tanto queda fuera del objetivo de esta tesis.

9.7.1.2. Módulo de predicción

El módulo de predicción se compone de dos partes: una primera en la que se construye el modelo de comportamiento de un calzado completo a partir del comportamiento de cada uno de los materiales, y una segunda parte en la cual se extraen los parámetros que cuantifican las propiedades funcionales correspondientes. Mientras que la primera parte es común para los tres módulos (absorción de impactos, distribución de altas presiones y distribución de bajas presiones), la segunda es específica de cada test.

A continuación se discuten los asuntos relacionados con ambos aspectos.

9.7.1.2.1. Modelo de comportamiento del calzado completo

El modelo de comportamiento global del calzado de cada test (absorción de impactos, distribución de altas presiones y distribución de bajas presiones) consiste en una par de curvas Fuerza-Deformación que simulan el test correspondiente de laboratorio con muestras reales.

Para la construcción de dicho modelo de comportamiento a partir de los materiales se considera que existe una transmisión de esfuerzos perfecta entre materiales, es decir, que el esfuerzo que se aplica a un componente es el resultado sin modificar del esfuerzo que sale del componente anterior (Figura 87). En el caso real existe una interfaz entre componentes que varía mucho según el tipo de construcción del calzado (p.ej. pegamento o cola, o nada por ser cosido, o simplemente apoyado entre plantilla y suela) que actúa de filtro de dicho esfuerzo.

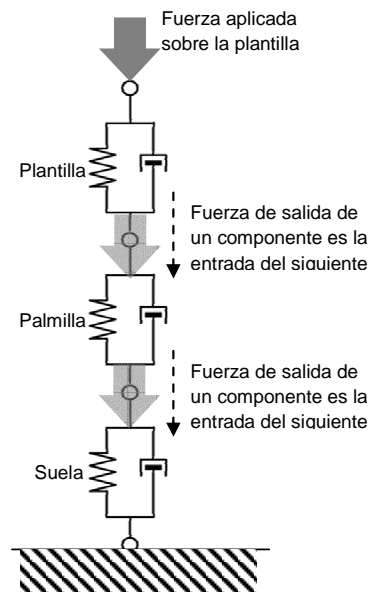


Figura 87. Modelo unidimensional de comportamiento de calzado completo

En general, esta simplificación tiene un coste pequeño en cuanto a la capacidad de predicción de los resultados reales, aunque dependerá tanto del tipo de materiales y geometría de los componentes como del tipo de construcción, o unión entre ellos. Por otra parte, considerar las propiedades del interfaz genera una dificultad de cálculo sólo abordable desde metodologías como los elementos finitos mucho más exhaustivas que los modelos reológicos. La aplicación de este tipo de metodologías fue desechada por las cuestiones ya comentadas de capacidad tecnológica y de conocimiento supuesto para los usuarios finales.

Por otra parte, una vez obtenidas las curvas de Fuerza-Deformación que simulan el comportamiento del calzado, el módulo aplica para la extracción de los parámetros las mismas metodologías que se aplican para cada uno de los test de laboratorio. A continuación se discute los resultados de la validación de los módulos de los tres test (absorción de impactos, distribución de altas presiones y distribución de bajas presiones) comparando los valores de dichos parámetros obtenidos a partir de los test de laboratorio con los valores de dichos parámetros obtenidos a partir de los test virtuales modelados.

9.7.1.2.2. Validación del módulo de predicción

En general, los resultados del módulo de predicción de los tres test (apartado 8.2.2) muestran un buen ajuste a los resultados de los test reales.

Los resultados sugieren que los parámetros de los módulos del test de distribución de bajas presiones y el test de altas presiones se ajustan mejor a los tests reales que los parámetros del módulo de absorción de impactos. Mientras que los test de distribución de presiones presentan un EN_{abs} (Error absoluto medio Normalizado) menor o igual al 10% para todos los parámetros extraídos, el módulo de absorción de impactos presenta un EN_{abs} superior al 20%. Este resultado era de esperar, pues el nivel de ajuste de los modelos para los materiales es, como se ha visto antes, peor en el caso del test de absorción de impactos.

Se pueden extraer distintas conclusiones de los resultados dependiendo del test considerado:

- **Módulo de distribución a BAJAS presiones:** Los resultados muestran que las discrepancias entre la Deformación máxima obtenida de manera real y virtual es pequeña, obteniéndose un EN_{abs} de un 8% y un sesgo negativo (se sobreestima el valor real) bastante bajo.
- **Módulo de distribución a ALTAS presiones:** Para el test de distribución de altas presiones, las discrepancias ente test real y virtual son similares al del test de bajas presiones. El EN_{abs} es igual al 10%, mientras que el sesgo representa un valor muy pequeño y positivo (se subestima el valor real).
- **Módulo de absorción de impactos:** Los resultados para la Rigidez dinámica del calzado muestran que las diferencias entre los resultados del test real y el virtual son mayores que en el caso de los test de distribución de presiones, ofreciendo un EN_{abs} de 24% y un sesgo relativamente bajo y positivo (se subestima el valor real). Considerando que el valor de la fuerza que se aplica es igual para los test reales y virtuales, subestimar la rigidez dinámica indica que la Deformación máxima es sobreestimada ($Rd = F_{max} / D_{max}$).

Los resultados confirman que el modelo de comportamiento del calzado utilizado es sensible a la velocidad y magnitud de las cargas aplicadas, de manera que cuanto menores son las cargas y más lenta su aplicación mejor se ajustan los resultados de los módulos virtuales a los reales. Esta conclusión era de esperar ya que el ajuste de los modelos al comportamiento de los materiales por separado ya mostraba la tendencia de ser mejor para una menor magnitud y velocidad de carga.

Por un lado, el resultado puede deberse a que el comportamiento de los materiales frente a impactos a altas velocidades sea más complejo de modelar. Por el otro, las simplificaciones de la geometría y la no consideración de las interfases entre materiales podrían explicar este efecto en la zona del talón al comparar los test de absorción de impactos y distribución de altas presiones. Los ahorros de las suelas no están siendo considerados en el modelo, y por tanto la suela se considera como un bloque de material macizo del espesor exterior de la suela, obviándose los huecos, que, junto con el desprecio de las interfases entre componentes podría estar teniendo un efecto sobre el resultado, añadido al de la variación de la magnitud y velocidad de las fuerzas aplicadas.

Una posible explicación de las diferencias de comportamiento a distintas velocidades y magnitudes de la carga aplicada podría consistir en que al aplicar una fuerza lentamente, la transmisión de esfuerzos de componente a componente es más óptima pues la baja velocidad de aplicación permite que los componentes se acoplen mejor unos a otros, lo que hace que el test virtual sea más cercano al real.

Esta conclusión es apoyada por el hecho de que se obtengan para el test de distribución de bajas presiones las menores diferencias entre test real y virtual. Además, en este caso se une el hecho de que las simplificaciones geométricas en la zona de los componentes donde se aplican de las cargas afectan menos, pues los

ahorros de las suelas son, de haberlos, mucho menores en la parte delantera de la suela que en la trasera, y el material es mucho más parecido a una placa maciza como se considera en el test virtual.

9.7.2. TEST VIRTUAL DE AJUSTE

El test virtual de ajuste desarrollado se compone de dos partes, el módulo de medición y el módulo de predicción. Ambos módulos funcionaron bien tras su desarrollo y no necesitaron ser validados al no estar basados en modelos matemáticos. Su desarrollo consistió en replicar a partir de un diseño CAD y mediante operaciones informáticas las mismas operaciones que antes eran llevadas a cabo por un técnico mediante el uso de un programa CAD.

9.7.2.1. Módulo de medición del ajuste

El papel del módulo de medición consiste en medir la horma. Para ello, una horma CAD es introducida en el módulo y éste simplemente la alinea y extrae las medidas necesarias que son pasadas al módulo de predicción.

La información del exterior necesaria, además del diseño CAD de la horma, es la talla y el género (p.e. talla 42 de hombre) que le corresponden, así como el percentil para el cual el diseñador desea ajustar la horma, de manera que el módulo pueda extraer de las bases de datos antropométricas las posiciones de las secciones a extraer de la horma.

Aunque el modelo de predicción del confort desarrollado sólo exige la obtención de la longitud funcional de la horma y el perímetro de la línea de flexión, se consideró de utilidad para los diseñadores aportar información sobre el resto de secciones para el caso de desarrollo de futuras aplicaciones. Para ello se desarrolló un módulo de medición capaz de, además de extraer las medidas de las secciones relevantes para el confort, extraer medidas de las secciones del talón, empeine y dedos, tal y como se puede ver en la figura (Figura 88).

La razón por la que esto fue implementado es que mediante un pequeño esfuerzo más, se abren las posibilidades para futuras aplicaciones del módulo de medición en el que las condiciones de uso, la tipología de usuario y el entorno exijan la medición de dichas secciones (p.ej. en el caso de que se desarrollara un banco de ensayos virtuales específico para calzado de tacón alto, es coherente suponer que la medida de la sección de los dedos sería importante para el confort, como sugieren los resultados de Au y Goonetilleke (2007).

