



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

# ANÁLISIS Y MEJORA CONTINUA DE LA CALIDAD DE PROCESOS DE SOLDADURA MEDIANTE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS EN UN PROVEEDOR DEL SECTOR DE LA AUTOMOCIÓN

AUTOR: IVÁN BLAY SOLANO

TUTOR: JUAN CARLOS GARCÍA DÍAZ

Curso Académico: 2016-17



## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar la ocasión para agradecer a mi familia y amigos todo su apoyo a lo largo de estos años de universidad que sin duda han significado mucho para mí. Sin sus ánimos y consejos el camino habría sido mucho más duro y sobretodo largo. A mi tutor, Juan Carlos, agradecerle su tiempo y dedicación para guiarme en este Trabajo Fin de Máster

Una mención especial merece la empresa Kemmerich Ibérica por darme la oportunidad de realizar este interesante proyecto con ellos, y especialmente a mis compañeros de departamento por sacar tiempo cuando lo necesitaba y por aceptar las ideas que he ido proponiendo.



## RESUMEN

Los diferentes procesos de soldadura son de gran importancia en el ámbito del sector de la automoción, y debido a los requerimientos específicos que deben cumplirse es determinante que los procesos estén bajo control, por ello el papel de la calidad es fundamental en cualquier empresa de dicha industria.

El presente proyecto aborda principalmente dos oportunidades de mejora relacionadas con la calidad en la soldadura:

Por una parte, la reducción de pruebas y ensayos para la obtención de los parámetros más adecuados en la soldadura de tuercas.

El método de ajuste empleado habitualmente en la empresa en estudio es el de prueba y error basado en la experiencia, con lo cual la introducción de una metodología concreta, el Diseño de Experimentos (DOE), mejora este aspecto sustancialmente, ya que con un número limitado de pruebas acotadas y controladas se pueden obtener los parámetros más adecuados.

También se dedica un apartado del TFM al análisis de los estudios de capacidad de las distintas características significativas más comunes de las piezas, dando a conocer distintos métodos de cálculo para los índices de calidad dependiendo del tipo de distribución que tome la variable en estudio.

Y por otra parte, existe el objetivo de determinar si existe relación entre las distintas variables medidas en los ensayos de la soldadura de tipo MAG, para ello se realiza un análisis multi-variable.

En ambos estudios es necesaria la utilización de un software estadístico específico para el tratamiento de datos y obtención de resultados (Statgraphics).

Todo ello realizando un análisis y reflexión sobre los resultados obtenidos, con un enfoque de mejora continua para poder corregir los procesos de manera cualitativa, e implantación de las acciones de mejora.

**Palabras Clave:** Calidad, Soldadura, Automoción, Mejora Continua, Herramientas Estadísticas.



## RESUM

Els diferents processos de soldadura són de gran importància en l'àmbit del sector de l'automoció, i a causa dels requeriments específics que han de complir-se és determinant que els processos estiguin baix control, per això el paper de la qualitat és fonamental en qualsevol empresa d'aquesta indústria.

El present projecte aborda principalment dues oportunitats de millora relacionades amb la qualitat en la soldadura:

D'una banda, la reducció de proves i assajos per a l'obtenció dels paràmetres més adequats en la soldadura de rosques.

El mètode d'ajust emprat habitualment en l'empresa en estudi és el de prova i error basat en l'experiència, amb la qual cosa la introducció d'una metodologia concreta, el Disseny d'Experiments (DOE), millora aquest aspecte substancialment, ja que amb un nombre limitat de proves fitades i controlades es poden obtenir els paràmetres més adequats.

També es dedica un apartat del TFM a l'anàlisi dels estudis de capacitat de les diferents característiques significatives més comunes de les peces, donant a conèixer diferents mètodes de càlcul per als índexs de qualitat depenent del tipus de distribució que prengui la variable en estudi.

I d'altra banda, existeix l'objectiu de determinar si existeix relació entre les diferents variables mesurades en els assajos de la soldadura de tipus MAG, per això es realitza una anàlisi multi-variable.

En tots dos estudis és necessària la utilització d'un programari estadístic específic per al tractament de dades i obtenció de resultats (Statgraphics).

Tot això realitzant una anàlisi i reflexió sobre els resultats obtinguts, amb un enfocament de millora contínua per poder corregir els processos de manera qualitativa, i implantació de les accions de millora.

**Paraules Clau:** Qualitat, Soldadura, Automoció, Millora Contínua, Eines Estadístiques.



## ABSTRACT

The different processes of welding are very important in the automotive sector, and due to the specific requirements which have to be fulfilled are determining that the processes are under control. Therefore, the quality role is very important to any company of this industry.

This project deals mainly with two opportunities of improvement related with the quality in the welding:

On the one hand, the reduction of tests and essays to get the most suitable parameters in nuts welding. The adjust method employed that is used in the company we are studying is the try and failure, which is based in the experience. Therefore, the introduction of a concrete methodology, the Design of Experiments (DOE), improves this aspect substantially, since we can obtain the most suitable parameters with a numeral limited of bounded and controlled tests.

Another chapter of the TFM is also devoted to the analysis of the capacity studies of the significant characteristics more common of the pieces, while announcing different methods of calculation for the quality indexes depending of the distribution type that take the variable in study.

And on the other hand, it exists the aim to determine if there is a relationship between the different measured variables in the essays of the MAG welding, for this reason a multi-variable analysis is performed.

In both studies it is necessary to use the specific statistical software to treat data and its results (Statgraphics).

All in we perform an analysis and reflection on the obtained results, with a continuous vision improvement so we can check the processes in a qualitative way, and we can set improvement actions.

**Key words:** quality, welding, automotive, continuous improvement, statistical tools.



# ÍNDICE DE DOCUMENTOS

---

## DOC. MEMORIA

- I. Lista de figuras
- II. Lista de tablas
- 1. Introducción
- 2. Descripción del entorno
- 3. DOE sobre los parámetros en la soldadura de tuercas
- 4. Estudios de capacidad sobre características significativas
- 5. Análisis multi-variable de la soldadura tipo MAG
- 6. Bibliografía

## DOC. PRESUPUESTO

- 1. Presupuesto parcial de mano de obra
- 2. Presupuesto parcial de amortización de equipos
- 3. Presupuesto parcial de recursos materiales
- 4. Presupuesto total



Trabajo Final de Máster en Ingeniería Industrial

# MEMORIA

---

**ANÁLISIS Y MEJORA CONTINUA DE LA CALIDAD DE PROCESOS  
DE SOLDADURA MEDIANTE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS EN UN  
PROVEEDOR DEL SECTOR DE LA AUTOMOCIÓN**

Iván Blay Solano



# ÍNDICE DE LA MEMORIA

---

I. LISTA DE FIGURAS.....	1
II. LISTA DE TABLAS.....	4
III. LISTA DE ECUACIONES.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. MOTIVACIÓN DEL TFM.....	6
1.2. OBJETIVOS DEL TFM.....	7
1.3. ESTRUCTURA DEL TFM.....	8
1.4. TÉCNICAS ESTADÍSTICAS PARA LA CALIDAD.....	9
1.4.1. Precedentes.....	9
1.4.2. Las 7 herramientas básicas para la calidad.....	10
1.4.3. Software estadístico.....	14
2. DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO.....	15
2.1. LA EMPRESA.....	15
2.2. EL PRODUCTO.....	17
2.3. EL DEPARTAMENTO DE CALIDAD.....	18
2.4. EL ÁREA DE ESTAMPACIÓN.....	19
2.4.1. Galgas y elementos de control.....	21
2.5. EL ÁREA DE SOLDADURA.....	22
2.5.1. Tipos de soldadura.....	23
2.5.2. Control de la calidad de la soldadura.....	25
2.6. REQUERIMIENTOS DE CALIDAD.....	30
3. DOE SOBRE LOS PARÁMETROS EN LA SOLDADURA DE TUERCAS.....	32
3.1. INTRODUCCIÓN.....	32
3.1.1. DOE (Design of Experiments).....	32
3.1.2. ANOVA.....	34
3.2. JUSTIFICACIÓN.....	36
3.3. CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO.....	37
3.4. DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	39
3.4.1. Matriz de diseño.....	39
3.4.2. Cálculo de efectos.....	40
3.5. ANÁLISIS DE LA VARIANZA.....	42