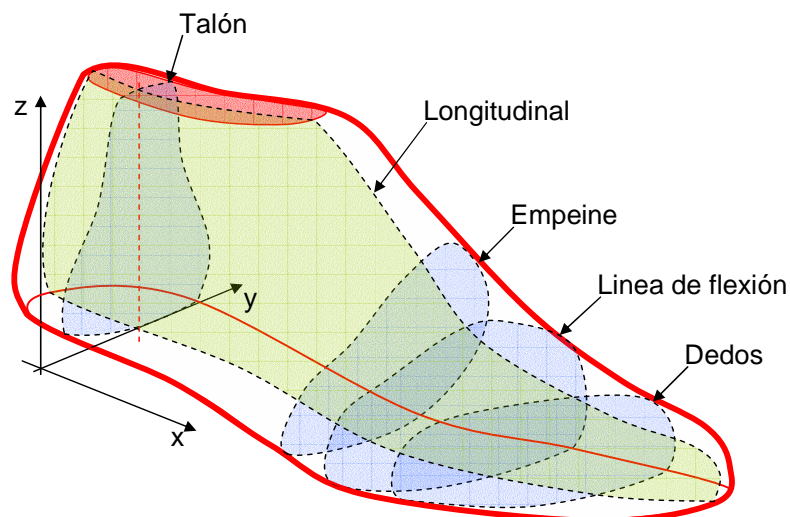


Figura 88. Secciones de la horma que extraer el módulo de medida

En cuanto a la **alineación de las horma y el pie**, el protocolo seguido no dio ningún problema una vez correctamente definido el programa de cálculo. Dicho protocolo, alineación del punto más atrasado del talón con el más atrasado de la horma, y a continuación minimiza las distancias entre los laterales de la horma y las cabezas del 1er y 5º metatarsos, se escogió debido a que por sus propiedades intrínsecas minimiza las diferencias de forma entre horma y pie (Witana et al. 2003) (Figura 89).

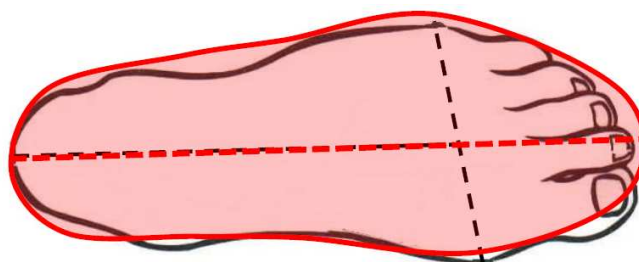


Figura 89. Pie y horma alineados

Finalmente, como ya se ha comentado, el módulo de medición no es susceptible de validación pues al final sólo consiste en llevar a cabo de manera automática las medidas que antes realizaba un técnico. En este sentido, fueron medidas todas las hormas de los diferentes calzados de la muestra utilizada para la validación de los test virtuales de absorción de impactos y distribución de altas y bajas presiones y ninguna de ellas mostró resultados distintos a los obtenidos mediante medición manual, siendo incluso más exactos (menor variabilidad).

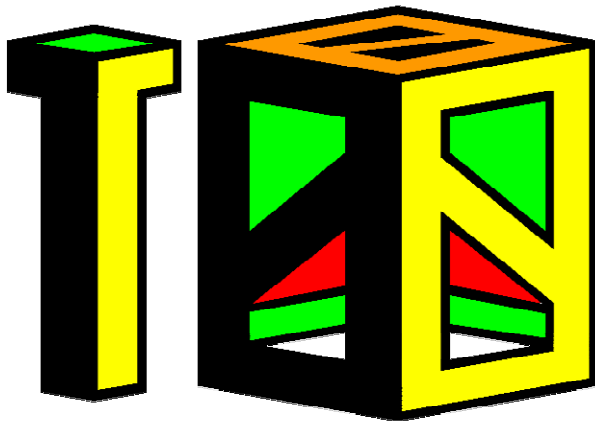
9.7.2.2. Módulo de predicción del ajuste

El módulo de predicción del ajuste consiste en la obtención del ratio horma/pie para las medidas extraídas del módulo de medición. Para ello, y a partir de la talla y sexo introducidas en el software, además de los percentiles a los que va dirigido el calzado, se acude a las tablas antropométricas para obtener las medidas del pie de las secciones medidas.

El nivel de ajuste se cuantifica para cada sección simplemente dividiendo la medida de la horma por la del pie.

9.8. DESARROLLO DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA

Una vez desarrollados los modelos matemáticos y planteados los algoritmos de los módulos de los diferentes test considerados en la tesis, el desarrollo de la aplicación informática consistió en el traslado de dichos módulos a lenguaje informático, así como en el desarrollo de una interfaz de usuario que permitiera un uso fácil e intuitivo.



10. CONCLUSIONES

El desarrollo del trabajo de esta tesis ha permitido concluir con un objetivo doble. Por un lado la consecución de un **modelo de confort** capaz de predecir el confort global percibido por los usuarios a partir de medidas objetivas sobre el diseño del mismo y, por el otro, el desarrollo de una **aplicación informática** que integra dicho modelo y que permite evaluar diseños virtuales (CAD) de calzado, bajo en una nueva metodología de

diseño que considera las necesidades de confort del usuario desde el inicio del proceso de desarrollo del producto. Dicha herramienta permite efectuar test de evaluación funcional de los modelos de CAD sin necesidad de fabricar prototipos físicos.

Los resultados han permitido contrastar la **hipótesis general** de la tesis. Así, el trabajo desarrollado ha permitido comprobar cómo las características de los usuarios y del calzado, enmarcados en unas determinadas condiciones de contorno y actividad, definen la interacción entre calzado y usuario a partir de una serie de propiedades funcionales características que, además, se ha demostrado están estrechamente relacionadas con el confort global percibido.

A continuación se contrastan los resultados de la tesis con cada una de las **hipótesis de partida** específicas definidas en el origen del trabajo.

H1: Los resultados han permitido demostrar cómo las propiedades funcionales consideradas actualmente en el estado del arte, para un caso concreto de tipo de calzado y usuario, y bajo determinadas condiciones de entorno y actividad, permiten caracterizar la interacción calzado– usuario. Además, a través de los modelos obtenidos (apartado 8.1.3), se ha demostrado que dichas propiedades funcionales están íntimamente relacionadas con el confort, explicando una parte significativa del mismo.

H2: El análisis efectuado comparando los resultados de la percepción y los test objetivos de las propiedades funcionales confirman la hipótesis de que la percepción que los usuarios tienen de las diferentes propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado no son independientes. Además se han obtenido diferentes modelos perceptivos de confort, que en consonancia con esta hipótesis, muestran como algunas propiedades funcionales está altamente correlacionadas, siendo sustitutas para la predicción del confort.

H3: El estado del arte demuestra que todas las propiedades funcionales consideradas tienen una influencia en el confort bajo determinadas condiciones de contorno. En esta tesis se ha analizado cuáles son las propiedades funcionales importantes bajo unas determinadas condiciones de contorno y determinadas tipología de usuario y calzado. El hecho de que los modelos de percepción del confort obtenidos no

contengan todas las propiedades funcionales consideradas de inicio apoya la hipótesis de que no todas las propiedades funcionales presentan la misma importancia en el confort percibido. Además, el hecho de que en el estado del arte se haya demostrado la importancia de otras propiedades funcionales en el confort (no influyentes en esta tesis) bajo distintas condiciones de contorno y tipologías de usuario y calzado, muestra cómo la importancia de las propiedades funcionales depende de los factores y condiciones consideradas.

H4: Los resultados de la tesis han permitido demostrar la validez de los tests de maquinaria existentes para cuantificar las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado. En esta tesis se ha establecido la relación entre los resultados de los tests con maquinaria de las propiedades funcionales y la percepción de los usuarios de las mismas. Además se ha establecido la relación entre los resultados de los tests con maquinaria de propiedades funcionales y la percepción del confort global de los usuarios.

H5: Los modelos matemáticos de los test de maquinaria, alimentados mediante resultados de ensayos reales de componentes del calzado, obtenidos en esta tesis demuestran que es posible modelar la interacción usuario-calzado bajo una filosofía CAT con la fiabilidad necesaria que permita predecir el confort percibido por los usuarios.

El trabajo efectuado en esta tesis ha permitido avanzar en diferentes **áreas de conocimiento** que se enmarcan en tres grupos principalmente:

- la **percepción del confort** asociado al uso del calzado
- la **evaluación de las propiedades funcionales** del calzado
- las **herramientas informáticas** de apoyo al diseño de calzado.

A continuación se presentan las conclusiones parciales extraídas de los resultados de la tesis y incluidas en estos tres campos de investigación.

1_ Se ha obtenido un **modelo de confort a partir de la percepción de las propiedades funcionales del calzado** que ha permitido identificar las propiedades funcionales percibidas como relevantes para el confort desde el punto de vista del usuario. De entre todas las propiedades funcionales consideradas en el estado del arte actual, las relevantes según la percepción del usuario para el confort percibido son el ajuste en longitud y en perímetro en la zona de la articulación metatarsofalángica, y las relacionadas con las propiedades mecánicas de la suela y plantilla, que son la distribución de altas y bajas presiones y la absorción de impactos. En cuanto al tipo de relación entre las propiedades funcionales y el confort:

- Cuanto más ajustado se percibe un calzado menor es el confort percibido tanto en longitud como en la articulación metatarsofalángica. Mientras que para el caso de la longitud este resultado era esperable, el caso de la articulación metatarsofalángica contrasta con lo comúnmente aceptado de que es necesario un cierto grado de ajuste.
- Las tres propiedades funcionales relacionadas con las características mecánicas de la suela y plantilla (distribución de altas y bajas presiones, y absorción de impactos) son percibidas de manera muy similar entre los usuarios, siendo las tres capaces de determinar el nivel de dureza máximo admisible.

2_ Se ha caracterizado la **relación entre la percepción que los usuarios tienen de las propiedades funcionales relevantes para el confort y las medidas objetivas de las mismas** a partir de los test de laboratorio existentes en el estado del arte. En cuanto al tipo de relación, depende de la propiedad funcional considerada:

- Los resultados muestran una relación lineal entre el ajuste y la percepción del mismo.
- Los resultados muestran una relación lineal entre la distribución de altas y bajas presiones y la percepción de las mismas.
- Los resultados muestran una relación logarítmica ente la percepción de la absorción de impactos y la rigidez dinámica de la suela, que sugiere que a partir de una determinada rigidez límite la percepción apenas cambia con el aumento de rigidez dinámica.

3_ Se ha obtenido un **modelo del confort global percibido a partir de las medidas objetivas de las propiedades funcionales**. La relación de este modelo con el obtenido a partir de la percepción de los usuarios, siendo coherente, muestra ciertos aspectos que aportan conocimiento acerca de las medidas objetivas de laboratorio:

- Los test de **distribución de altas y bajas presiones y absorción de impactos** tienen una influencia similar sobre el confort global percibido, de manera que son sustitutivas para explicar el confort global percibido.
- De entre estos test, es el test de **absorción de impactos** el que mayor variabilidad del confort explica.
- El **ajuste** tiene un papel relevante en el confort percibido, siendo el ajuste en longitud y en perímetro de la zona delantera las medidas más significativas.

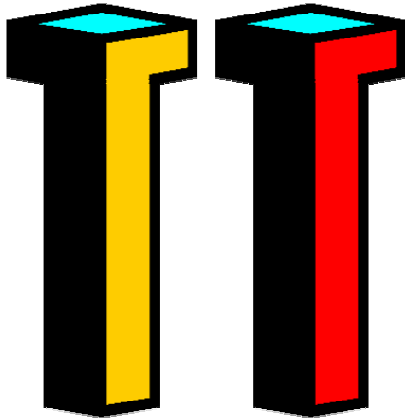
4_ Se han desarrollado **modelos matemáticos de los test de laboratorios de las propiedades funcionales relevantes para el confort percibido**: el ajuste, la distribución de altas y bajas presiones y la absorción de impactos. Este desarrollo permite evaluar las propiedades funcionales de nuevos diseños de calzado a partir de modelos CAD de los mismos y las propiedades de sus componentes ensayadas en laboratorio. Dependiendo de los modelos, la capacidad de predicción varía: el modelo de la absorción de impactos es capaz de predecir cerca de un 80%, mientras que los modelos de las distribuciones de altas y bajas presiones alcanzan el 90%.

5_ A partir del desarrollo de los modelos de las propiedades funcionales asociadas a las suelas (distribución de altas y bajas presiones y absorción de impactos), se ha avanzado en diversos aspectos:

- La **caracterización de los materiales del mercado utilizados para la fabricación de suelas y plantillas**, obteniéndose que la mayoría de los materiales analizados presentan un comportamiento viscoelástico.
- La caracterización de la **influencia del diseño y construcción del calzado** (p.ej las características geométricas de la suela -ahorros- y el pegado entre suela y corte) **en el comportamiento funcional** del mismo.
- La **capacidad de los test existentes en la caracterización de las propiedades funcionales del calzado** ha sido cuantificada, contrastándola con la percepción del usuario.

6_ Metodológicamente la tesis ha permitido avanzar en una serie de campos:

- Puesta a punto y mejora de herramientas para la **captación de la percepción de los usuarios en lo relativo al confort y las propiedades funcionales del calzado.**
- Puesta a punto y mejora de los **protocolos de ensayo para la cuantificación objetiva de las propiedades funcionales** del calzado.
- Puesta a punto de **métodos de ensayo para la caracterización funcional de componentes del calzado.**



11. TRABAJOS FUTUROS

Durante el desarrollo del trabajo se han identificado una serie de líneas futuras tanto de investigación como de mejoras tecnológicas. A continuación se describen dichos trabajos futuros en ambos campos:

MEJORAS TECNOLÓGICAS

- Los resultados de la tesis han permitido demostrar que es posible analizar las propiedades funcionales y el confort de un diseño de calzado caracterizando tanto los factores de interacción (usuario-calzado) como las condiciones de

contorno (entorno y actividad) en los que tiene lugar la interacción. La caracterización del calzado se lleva a cabo mediante test de maquinaria especializada de sus componentes. El grado tecnológico necesario para llevar a cabo dichos test hace que los usuarios de la aplicación informática (diseñadores y fabricantes) hoy por hoy tengan que subcontratar dichos test a centros que dispongan de las instalaciones necesarias. Por tanto, una clara línea futura de investigación es la **concepción y desarrollo de test de caracterización de las componentes de calzado más sencillos que los actuales y, de ser posible, normalizados, que permitan a las mismas empresas fabricantes o de diseño aplicarlos sin depender de organismos exteriores**. Este reduciría más los plazos para el proceso de validación de nuevos diseños.

- Uno de los resultados más relevantes ha sido la modelización de los test de ensayos de las propiedades funcionales relevantes para el confort (distribución de altas y bajas presiones y la absorción de impactos) de la interacción entre calzado y sujeto. Dichos modelos reológicos han demostrado ser fiables para caracterizar las propiedades funcionales sin presentar las contraprestaciones, como un mayor tiempo de cálculo o la necesidad de contar con conocimiento técnico-científico avanzado, características de otras metodologías de modelado utilizadas en el estado del arte, como la técnica de modelado de elementos finitos. Por tanto, una línea clara de investigación futura consiste en el **desarrollo de modelos de predicción reológicos que mejoren la precisión incluyendo las características de la construcción del calzado, manteniendo las prestaciones de los modelos actuales**.
- En la tesis se ha llevado a cabo la validación de cada uno de los módulos que componen la herramienta informática desarrollada. Un futuro trabajo es la **validación de la cadena de predicciones completa, desde un diseño CAD y las propiedades de sus materiales hasta obtener una predicción de las propiedades funcionales y una predicción del confort percibido, todo a partir de ensayos virtuales**. Este análisis podría aportar información para la mejora

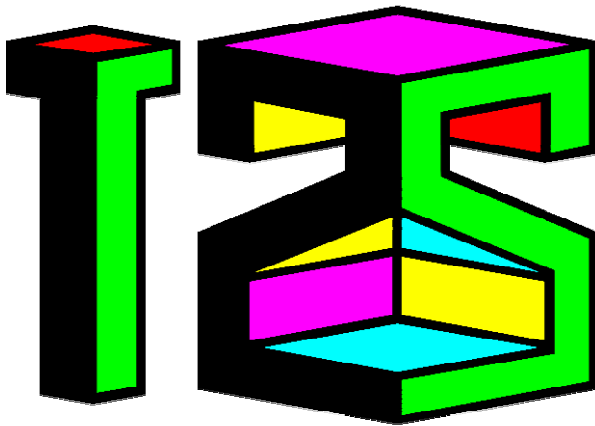
de ambos tipos de modelos, los de la predicción de las propiedades funcionales y el de predicción del confort.

- La usabilidad y practicidad de la aplicación informática ha sido considerada como una de las especificaciones iniciales desde el principio del trabajo, a través de las recomendaciones de expertos y usuarios potenciales. El estudio de la acogida de la misma en el trabajo diario de los diseñadores y fabricantes no ha sido llevado a cabo en la presente tesis. Sin embargo, la situación actual en el sector del calzado, en el que las herramientas informáticas de diseño CAD están cada vez más extendidas, presentan el caldo de cultivo adecuado para una buena acogida de una aplicación desarrollada para evaluar funcionalmente dichos diseños antes de ser fabricados, como la de esta tesis. Por otra parte, en un futuro **el análisis de la acogida de la herramienta desarrollada podría aportar nuevas mejoras de la aplicación informática, principalmente en cuanto a su usabilidad y adaptabilidad a los métodos de trabajar de los profesionales del sector.** Para ello se propone avanzar en el conocimiento de los procesos de desarrollo del producto de las empresas actuales y extraer los criterios de diseño para el interfaz caapces de conseguir una herramienta versátil y útil para los diseñadores de calzado.

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Las hipótesis de la tesis se han fundamentado en el desarrollo de un caso práctico como es el caso de la interacción entre un hombre adulto con calzado urbano durante la compra. Mediante el desarrollo de este trabajo se ha establecido una metodología válida para el análisis de las relaciones entre las propiedades del calzado y el confort percibido en distintas configuraciones de los factores (usuario y calzado) y condiciones de contorno (entorno y actividad) involucradas. Por tanto, una clara línea de investigación futura consiste en la **aplicación de la metodología de la tesis en las distintas posibilidades existentes tanto de factores como de condiciones de contorno para analizar las relaciones entre las propiedades funcionales y el confort percibido.** En este sentido, está previsto trabajar en el futuro para el desarrollo de una aplicación informática centrada en calzado laboral de seguridad.
- En el caso del módulo de predicción del ajuste, en la tesis se ha llevado a cabo una aproximación estática basada en la comparación de medidas de la horma y la antropometría del pie. Sin embargo, el pie es una estructura dinámica que cambia de forma a lo largo del ciclo de marcha y al considerar la horma como el elemento a comparar con el pie se está obviando la influencia de la construcción del calzado y, principalmente, de las propiedades mecánicas del material del corte. Por tanto, se abre una línea de investigación futura en cuanto a la **cuantificación del ajuste que sea capaz de evitar la doble simplificación estática-geométrica y considere la naturaleza dinámica del pie y la flexibilidad del corte,** midiendo directamente las presiones ejercidas entre pie y calzado e interpretando los resultados para optimizar el ajuste percibido por los usuarios.