3.5.1. Contraste de hipótesis y criterio de decisión.....	42
3.5.2. Obtención de la tabla del ANOVA.....	43
3.5.3. Análisis de resultados del ANOVA.....	45
3.5.4. Intervalos LSD.....	48
3.5.5. Interacciones significativas.....	50
3.5.6. Condiciones operativas óptimas.....	52
3.5.7. Media prevista para la resistencia a tracción.....	52
3.5.8. Intervalo de confianza para la media prevista.....	53
3.5.9. Análisis de los residuos.....	54
3.6. CONCLUSIONES.....	55
4. ESTUDIOS DE CAPACIDAD SOBRE CARACTERÍSTICAS SIGNIFICATIVAS.....	56
4.1. INTRODUCCIÓN.....	56
4.1.1. PPAP (Production Part Approval Process).....	56
4.1.2. Estudio inicial del proceso.....	58
4.2. ÍNDICES DE CALIDAD.....	58
4.2.1. Criterio de aceptación.....	60
4.3. ANÁLISIS DE LOS INFORMES DE CAPACIDAD.....	60
4.3.1. Diagnóstico del modelo de distribución.....	63
4.3.2. Método de los percentiles.....	64
4.3.3. Característica 1: Par.....	65
4.3.4. Característica 2: Tracción.....	69
4.3.5. Característica 3: Superficie mating.....	72
4.4. CONCLUSIONES.....	75
5. ANÁLISIS MULTI-VARIABLE DE LA SOLDADURA TIPO MAG.....	76
5.1. INTRODUCCIÓN.....	76
5.2. JUSTIFICACIÓN.....	76
5.3. RECOPIACIÓN DE DATOS.....	78
5.4. CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES.....	82
5.5. ANÁLISIS CON SOFTWARE.....	94
5.5.1. Matriz de correlaciones.....	94
5.5.2. Modelos de predicción.....	96
5.6. Conclusiones.....	106
6. BIBLIOGRAFÍA.....	107

## I. LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Plantilla de diagrama de causa-efecto. Fotografía obtenida de la web innovando.net .....	10
Figura 2: Ejemplo de plantilla de inspección. Fotografía obtenida de la web ingenieraiindustrialonline.com .....	11
Figura 3: Ejemplo de gráfico de control. Fotografía obtenida de la web spcgroup.com .....	11
Figura 4: Ejemplo de gráfico de histograma. Fotografía obtenida de la web optyestadistica.com .....	12
Figura 5: Ejemplo de diagrama de Pareto. Fotografía obtenida de la web minitab.com .....	12
Figura 6: Ejemplo de diagramas de dispersión. Fotografía obtenida de la web spcgroup.com .	13
Figura 7: Ejemplo de diagramas de dispersión. Fotografía obtenida de la web mxcalidad.com	13
Figura 8: Emplazamiento dentro del polígono. Fotografía extraída de la Web del polígono Juan Carlos I y editada por el autor del trabajo. ....	15
Figura 9: Planta Kemmerich Ibérica en Almussafes. Fotografía elaborada por la empresa. ....	16
Figura 10: Interior de una matriz progresiva con su correspondiente tira de material después de ser sometida a las operaciones de cada estación. Fotografía obtenida de upacat.com .....	20
Figura 11: Área de estampación. Fotografía elaborada por la empresa.....	21
Figura 12: Área de soldadura. Fotografía elaborada por el autor del TFM.....	22
Figura 13: Detalle del proceso de soldadura por puntos. Fotografía obtenida de la web GasolSRL.com .....	23
Figura 14: Detalle del proceso de soldadura por protuberancias. Fotografía obtenida de la web GasolSRL.com .....	24
Figura 15: Detalle del proceso de soldadura MAG. Fotografía obtenida de la web Wikipedia.org .....	24
Figura 16: Ejemplo de especificación de cliente. Requerimiento de penetración en soldadura MAG. Fotografía obtenida de la “Engineering Specification of Ford” ESBM5A-1B310-AA. ....	25
Figura 17: Ejemplo de máquina de ensayos universal de tracción-compresión. Fotografía obtenida de la web Testersupply.es .....	27
Figura 18: Ejemplo de ensayo de tracción en la máquina de ensayos universal. Fotografía elaborada por el autor del TFM. ....	27
Figura 19: Equipo de ensayos de metalografía Welding Expert. Fotografía obtenida de la web Struers-welding-expert.com .....	28
Figura 20: Ejemplo de informe de metalografía. Fotografía elaborada por el autor del TFM....	29
Figura 21: Tolerancias de porosidad según la norma Ford ESBM5A-1B310-AA. ....	31
Figura 22: Barra de herramientas disponibles. ....	34
Figura 23: Barra de herramientas disponibles. Ruta de acceso a la realización del ANOVA multifactorial.....	35
Figura 24: Tablas y Gráficos disponibles en este módulo. ....	35
Figura 25: 3D de la pieza seleccionada para el estudio. Imagen elaborada por el autor del TFM. ....	37
Figura 26: Gráfica de probabilidad normal. ....	46
Figura 27: Gráfico de Daniel para los efectos principales .....	47