- Esta tesis ha relacionado las propiedades funcionales medidas a partir de los test con máquinas especializadas con el confort percibido por los usuarios. Además se ha relacionado la percepción de las propiedades funcionales con la medida objetiva de las mismas a partir de los test con máquinas. Una clara línea de investigación futura es, dar un paso más en profundidad y **analizar que estímulos sensoriales generados en la acción del calzado sobre el usuario (p.ej tacto fino, y tacto grueso), así como la captación de los mismos y como se conjugan para generar la percepción de las propiedades funcionales en un primer paso, y del confort a continuación.**
- Los modelos de confort desarrollados en la tesis consideran las propiedades funcionales de la interacción calzado-usuario, caracterizando ambos factores (usuario y calzado) mediante una serie de parámetros. Respecto a la caracterización de los usuarios, se han considerado variables globales como la edad, sexo, etnia, dejándose de lado aspectos psicológicos. Una línea de investigación futura consiste en **analizar como los aspectos psicológicos (p.e. preferencia estética) de los usuarios influyen en su percepción del confort.** Estas investigaciones permitiría obtener nuevos criterios de diseño derivados de los aspectos psicológicos con influencia en el confort, que tras ser incluidos en un modelo combinados con las propiedades funcionales de la interacción usuario-calzado, podrían mejorar las predicciones del confort.



12. REFERENCIAS

1. Abeysekera, J., Khan, Z. (1997). Slipping and falling accidents on icy surfaces: a case study from northern Sweden. In: Proceedings of Internacional Symposium on Problems with Cold Work. Holmer I., Kuklane, K. (Eds.). Stockholm, Sweden.
2. Alcántara, E. (2001). Differences between machine and human testing of shock absorbing systems. PhD thesis. Middlesex University
3. Alcántara, E., Pérez, A., Lozano, L., García, A. C., Forner, A. (1996) Generation and transmission of heel strike impacts in children running, footwear and gender influence. In: Proceedings of XIV Symposium on biomechanics in sports. Funchal. Abrantes, J. M. (Eds). Edições FMH. Universidad Tecnica de Lisboa. pp.297-300
4. Alcántara E., Artacho M.A., González J.C., García A.C. (2005a). Application of product semantics to footwear design. Part I—Identification of footwear semantic space applying diferencial semantics. International Journal of Industrial Ergonomics. 35(8), 713-725
5. Alcántara E., Artacho M.A., González J.C., García A.C. (2005b) Application of product semantics to footwear design. Part II—comparison of two clog designs using individual and compared semantic profiles. International Journal of Industrial Ergonomics. 35(8), 727-735
6. Alemany, S., González, J.C., García, A.C., Olaso, J., Montero, J., Chirivella, C., Prat, J., Sánchez, J. (2005). A novel approach to define customized functional design solution from user information. In: Proceedings of the Third Interdisciplinary World Congress on Mass Customization and Personalization, Hong Kong (CD-ROM). pp. 18–21
7. Alexander I.J., Chao E.Y.S., Johnson K.A. (1990) The Assesment of Dynamic Foot-to-Ground Contact Forces and Plantar Pressure Distribution: A Review of the Evolution of Current Techniques and Clinical Applications. Foot Ankle 11(3), 152-167.
8. Amis, J., Jennings, L., Graham, D., Graham, C.E. (1988). Painful heel syndrome: radiographic and treatment assessment. Foot Ankle, 9, 91-99.

9. Armstrong, P.L., Lansing S.G., (1978) Slip-resistance testing: Deriving guidance from National Electronic Injury Surveillance System (NEISS). Anderson, C. & Senne, J. (Eds.). American Society for Testing and Materials, pp 3-10.
10. ASTM F911-85 (1994) Standard Test Method for Flexibility of Running Shoes (Withdrawn 2002).
11. ASTM F539 – 01 (2007) Standard Practice for Fitting Athletic Footwear
12. ASTM D5052 – 00 (2005) Standard Test Method for Permeability of Leather to Water Vapor
13. ASTM D2322 – 00 (2005) Standard Test Method for Resistance of Shoe Upper Leather to Artificial Perspiration
14. ASTM D6014 – 00 (2005) Standard Test Method for Determination of Dynamic Water Absorption of Leather Surfaces
15. Au, EYL., Goonetilleke, RS. (2007) A qualitative study on the comfort and fit of ladies' dress shoes. *Applied Ergonomics* 38, 687–696.
16. Audemars, P. (1978) Underfoot Cushioning in Working Footwear; A Question of Comfort. *Protection*, 15 (9), 11-14.
17. Azariadis, P., Moulitanitis, V., Alemany, S., González, J.C., de Jong, P., van der Zande, M., Brands, D. (2007). Virtual Shoe Test Bed: A Computer-Aided Engineering Tool for Supporting Shoe Design. *Computer-Aided Design & Applications*, 4 (6) 741-750.
18. Azariadis, P., Aspragathos, N. (2001). Geodesic Curvature Preservation in Surface Flattening Through Constrained. *Global Optimization, Computer-Aided Design*, 33(8), 581-591.
19. Azariadis, P., Sapidis, N. (2004). Planar Development of Free-Form Surfaces: Quality Evaluation and Visual Inspection. *Computing*, 72(1-2), 13-27.
20. Basford, J.R., Smith, M.A. (1988). Shoe Insoles in Workplace. *SHC Orthopaedic*, 11(2) 285-288.
21. Bates, B. T., Osternig, L. R., Sawhill, J. A. (1983) An assessment of subject variability, subject-shoe interaction, and the evaluation of running shoes using GRF data. *Journal of Biomechanics*, 16(3), 181-191.
22. Berquist K., Abeysekera J. (1994). Ergonomic aspects of safety shoes worn in the cold climate. In: *Proceedings of The 3rd Pan-Pacific Conference on Occupational Ergonomics*, pp. 590-594.
23. Bieber J.M, Coates J.C., Lohmann K., Dannof J. (1988). The effect of pronation-controlling orthotic devices on pressure and force under the foot during dynamic stance. *Physical Therapies*, 68, 805.

24. Boer, C. R. Dulio, S., Jovane, F. (2004) Editorial: Shoe design and manufacturing, *Int. Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17(7), 577-582.
25. Boulton A.J.M., Franks C.I., Betts R.P., Duckworth T., Ward J.D. (1984). Reduction of abnormal foot pressures in diabetic neuropathy using a new polymer insole material. *Diabetes Care*, 7(1),42-46.
26. Boulton A.J.M., Hardisty C.A., Betts R.P., Franks C.I., Worth R.C., Ward J.D. y Duckworth T. (1983) Dynamic foot pressure and other studies as diagnostic and management aids in diabetic neuropathy. *Diabetes Care*, 6(1), 26-33.
27. Bouskill L., N. Sheldon, K. Parsons, W. R. Withey, (1998a). The effect of clothing fit on the clothing ventilation index. *Contemporary ergonomics*. Taylor & Francis (Eds.), London, pp. 511-514
28. Bouskill L., R. Livingston, K. Parsons, W. R. Withey, (1998b). The effect of external air speed on the clothing ventilation index. *Contemporary ergonomics*. Taylor & Francis, London, pp. 540-544.
29. Bowden, F. P., Tabor, D. (1982). *Friccion: an introduction to Tribology*. Krieger Publishing Company.
30. Broom N.D. (1986). Structural consequences of traumatising articular cartilage. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 45, 225-234.
31. Bransby-Zachary, MA., Stother, IG., Wilkinson, RW. (1990). Peak pressure in the forefoot. *Journal of bone and joint surgery –British volume*, 72 (4), 17-721
32. Brown M., Rudical S., Esquenazi A. (1996). Measurement of Dynamic Pressures and the Shoe-Foot interface during normal walking with various foot orthoses using the FSCAN system. *Foot & Ankle*, 17(3), 152-156.
33. Burger E.S. (1952) The measurement of the static forces at the weight bearing points of the feet with reference to critical heel heights and 'split heel' factors. *Chiropractic Therapy*, 35, 1-17.
34. Cavanagh P. R., Morag, E., Boulton, A. J. M., Young, M. J., Deffner, K. T., Pammer, S. E. (1997) The relationship of static foot structure to dynamic foot function. *Journal of Biomechanics*, 30, 243-250.
35. Cavanagh P.R., Sims D.S. Jr. & Sanders L.J. (1991a). Body mass is a poor predictor of peak plantar pressure in diabetic men. *Diabetes Care*, 14(8), 750-755.
36. Cavanagh, P.R., Lafortune, M. A. (1984a) Ground reaction forces in distance running. *Journal of Biomechanics*, 13(5), 397-406.
37. Cavanagh, P. R. (1980a). *The running shoe book*. In: Anderson World, Inc., Mountain View, California.

38. Cavanagh P.R., Ae M. (1980b). A technique for the display of the pressure distribution under the foot. *Journal of Biomechanics*, 13, 69-75.
39. Carley, P. (1998). Postal workers respond positively to shoe inserts. *Biomechanics*, 5, 39.
40. Chaffin, D. B., Woldstad, J. C., Trujillo, A., (1992). Floor/shoe slip resistance measurement'. *American Industrial Hygiene Association*, 53 (5) 283-289.
41. Cham, R., Redfern, M. S. (2001) Lower extremity corrective reactions to slip events. *Journal of Biomechanics* 34, 1439-1445
42. Cham, R., Redfern, M. S. (2002) Changes in gait when anticipating slippery floors. *Gait and Posture*, 15, 159-171
43. Chen, H., Nigg, B. M., Koning, J. (1994). Relationship between plantar pressure distribution under the foot and insole comfort. *Clinical Biomechanics*, 9, 335-341.
44. Cheng, F. T., Perng, D. B. (1999), A systematic approach for developing a foot size information system for shoe last design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 25, 171 – 185.
45. Cheung, J.T, Yu, J., Wong, D.W., Zhang, M. (2009). Current methods in computer-aided engineering for footwear design. *Footwear science*, 1:1,31-46
46. Chu, M.L.; Yazdani-Ardakani, I.A.; Askew, M.J. (1986) An in vitro simulation study of impulse force transmission along the lower skeletal extremity. *J. Biomech.* 19, 979-987.
47. Clarke T.E. (1980) The pressure distribution under the foot during barefoot walking. Doctoral dissertation, The Pennsylvania State University.
48. Clarke T.E., Cooper, L.B., Clark, D. E. Hamill, C.L. (1985) The effect of Increased Running speed upn peak shank deceleration during ground contact. In *Biomechanics IX-B*. 101-105.
49. Cochran, W.G., Cox, G.M. (1983). *Diseños experimentales*. Mexico: Ed. Trillas.
50. Cohen, M.L. (1977). Measurement of the thermal properties of human skin: a review. *J. Invest. Dermatol.* 69, 333-338.
51. Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd Edition). Lawrence Earlbaum Associates, Hillsdale, NJ
52. Collins, J.J., Whittle, M.W.. (1989) Impulsive Forces During Walking and Their Clinical Implications. *Clinical Biomechanics.*, 4, 179-187.