Figura 28: Gráfico de Daniel para las interacciones.....	47
Figura 29: Valores medios y límites con StatGraphics. ....	49
Figura 30: Intervalos LSD para el factor intensidad con StatGraphics. ....	49
Figura 31: Intervalos LSD para el factor tiempo de soldeo con StatGraphics.....	50
Figura 32: Intervalos LSD para el factor presión con StatGraphics.....	50
Figura 33: Interacción AB manualmente.....	51
Figura 34: Interacción AB StatGraphics.....	51
Figura 35: Residuos del factor intensidad.....	54
Figura 36: Residuos del factor tiempo de soldeo.....	54
Figura 37: Residuos del factor presión.....	55
Figura 38: Ejemplo de plantilla de PSW .....	57
Figura 39: Información básica de la pieza seleccionada para el estudio .....	61
Figura 40: Listado de procesos para la fabricación de la pieza en estudio .....	61
Figura 41: Ejemplo de informe obtenido tras realizar el estudio de capacidad de una característica significativa con QS-STAT.....	62
Figura 42: Encabezado del informe sobre el estudio de capacidad del PAR .....	66
Figura 43: Gráfico representativo de la evolución de la media y la dispersión del PAR para la muestra seleccionada.....	67
Figura 44: Histograma de frecuencia para la muestra de la característica PAR estudiada.....	67
Figura 45: Gráfico de probabilidad normal para la característica PAR .....	68
Figura 46: Resumen de los estadísticos e índices de calidad para la característica PAR .....	69
Figura 47: Encabezado del informe sobre el estudio de capacidad del TRACCIÓN .....	69
Figura 48: Gráfico representativo de la evolución de la media y la dispersión del TRACCIÓN para la muestra seleccionada.....	70
Figura 49: Histograma de frecuencia para la muestra de la característica TRACCIÓN estudiada .....	70
Figura 50: Gráfico de probabilidad normal para la característica TRACCIÓN .....	71
Figura 51: Resumen de los estadísticos e índices de calidad para la característica TRACCIÓN..	71
Figura 52: Especificación de la superficie mating de la pieza a analizar (zona sombreada de rojo).....	72
Figura 53: Encabezado del informe sobre el estudio de capacidad de la SUPERFICIE MATING .	72
Figura 54: Gráfico representativo de la evolución de la media y la dispersión de la SUPERFICIE MATING para la muestra seleccionada.....	73
Figura 55: Histograma de frecuencia para la muestra de la característica SUPERFICIE MATING estudiada.....	73
Figura 56: Gráfico de probabilidad normal para la característica SUPERFICIE MATING.....	74
Figura 57: Resumen de los estadísticos e índices de calidad para la característica SUPERFICIE MATING .....	74
Figura 58: Gráfica representativa del scrap por soldadura NOK.....	77
Figura 59: 3D de la pieza seleccionada para el estudio. Imagen elaborada por el autor del TFM. ....	78
Figura 60: Fotografía de la pieza situada en el útil de soldadura. Imagen elaborada por el autor del TFM.....	78
Figura 61: Corte transversal por el eje de simetría de la pieza. Imagen extraída del plano.....	79