53. Corlett, E.N. (1981) Pain, Posture and Performance. Stress, Work, Design and Productivity. Corlett, N., Wilson, J., Manenica, I. (Eds.) Taylor & Francis. London, 331-344.
54. Corlett, E. N., Lloyd, P. V., Tarling, C., Troup, J. D. G., Wright, B. (1992). The guide to the handling of patients. National Back association. Teddington, Middlesex, 3rd edition. Deliverable 3.3.2 p. 14
55. Donn, J. M., Porter, D. (1989). The effect of the footwear mass on the gait patterns of unilateral below-knee amputees. *Prosthetics and Orthotics International*, 13, 140-144.
56. Durá, J. V., Hoyos, J.V., Martinez, A., Lozano, L. (1999). The influence of friction on sports surfaces in turning movements. *Sports engineering*. 2, 97-102.
57. Durá, J.V., Alcántara E., Zamora T., Balaguer E., Rosa D. (2005) Identifiacction of floor friction safety level for public buildings considering mobility disables people needs. *Safety science* 43, 407-423.
58. EN 13287:2004 (2004). Safety, protective and occupational footwear for professional use. Test method for slip resistance
59. EN 344:1992 (1992). Requirements and test methods for safety, protective and occupational footwear for professional use. European Committee for Standardization (CEN). Brussels, Belgium.
60. Endrusick, T.L. (1992). Effects of prolonged water contact on the thermal insulation of cold weather footwear. En: *Proceedings of the Fifth International Conference on Environmental Ergonomics* (Eds: W.A. Lotens y G. Havenith). Maastricht, The Netherlands, 188-189.
61. Fernando D.J.S., Masson E.A., Veves A., Boulton AM.J. (1991) Relationship of limited joint mobility to abnormal foot pressures and diabetic foot ulceration. *Diabetes Care* 14(1), 8-11.
62. Folman Y., Wosk J., Voloshin A., Liberty S. (1986) Cyclic impacts on heel strike: A possible biomechanical factor in the etiology of degenerative disease of the human locomotor system. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 104. 363-365.
63. Forner, A., García, A.C., Alcántara, E., Ramiro, J., Hoyos, J.V.; Vera, P. (1995) Properties of shoe insert materials related to shock wave transmission during gait. *Foot Ankle International*, 16(12),778-86.
64. Flügge W. (1967). *Viscoelasticity*. Prager, W., Kestin J. (Eds.). Blaisdell publishing company. A division f Ginn and company. Waltham, Massachusetts. Toronto. London.

65. Gage J.R. (1990). An overview of normal walking. In: Instructional Course Lectures. Vol. XXXIX. Greene, W.B. (Ed.), American Academy of Orthopaedic Surgeons, pp. 291-288
66. García, A.C., Durá, J.V., Ramiro, J., Hoyos, J.V., Vera, P. (1994) Dynamic Study of Insole Materials Simulating Real Loads. *Foot and Ankle*, 15(6), 311-323.
67. George, M. (1993). Avoiding slip-ups. *SATRA Bull.*, N° Octubre , pp. 130-131.
68. González, J.C. (2007). Thesis. Modelización de la influencia del calzado y las condiciones ambientales en la respuesta termofisiológica del pie y el confort térmico. Departamento de ingeniería mecánica y de materiales. Universidad politécnica de valencia
69. Gonzalez, J.C., Garcia, A.C., Vivas M.J., Ferrus, E., Alcántara, E., Forner, A. (1999). A new portable method for the measurement of pressure-discomfort threshold on the foot plant. In: Proceedings of the IV Intl. Symposium on Footwear Biomechanics, International Society of Biomechanics. Canmore, Canada.
70. Gooding, G.A., Stess, R.M., Graf, P.M. (1986) Sonography of the sole of the foot: evidence for loss of foot pad thickness in diabetes and its relationship to ulceration of the foot. *Investigative Radiology*, 21 45-48.
71. Goonetilleke, R. S., (1988). Designing to minimize discomfort. *Ergonomics in Design*, 6 (3), 12-19.
72. Goonetilleke, R.S., (1999). Footwear cushioning: relating objective and subjective measurements. *Human Factors* 41 (2), 241–256.
73. Goonetilleke, R. S., Luximon, A., Tsui, K.L. (2000). The Quality of ootwear fit: What we know, don't know and should know. In: Proceedings of the IEA 2000 HFES 2000 Congress.
74. Grönqvist, R., Roine, J., Järvinen, E., Korhonen, E., (1989). An apparatus and a method for determining the slip resistance of shoes and floors by simulation of human foot motions. *Ergonomics*, 32 (8), 979-995.
75. Grönqvist, M; (1995a). A dinamic method for assessing the pedestrian slip resistance. *People at Work*, Research Report, Finnish Institute Of Occupational Health.
76. Grönqvist, M; (1995b). Mechanism of friction and assessment of slip resistance od new and used footwear soles on contaminated floors. *Ergonomics*,38(2) 224-241.
77. Haber R.N., Haber L. (1997). One size fits all?. *Ergonomics in Design*. pp. 10-17.

78. Hänel Sven-Erik, T. Dartman, R. Shishoo, 1997. "Measuring methods for comfort rating of seats and beds". *International J. of Industrial Ergonomics*, Vol. 20, 163-172.
79. Hawes, M.R., Sovak, D. (1994a). Quantitative morphology of human foot in a North American population. *Ergonomics*, 37(7), 1213-1226.
80. Hawes, M.R.; Sovak, D., Miuashita, M. (1994b). Ethnic differences in forefoot shape and the determination of shoe comfort. *Ergonomics*, 37 (1), 187-196.
81. Helander M.G., Zhang, L. (1997) Field studies of comfort and discomfort in sitting. *Ergonomics*, 40(9) 895-915
82. Helander M.G. (2003). Forget about ergonomics? Focus on aesthetics and comfort. *Ergonomics*, 46, 1306-1319
83. Hennig E.M., Rosenbaum D. (1991) Pressure Distribution Pattern under the Feet of Children in Comparison with Adults. *Foot & Ankle* 11(5), 306-311.
84. Hennig, E.M., Valiant, G.A., Liu, Q. (1994). Relationships between perception of cushioning and pressure distribution parameters in running shoes. *Journal of Biomechanics*, 27(6), 669
85. Hennig, E. M., Staats, A., Rosenbaum, D. (1994). Plantar pressure distribution patterns of young school children in comparison to adults. *Foot & Ankle*, 15, 35-40.
86. Hennig, E. M. , Lafortune, M.A. (1991). Relationship Between Ground Reaction Forces and Tibial Bone Acceleration Parameters. *International Journal of Sports Biomechanics*, 7, 303-309.
87. Hertzberg, H. T. E. (1972). The human buttock in sitting: Pressures, patterns, and palliatives. *American Automobile Transactions*, 72, 39-47.
88. Holmes Jr. G.B., Timmeman L. (1990). A quantitative assesment of the effect of metatarsal pads on plantar pressures. *Foot & Ankle*. 11(3), 141-145.
89. Humphreys, N., Webb, L.H., Parsons, K.C., (1998). A comparison of thermal comfort of different wheelchair seating materials and an office chair. *Contemporary ergonomics*, Taylor&Francis (Eds.), London, pp. 525-529.
90. Hutton W.C., Dhanendram M. (1979). A study of the distribution of the loads under the normal foot during walking. *International Orthopaedics*, 3, 153-157.
91. Hutton W.C., Dhanendram M. (1981). The mecanics of normal and hallux valgus feet; a quantitative study. *Clinical Orthopaedics*, 157, 7-13.
92. Hutton W.C., Scott J.R.R., Stokes I.A.F. (1976). The mechanics of the foot. In: *The foot and his disorders*. Klenerman L.(Ed.), Blakwell. Oxford, UK, pp. 30-48.