Figura 62: Fotografía de las 3 cavidades de la mesa A del útil de soldadura. Imagen elaborada por el autor del TFM.....	79
Figura 63: Ejemplo de imagen con Welding Expert del corte de cordón con los medibles trazados. Fotografía elaborada por el autor del TFM .....	82
Figura 64: Ejemplo de informe de metalografía. Fotografía elaborada por el autor del TFM....	82
Figura 65: Diagrama de sectores para la variable operario. ....	83
Figura 66: Diagrama de sectores para la variable cavidad (cavidad A1=1; cavidad A2=2; cavidad A3=3; cavidad B1=4; cavidad B2=5; cavidad B3=6).....	84
Figura 67: Gráfica representativa del Nº de ensayos NOK x cavidad.....	84
Figura 68: Histograma para la variable espesor 1.....	85
Figura 69: Histograma para la variable espesor 2.....	86
Figura 70: Ejemplo de medición de la altura de un cordón de soldadura. Fotografías extraídas de la especificación general de Ford sobre soldadura MAG ESBM5A-1B310-AA.....	86
Figura 71: Histograma para la variable altura 1.....	87
Figura 72: Histograma para la variable altura 2.....	88
Figura 73: Ejemplo de medición de la penetración de un cordón de soldadura. Fotografía extraída de la especificación general de Ford sobre soldadura MAG ESBM5A-1B310-AA.....	88
Figura 74: Histograma para la variable penetración en la chapa 1.....	89
Figura 75: Histograma para la variable penetración en la chapa 2.....	89
Figura 76: Histograma para la variable penetración en la varilla 1.....	90
Figura 77: Histograma para la variable penetración en la varilla 2.....	91
Figura 78: Gráfica representativa del porcentaje de ensayos NOK por variable.....	91
Figura 79: Ejemplo de medición del gap. Fotografía extraída de la especificación general de Ford sobre soldadura MAG ESBM5A-1B310-AA.....	92
Figura 80: Histograma para la variable gap.....	93
Figura 81: Diagrama de sectores para la variable resultado.....	93
Figura 82: Gráfica del modelo ajustado de grado 2 entre las variables altura1 y pvarilla2.....	98
Figura 83: Gráfica del modelo ajustado de grado 2 entre las variables altura1 y gap.....	99
Figura 84: Gráfica del modelo ajustado de grado 2 entre las variables altura2 y pchapa2.....	100
Figura 85: Gráfica del modelo ajustado de grado 1 entre las variables pchapa1 y pchapa2....	102
Figura 86: Gráfica del modelo ajustado de grado 1 entre las variables pchapa1 y pvarilla1 ...	103
Figura 87: Gráfica del modelo ajustado de grado 1 entre las variables pchapa1 y gap .....	104
Figura 88: Gráfica del modelo ajustado de grado 1 entre las variables pvarilla1 y pvarilla2 ...	106