93. ISO 4651:1988 Cellular rubbers and plastics -- Determination of dynamic cushioning performance.
94. ISO 10551:1995 Ergonomics of the thermal environment -- Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales.
95. Jaasveld, Van. H. U., Grootenboer H. J., Vries, De, J.. (1990). Acceleration due to impact at heel strike using below-Knee prosthesis. *Prosthetics and Orthotics International*. 14, 63-66..
96. Jahss, M.H., Kummer, F., Michelson, J.D. (1992b). Investigations into the fat pads of the sole of the foot: heel pressure studies. *Foot & Ankle*, 13(5), 227-232.
97. James, D. I. (1980). A broader look at pedestrian friction'. *Rubber chemistry and technology*, 53, 512-541.
98. James, D.I. (1983). Rubbers and plastics in shoes and flooring: the importance of kinetic friction. *Ergonomics*, 26(1), 83-99.
99. Jefferson R. J., Collins J. J., Whittle M. W., Radin E. L., O`Connor J. J. (1990). The role of the quadriceps in controlling impulsive forces around heel strike. *Proc Inst Mech Eng H*. 204:21-8.
100. Johnson G. R. (1988). The effectiveness of shock-absorbing insoles during normal walking. *Pros. Orthot. Int.* 12. 91-95.
101. Johnson, J. (1994). Footwear alleviates aches, fatigue through better fit, shock absorption. *Occupational Health Safety*. 63(3), 68-69.
102. Jordan C., Bartlett R., (1995). A method of measuring pressure distribution on the dorsum of the foot. *Proceedings of the Second Footwear Biomechanics Meeting, Cologne, Germany*, 31.
103. Jordan C., Payton C., Bartlett R. (1997). Perceived comfort and pressure distribution in casual footwear. *Clinical Biomechanics*, 12(3), S5
104. Jorgensen U. (1985). Achillodynia and loss of heel pad shock absorbency. *American Journal Sports Medicine*, 13(2), 128-132.
105. Jorgensen U., Ekstrand J. (1988). Significance of heel pad confinement for the shock absorption at heel strike. *International Journal of Sports Medicine*. 9(6), 468-473.
106. Jorgensen U., Bojsen-Moeller F. (1989). Shock absorbency of factors in the shoe/heel interaction with special focus on the role of the heel pad. *Foot and Ankle*, 9(11), 294-299.
107. Jorgensen, U., Larse, E., Varmarken, J. E. (1989a). The HPC:Device: a method to quantify the heel pad shock absorbency. *Foot Ankle International*, 10 (2), 93-98.

108. Jung, K., Schenk, H., (1990). An international comparison of test methods for determining the slip resistance of shoes. *Journal of Occupational Accidents*, 13, pp. 271-290.
109. Kapandji, A.I. (1982). *The Physiology of the Joints: Annotated Diagrams of the Mechanics of the Human Joints*. Edition 5. Elsevier Health Sciences.
110. Karwowski, W., Jamaldin, B. (1996). Methodological framework for quantifying compatibility of complex ergonomic systems. In *Proceedings of the 4th Pan-Pacific Conference on Occupational Ergonomics*. Taipei, Taiwan: Ergonomics Society of Taiwan, pp. 676-679
111. Katoh, Y., Chao, E.Y.S., Laughman R.K., Schneider E., Morrey B.F. (1983a). Biomechanical analysis of foot function during gait and clinical applications. *Clinical Orthopaedics*, 177, 23-33.
112. Kawabata, A., Tokura, H. (1993). Effects of two kinds of sport shoes with different structure on thermoregulatory responses. *Annals of Physical Anthropology*, 12(3), 165-171.
113. Keech, B., Hole, L. G., (1990). Sweat retention and distribution in men's shoes and hose. *Journal of Society of Leather Trades Chemists*, 55, 3-29
114. Kennedy, P.M., Inglis J.T. (2002). Distribution and behaviour of glabrous cutaneous receptors in the human foot sole. *Journal of Physiology*, 538(3), 995-1002
115. Kernozek, T. W., LaMott E.E. (1995). Comparisons of plantar pressures between the elderly and young adults. *Gait & Posture*. 3(3), 143-148
116. Khuns, J.G. (1949). Changes in elastic adipose tissue. *Journal of Bone Joint Surgery*, 31A: 542-547.
117. Kinoshita, H., Francis, P.R., Murae, T., Kawai, S., Ogawa, T. (1996). The mechanical properties of the heel pad in elderly adults. *European Journal of Applied Physiology*, 73 (5), 404-409.
118. Kolarik, W. J.(1995). *Crating Quality*. New York : McGraw Hill.
119. Kuijt-Evers, L.F.M., Twisk, J., Groenesteijn, L., de Looze, M.P., Vink, P. (2004). Identifying factors of comfort in using hand tools. *Applied Ergonomics*, 35(6), 453-458.
120. Kuijt-Evers, L.F.M., Twisk, J., Groenesteijn, L., de Looze, M.P., Vink, P. (2005). Identifying predictors of comfort and discomfort in using hand tools. *Ergonomics*, 48(6), 692-702.
121. Kunde, S., Milani, T.L., Sterzing, T. (2009). Relationship between running shoe fit and perceptual, biomechanical and mechanical parameters. *Footwear Science*,1(1),19-20

122. Bernhard, K., (1992). Measuring the microclimate in shoes with a view to quantitative assessment of wearing comfort.
123. Bernhard, K., (1994). The physiology of comfort". Presentation at SATRA - Conference 4/5th.
124. Lafortune, M. A., Hennig, E. M. (1992). Cushioning properties of footwear during walking, accelerometer and force platform measurements. *Clinical Biomechanics*, 7, 181-184.
125. Lake, M. J., Lafortune, M. A. (1998). Mechanical inputs related to perception of lower extremity impact loading severity. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30 (1), 136-143.
126. Laing, P., Klenerman L. (1991). The foot in diabetes (Cap 9.). In *The foot and its disorders*. Klenerman, L. (ed.) Blackwell Scientific Publications.
127. Landsman, A.S., Sage R. (1997). Off-loading neuropathic wounds associated with diabetes using ankle-foot orthosis. *Journal of American Podiatric Medicine Association*, 87(8), 349-357.
128. Lange, J.S., Maiwald, C, Mayer, T.A., Schwanitz, S., Odenwald, S., Milani, T.L. (2009). Relationship between plantar pressure and perceived comfort in military boots. *Footwear Science*, 1(1), 30 - 32
129. Leclercq, S., Tisserand, M, Saulnier, H. (1994). Slip resistant footwear: a means for the prevention of slipping. *Advances in Industrial Ergonomics and Safety VI*.
130. Leclercq, S., Tisserand, M, Saulnier, H. (1995). Tribological concepts involved in slipping accidents analysis. *Ergonomics*, 38(2), 197-208.
131. Lee, K. (2006). CAD System for Human-Centered Design, *Computer-Aided Design & Applications*, 3(5), 615- 628.
132. Lemon, T., Son, D. (1989). The natural history of a microslip. In *Advances in Industrial Ergonomics and Safety I*. Mital, A. (Ed.), Taylor & Francis, London, pp. 663-638.
133. Leng, J., Du, R. (2006). A CAD Approach for Designing Customized Shoe Last, *Computer-Aided Design & Applications*, 3(1-4), 377-384.
134. Lewis, G., Tan, T., Shiue, Y. (1991). Characterisation of the performance of shoe insert materials. *Journal of American Podiatric Medicine Association*, 81(8), 418-424.
135. Light, L.H., McLellan, G.E., Klenerman, L. (1980). Skeletal transients on heel strike in normal walking with different footwear. *Journal of Biomechanics*, 13, 477-480.

136. Loyd, D. G., Stevenson, M. G. (1992). An Investigation of floor surface profile characteristics that will reduce the incidence of slips and falls. *Mechanical Engineering Transactions*, 17(2), 99-105.
137. Lund, J. (1984a). Falls and their causes. *Journal of Gerontological Nursing* 9, 142-149.
138. Lund, J. (1984b). Accidents falls at work in the home and during leisure activities. *Journal of Occupational Accidents* 6, 181-193.
139. Luximon, A., Goonetilleke, R.S., Tsui, K.L. (2001). A fit metric for footwear customization. In *Proceedings of the 2001 World Congress on Mass Customization and Personalization*, Hong Kong, (CD-ROM)
140. Mann, R.A., Coughlin, M.J. (1993). Adult hallux valgus. In: Mann RA, Coughlin MJ, eds. *Surgery of the Foot and Ankle*. St Louis, Mo: Mosby-Yearbook;
141. Martinez Martin, A.A, Pérez García, J.M, Herrera Rodríguez, A. (1997). Tratamiento Ortopédico de las metatarsalgias y su valoración mediante baropodometría electrónica. *Revista de ortopedia y traumatología*. 42, 456-462.
142. Mayer, A., Rollin, M. (1982). Chaussures de sécurité a tige haute. Essais relatifs au confort. *Cahiers de Notes Documentaires*. 108, 3^o trimestre.
143. McLellan, T. M., Pope, J. I., Cain, J. B., Cheung, S. S. (1996). Effects of metabolic rate and ambient vapour pressure on heat strain in protective clothing. *European Journal of Applied Physiology*, 74, 518-527.
144. McMahon, T.A., Greene, P.R. (1979), The Influence of Track compliance on running. *Journal of Biomechanics*, 12, 893-904.
145. Mermet, J., Roche, J. J. (1982). The introduction of CAD in the shoe industry, *Computers in Industry*, 3(3), 181-186.
146. Milani, T. L., Hennig, E. M., Lafortune, M. A. (1997). Perceptual and biomechanical variables for running in identical shoe constructions with varying midsole hardness. *Clinical Biomechanics*, 12(5), 294-300.
147. Milgrom, C., Giladi, M., Kashtan, H., Simkin, A., Chisi, R., Margulies, J., Steinberg, R., Aharonson, Z., Stein, M. A. (1985). Prospective study of the effect of a shock-absorbing orthotic device on the incidence of stress fractures in military recruits. *Foot & Ankle*. 6 (2), 101-104.
148. Milgrom, C., Finestone, A., Shlamkovitch, N., Wosk, J., Laor, A., Voloshin, A., Eldad, A. (1992). Prevention of overuse injuries of the foot by improved shoes shock absorption. *Clinical Orthopaedics* 281, 189-192.

149. Miller, J. E., Nigg, B. M., Liu, W., Stefanyshyn, D. J., Nurse, M. A. (2000). Influence of foot, leg and shoe characteristics on subjective comfort. *Foot & Ankle International*, 21 (9), 759-767.
150. Mondelo, P. R., Gregori, E., Comas, S., Castejón, E. (1995). *Ergonomía 2. Confort y estrés térmico. Aula teórica. Ediciones UPC.*
151. Monette, M., Weiss-Lambrou, R., Dansereau, J. (1999). In search of a better understanding of wheelchair sitting comfort and discomfort. Sprigle S (Ed.), Paper presented at the RESNA Annual conference.
152. Mueller, M.J., Diamond, J.E., Ellito, A., Sinacore, D.R. (1989). Intensity, limited joint mobility and plantar ulcers in patients with diabetes mellitus. *Physical Therapy*, 69, 453-459.
153. Mündermann, A., Stefanyshyn, D.J., Nigg, B.M. (2001). Relationship between comfort of shoe inserts and anthropometric and sensory factors. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(11), 1939–1945.
154. Mündermann, A., Nigg, B.M., Stefanyshyn, D.J., Humble, R.N. (2002). Development of a reliable method to assess footwear comfort during running. *Gait & Posture*, 16, 38–45
155. Munro, M., Abernethy, P., Paul, I., Rose, R., Simon, S., Pratt, G., Radin, E. (1975). Peak dynamic force in human gait and its attenuation by the soft tissues. *Orthopaedic Research Society*, 21. Abstract 65.
156. Nicol K., Hennig E.M. (1978) Measurement of pressure distribution by means of a flexible, large surface mat. *Biomechanics VI-A*. University Park Press, Baltimore, USA, 374-380.
157. Nielsen, R., Olesen, B.W., Fanger, P.O. (1985). Effect of physical activity and air velocity on the thermal insulation of clothing. *Ergonomics*, 28, 1617-1631.
158. Nigg, B. (1986). Load on the locomotor system and modelling. In the book: *Biomechanics of running shoes*. De. Nigg, B. Human Kinetic Publishers. Champaign. Illinois.
159. Nigg, B. M., Bahlsen, A. H. (1988) Influence of heel flare and midsole construction on pronation, supination, and impact forces for heel toe running. *International Journal of Sport Biomechanics*, 4, 205-219.
160. Nigg, B.M., Herzog, W. (1994). *Biomechanics of the musculoskeletal system*. Chapter 3.3.3. Nigg, B. M, Herzog, W. (Eds.) Calgary. Wiley & Sons, pp. 220-250.
161. Noe, D. A., Hoffmann, M. S., Askew, M. J., Gradisar, J. A. (1993). Role of the calcaneal heel pad and polymeric shock absorbers in attenuation of heel strike impact. *Journal of Biomedical Engineering*, 15, 23-26.

162. Nowroozi, F., Salvaneli, M. L., Gerver, I. H. (1983). Energy expenditure in hip disarticulation and hemipelvectomy amputees. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 64(7), 3000- 3003.
163. Nyska, M., McCabe, C., Linge, K., Laing, P., Klenerman, L. (1995). Effect of the shoe on plantar foot pressures. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 66(1), 53-56.
164. Olaso, J., González, J.C., Alemany, S., Medina, E., López, A., Martín, C., Prat, J., Soler, C. (2007). Study of the influence of fitting and walking condition in foot dorsal pressure. Winner of the ADIDAS applied research award in the Footwear Biomechanical Symposium, Taipei, Taiwan.
165. Page, A., Tortosa, L., García, C., Moraga, R., Verde, V. (1994). Furniture design based on subjective tests. Application of Discriminant Analysis Methods. International Ergonomics Association Congress, IEA'94. Toronto.
166. Paris, I., Handley, D. (2004). CAD usage and knowledge base technology in shoe design and development, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17(7), 595-600.
167. Peet, M. (1998). Fitting the foot. *SATRA Bulletin* APRIL.
168. Perkins, P. (1993). Comfort Workshop. *Satra Bulletin* November, 154.
169. Perkins, P. J. (1978). Measurement of slip between shoe and ground during walking; Walkway surfaces: Measurement of slip resistance, ASTM STP 649, Anderson, C., Senne, J. (Eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 71-87.
170. Perkins, P. J., Wilson, M. P. (1983). Slip resistance testing of shoes - new developments. *Ergonomics*, 26(1), 73-82.
171. Perry, J. (1983). Anatomy and biomechanics of the hindfoot. *Clinical Orthopaedics*, 177, 9-15.
172. Perry, J. (1992). *Gait analysis: Normal and Pathological Function*. Slack, Thorofare, NJ.
173. Pfeffer, G. et al. (1999) Comparison of custom and prefabricated orthoses in the initial treatment of proximal plantar fasciitis. *Foot Ankle International*, 20(4), 214-21.
174. Piqué-Vidal, C. (2000). Cirugía percutánea del pie: los juanetes. *JANO EMC, Terapéutica*; 58, 1329, p. 56.
175. Pooley, R.W., (1978). Measurement of Frictional Properties of Footwear sole and heel materials. Anderson, C., Senne, J. (Eds.), American Society for Testing and Materials, pp. 11-20.

176. Pratt D. J. (1990). Long term comparison of some shock attenuating insoles. *Prosthetics and Orthotics International*, 14, 59-62.
177. Prichasuck, S., Mulprueck, P., Siritwongpairat, P. (1994a). The heel pad compressibility. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 300, 197-200.
178. Prichasuck, S. (1994b) The heel pad in plantar heel pain. *Journal of Bone Joint Surgery*. 76B(1), 140-142.
179. Purves, D., Augustine, G.J, Fitzpatrick, D., Katz, L.C, Lamantia, L.S, Mcnamara, J.O, Williams, M.S. (2001). *Neuroscience*, 2nd edition. Sinauer Associates, Inc. All rights reserved.
180. Radin, E.L., Paul, I.L. (1971). Response of joints to impact loading. *Arthritis and Rheumatism*, 14 (3), 356-362.
181. Radin, E.L., Parker, G. H., Pugh, J. W., Steinberg, R. S., Paul, I.L., Rose, R.M. (1973). Response of joints to impact loading- III. Relationship between trabecular microfractures and cartilage degeneration. *Journal of Biomechanics*, 6 (1), 51-58.
182. Radin, E.L., Paul, I.L., Rose, R.M. (1980). Osteoarthritis as a final common pathway. In *The aetiopathogenesis of osteoarthritis*. Nuki G. (Ed.). Turnbridge Wells: Pitman Medical, pp. 84-89.
183. Radin, E.L. (1987). Osteoarthritis: what is known about prevention?. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 222, 60-65.
184. Radin, E.L., Yang, K., Riegger, C., Kish, V., O'Connor, J. J. (1991). Relationship between lower limb dynamics and knee joint pain. *Orthopaedic Research*. 9 (3), 398-405.
185. Rajja, L. (1989). Effect of work clothing on sweat rate. Taylor & Francis, pp. 225-232.
186. Ramiro, J., Alcántara, E., Corner, A., Ferrandis, R., García, A., Durá, J.V., Vera, P. (1995). *Guía de recomendaciones para el diseño de calzado*. Instituto de Biomecánica.
187. Redfern, M. S., Bidanda, B. (1994). Slip resistance of the shoe-floor interface under biomechanically-relevant conditions. *Ergonomics*, 37(3), 511-524.
188. Robert, O. A., Chaffin, D. B. (1985). Ergonomic analysis of slip-resistance measurement devices. *Ergonomics*, 28(7), 1065-1079.
189. Rossi W.A., Ross, T. (1984). *Professional shoe fitting*. National Shoe Retailer Association, New York.
190. Rossi, W.A. (1986). The quandary of shoe flexibility. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 76(6), 359-362.

191. Rissanen, S., Rintamäki, H. (1997). Thermal responses and physiological strain in men wearing impermeable protective clothing in the cold. *Ergonomics*, 40(2), 141-150.
192. Robbins, S., Gouw, G. (1990) Athletic footwear and chronic overloading: A brief Review. *Sports Medicine*, 9(2), 76-85.
193. Rome, K. (1990). Behavior of Orthotic materials in Chiropody. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 80(9), 471-478.
194. Rosenbaum, D., Hautmann, S., Gold, M., Claes, L. (1994). Effects of walking speed on plantar pressure patterns and hindfoot angular motion. *Gait & Posture*, 2(3), 191-197.
195. Santee, W.R., Blanchard, L.A. (2001). Thermal properties of footwear at varying altitudes. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 72, 576-578.
196. Schaff, P., Hauser, W. (1987). Measurements of pressure distribution in the human lower leg in ski boots. *Sportverletzung-Sportschaden*, 3, 118-129.
197. Sellgren, U. (2001). Aspects of simulations in product development. *Endrea-17, Simulation in product development*, Andersson, S. (Ed.), The Swedish Engineering Design Research and Education Agenda Machine Elements, pp. 1-20,
198. Shorten, N., Wright, J., Valiant, G. (1988). Effects of shoe flexibility on ground reaction forces and foot kinematics during fast walking. *En Biomechanics XI-B*. 710-714. Free University Press, Amsterdam.
199. Shorten M., Winslow D. S. (1992). Spectral analysis of impact shock during running. *International Journal of Sports Biomechanics*, 8, 288-304.
200. Shackel, B., Chidsey, K.D., Shipley, P. (1969). The assessment of chair comfort. *Ergonomics*, 12(2), 296-306.
201. Smeathers, J.E. (1989). Measurement of Transmissibility for the Human Spine During Walking and Running. *Clinical Biomechanics*, 4(1), 34-40.
202. Smith, G.S., Falk, H., (1987). Unintentional injuries. *American Journal of Preventive Medicine*, 3 (5S), 143-163.
203. Snellen, J.W. (1966). Mean body temperature and the control of thermal sweating. *Acta Physiologica et Pharmacologica Neerlandica*, 14, 99-174.
204. Soames, R.W. (1985). Foot pressure patterns during gait. *Journal of Biomedical Engineering*, 7, 120-126.
205. Slater, K. (1985). *Human Comfort*. Thomas, C.C. Publisher.

206. Stastna P. Results of foot measurements in Czechoslovakia and their application to industrial practice. Svit Sate Shoe Company, Zlin, CSFR
207. Stefanyshyn, D.J., Nigg, B.M. (1997). Mechanical energy contribution of the metatarsophalangeal joint to running and sprinting. *Journal of Biomechanics*, 30,1081-1086.
208. Steinbach, H.L., Russell, W. (1964). Measurement of the heel pad as an aid to diagnosis of acromegaly. *Radiology*, 82, 418-422.
209. Stokes, I.A.F, Scott, J.R.R, Hutton, W. C. (1974). Force Distribution Under the Foot - A Dynamic Measuring System, *Biotned. Eng.*, 140-143.
210. Stott, J.R.R., Hutton, W.C., Stokes, I.A.F. (1973) Forces under the foot. *Journal of Bone Joint Surgery*. 55B, 335-344.
211. Strandberg, L., Lanshammar H. (1981). The dynamics of slipping accidents. *Journal of Occupational Accidents*, 3, 153-162.
212. Thomas, L. (1997). Retrospective power analysis. *Conservation Biology* 11(1), 276-280.
213. Thompson F.M., Coughlin M.J. (1994.) The high price of high-fashion footwear. *Jouranal of Bone Joint Surgery American*, 10, 1586-1593.
214. Tooms, R. E., Criffin, R. W., Green, P. (1987). Effect of viscoelastic insoles on pain. *Orthopaedics* 10, 1143.
215. Turner, R., Peet, M. (1993). Assessment of foot comfort: Part Two. *SATRA Bulletin*, pp. 252-253.
216. Trulsson, M. (2001). Mechanoreceptive afferents in the human sural nerve. *Experimental Brain Research* 137, 111–116.
217. Valiant, G.A. (1984). A determination of the mechanical characteristics of the human heel pad 'in vivo'. PH. D. Thesis. Dir. Cavanagh, P. R. Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA.
218. Vandeurzan U. (2001). Empowering a real breakthrough in functional performance engineering. In: LMS conference for physical and virtual prototyping, Paris.
219. Verbitsky, O., Mizrahi, J., Voloshin, A., Treiger, J., Isakov; E. (1998). Shock Transmission and Fatigue in Human Running. *Journal of Applied Biomechanics*. 14: 300-311.
220. Vigano, G., Mottura, S.; Greci, L., Sacco, M.; Boer, C. R. (2004). Virtual reality as a support tool in the shoe life cycle, *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, 17(7), 653-660.

221. Voloshin, A. S., Wosk, J. (1981). Influence of Artificial Shock Absorbers on Human Gait. *Clinical Orthopaedics and Related Research.*, 160, 52-56.
222. Voloshin, A. S., Wosk, J. (1982). In-vivo study of low back pain and shock absorption in human locomotor system. *Journal of Biomechanics*, 15, 21-27.
223. Voloshin, A.S., Burger, C.P, Wosk, J., Arcan, M. (1985). An In Vivo evaluation of the leg's Shock-Absorbing Capacity.
224. Voloshin A.S. (1993a). Effect of fatigue on the attenuational capacity of human musculoskeletal system. ISB-93. Perth. 1428-1429.
225. Voloshin A.S. (1993b). Comparative Study of shock absorbing insoles. Personal communication.
226. Voloshin, A.S., Loy, D.J. (1994). Biomechanical evaluation and management of the shock waves resulting from high-heel gait: I temporal domain study, *Gait & Posture*, 2(2), 117–122.
227. Whittle, M. W. (1997). The use of viscoelastic materials in shoes and insoles: a review. Personal Communication.
228. Whittle, M. K., Orofino, T. K., Miller, K. (1992). Relationship between mechanical properties of carpet and comfort in walking. *North American Congress of Biomechanics II*, 283-284.
229. Wickstrom, G., Niskanen, T., Riihimaki, H. (1985). Strain in the back in concrete reinforcement work. *British Journal of Industrial Medicine* 42, 233-239.
230. Wilkinson. P. (2007). The changing role of physical testing in vehicle development programmes. *Journal of Terramechanics*, 44, 15–22
231. Wilson, M. P. (1990). Development of SATRA Slip test and tread pattern design guidelines. *Slips, stumbles, and falls: Pedestrian footwear and surfaces*, ASTM STP 1103, pp. 113-123.
232. Witana, C.P., Feng, J., Goonetilleke, R.S., (2004). Dimensional differences for evaluating the quality of footwear fit. *Ergonomics* 47 (12), 1301–1317.
233. Witana, C.P., Goonetilleke, R.S., Xiong, S., Au, E.Y.L. (2009). Effects of surface characteristics on the plantar shape of feet and subjects' perceived sensations. *Applied Ergonomics*, 40, 267– 279
234. Witana, C.P., Goonetilleke, R.S., Feng, J., A. (2003) 2d approach for quantifying footwear fit. IEA Congress.
235. Wolf, S., Simon, J., Patikas, D., Schuster, W., Armbrust, P., Döderlein, L. (2008). Foot motion in children shoes-A comparison of barefoot walking with shod walking in conventional and flexible shoes. *Gait & Posture*, 27(1):51-9.

236. Wosk, J., Voloshin, A. S. (1985). Low back pain: conservative treatment and artificial shock absorbers. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 66, 145.
237. Wosk, J., Voloshin, A. (1981). Wave attenuation in skeletons of young healthy persons. *Journal of Biomechanics*, 14, 261-208.
238. Wunderlich, R.E., Cavanagh, P.R. (2000). Gender differences in adult foot shape: implications for shoe design. *Official Journal of the American College of Sports Medicine*.
239. Yingling, V. R., Yack, H. J., White, S. C. (1996). The effect of rearfoot motion on attenuation of the impulse wave at impact during running. *Journal of Applied Biomechanics*. 12, 313-325.
240. Zamora, T., Alcántara, E., Payá, F., Portolés, J., Algora, E. (2008). Optimum friction level for walking over a floor. *Contemporary ergonomics 2008*. Bust, P.D. (Ed.). The Ergonomic Society. Universidad de Loughborough.
241. Zhang, L., Helander, M.G., Drury, C.G. (1996). Identifying factors in comfort and discomfort in sitting. *Human Factors*, 38 (3), 377-389.

ANEXO

<p>MUESTRAS DE CALZADO CASUAL EVALUADAS</p>		 <p>MODELO 2 ■ ● ▲</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU Plana Cierre: Mocasín</p>	 <p>MODELO 5 ■ ● ▲</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU Plana Cierre: Velcro</p>
<p>LEYENDA</p> <p>■ Muestra de 20 calzados para desarrollar el modelo de confort</p> <p>● Muestra de 5 calzados para validar el modelo de confort</p> <p>▲ Muestra de 11 calzados para validar los modelos de los test de propiedades funcionales</p>		 <p>MODELO 3 ■ ● ▲</p>	<p>Corte: Cuero + textil Plantilla: EVA no extraíble con inserto trasero de gel Suela: PU Plana Cierre: Acordonado</p>	 <p>MODELO 6 ■ ▲</p>	<p>Corte: Cuero vuelto + textil Plantilla: EVA no extraíble Suela: EVA+Patín de PU Plana Cierre: Acordonado</p>
 <p>MODELO 1 ■ ● ▲</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU tacón Cierre: Mocasín</p>	 <p>MODELO 4 ■ ● ▲</p>	<p>Corte: Cuero vuelto Plantilla: EVA extraíble Suela: PU Plana Cierre: Tira elástico</p>	 <p>MODELO 7 ■ ▲</p>	<p>Corte: Cuero + cuero vuelto Plantilla: EVA no extraíble con inserto trasero de gel Suela: PU Plana Cierre: Tira elástico</p>

 <p>MODELO 8 ■ ▲</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU Plana Cierre: Mocasin</p>	 <p>MODELO 11 ■</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA extraíble Suela: PU tacón Cierre: Mocasin</p>	 <p>MODELO 14 ■</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU Plana Cierre: Acordonado</p>
 <p>MODELO 9 ■ ▲</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU Plana Cierre: Velcro</p>	 <p>MODELO 12 ■</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU tacón Cierre: Mocasin</p>	 <p>MODELO 15 ■</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble con inserto trasero de gel Suela: PU Plana Cierre: Acordonado</p>
 <p>MODELO 10 ■ ▲</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU Plana Cierre: Acordonado</p>	 <p>MODELO 13 ■</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU Plana Cierre: Acordonado</p>	 <p>MODELO 16 ■</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: Cuero Tacón Cierre: Acordonado</p>

 <p>MODELO 17 ■</p>	<p>Corte: Cuero + Textil Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU Plana Cierre: Acordonado</p>	 <p>MODELO 20 ■</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA extraíble Suela: PU Plana Cierre: Velero</p>	 <p>MODELO 23 ■</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU Plana Cierre: Mocasín</p>
 <p>MODELO 18 ■</p>	<p>DESCRIPCIÓN Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU Plana Cierre: Acordonado</p>	 <p>MODELO 21 ■</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU Plana Cierre: Tira elástica</p>	 <p>MODELO 24 ■</p>	<p>Corte: Textil Plantilla: EVA extraíble Suela: PU Plana Cierre: Acordonado</p>
 <p>MODELO 19 ■</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: Cuero Tacón Cierre: Velero</p>	 <p>MODELO 22 ■</p>	<p>Corte: Cuero Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU Plana Cierre: Acordonado</p>	 <p>MODELO 25 ■</p>	<p>Corte: Cuero + Cuero vuelto Plantilla: EVA no extraíble Suela: PU Plana Cierre: Acordonado</p>