## II. LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros de ensayo para la comprobación de uniones soldadas según la norma de Volkswagen VW_6560.....	31
Tabla 2: Orden de Yates.....	40
Tabla 3: Matriz de diseño del experimento.....	40
Tabla 4: Cálculo de efectos.....	40
Tabla 5: Cálculo de efectos con Statgraphics.....	41
Tabla 6: Gráfico de Pareto sobre efectos.....	41
Tabla 7: Gráfico estandarizado de Pareto sobre efectos.....	42
Tabla 8: Tabla del ANOVA manual.....	45
Tabla 9: Tabla del ANOVA StatGraphics.....	45
Tabla 10: Valores medios y límites manualmente.....	48
Tabla 11: Valores medios para la interacción AB.....	51
Tabla 12: Cálculo de la media prevista.....	52
Tabla 13. Condiciones operativas óptimas y valor medio esperado.....	53
Tabla 14: Valores empleados en el cálculo del IC.....	53
Tabla 15: Valores extremos del IC.....	53
Tabla 16: Scrap por soldadura NOK.....	78
Tabla 17: Extracto del histórico de datos de los informes de metalografía.....	81
Tabla 18: Nº de ensayos NOK x cavidad.....	84
Tabla 19: Resumen estadístico para la variable espesor 1.....	85
Tabla 20: Resumen estadístico para la variable espesor 2.....	85
Tabla 21: Resumen estadístico para la variable altura 1.....	87
Tabla 22: Resumen estadístico para la variable altura 2.....	87
Tabla 23: Resumen estadístico para la variable penetración en la chapa 1.....	88
Tabla 24: Resumen estadístico para la variable penetración en la chapa 2.....	89
Tabla 25: Resumen estadístico para la variable penetración en la varilla 1.....	90
Tabla 26: Resumen estadístico para la variable penetración en la varilla 2.....	90
Tabla 27: Porcentaje de ensayos NOK por variable.....	91
Tabla 28: Resumen estadístico para la variable gap.....	92
Tabla 29: Matriz de correlación entre todas las variables consideradas en el estudio.....	95
Tabla 30: Resumen de las correlaciones significativas.....	96
Tabla 31: Coeficientes del modelo de predicción de grado 2 entre las variables altura1 y pvarilla2.....	98
Tabla 32: Coeficientes del modelo de predicción de grado 2 entre las variables altura1 y gap.....	99
Tabla 33: Coeficientes del modelo de predicción de grado 2 entre las variables altura y pchapa2.....	100
Tabla 34: Coeficientes del modelo de predicción de grado 2 entre las variables pchapa1 y pchapa2.....	101
Tabla 35: Coeficientes del modelo de predicción de grado 1 entre las variables pchapa1 y pchapa2.....	101

Tabla 36: Coeficientes del modelo de predicción de grado 2 entre las variables pchapa1 y pvarilla1 .....	102
Tabla 37: Coeficientes del modelo de predicción de grado 1 entre las variables pchapa1 y pvarilla1 .....	102
Tabla 38: Coeficientes del modelo de predicción de grado 2 entre las variables pchapa1 y gap .....	103
Tabla 39: Coeficientes del modelo de predicción de grado 1 entre las variables pchapa1 y gap .....	104
Tabla 40: Coeficientes del modelo de predicción de grado 2 entre las variables pvarilla1 y pvarilla2 .....	105
Tabla 41: Coeficientes del modelo de predicción de grado 1 entre las variables pvarilla1 y pvarilla2 .....	105

### III. LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Fórmula para la obtención de los efectos simples e interacciones dobles .....	44
Ecuación 2: Fórmula para la obtención de los intervalos LSD .....	48
Ecuación 3: Fórmula para el cálculo de los intervalos de confianza .....	53
Ecuación 4: Fórmulas para el cálculo de los índices de calidad para una distribución normal ..	59
Ecuación 5: Fórmula para la obtención del valor chi-square .....	63
Ecuación 6: Fórmula para el cálculo de los grados de libertad .....	63
Ecuación 7: Fórmulas para el cálculo de los índices de calidad para una distribución NO normal mediante el método de los percentiles .....	65
Ecuación 8: Fórmula para la obtención del índice de correlación entre dos variables .....	94
Ecuación 9: Modelo genérico de un modelo de predicción entre dos variables aleatorias .....	96
Ecuación 10: Modelo de predicción entre las variables altura1 y pvarilla2.....	98
Ecuación 11: Modelo de predicción entre las variables altura1 y gap.....	99
Ecuación 12: Modelo de predicción entre las variables altura2 y pchapa2.....	100
Ecuación 13: Modelo de predicción entre las variables pchapa1 y pchapa2 .....	101
Ecuación 14: Modelo de predicción entre las variables pchapa1 y pvarilla1 .....	103
Ecuación 15: Modelo de predicción entre las variables pchapa1 y gap .....	104
Ecuación 16 Modelo de predicción entre las variables pvarilla1 y pvarilla2 .....	105
Ecuación 17: Modelo de predicción entre las variables pchapa1 y pchapa2 .....	106



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. MOTIVACIÓN DEL TFM.

La motivación para llevar a cabo el presente TFM surge durante el periodo de prácticas del autor en la empresa Kemmerich Ibérica, proveedora de piezas metálicas para los principales constructores del sector de la automoción.

A lo largo de dicho periodo se observa que el método de ajuste de parámetros empleado habitualmente en los procesos de soldadura desarrollados en la empresa es el de prueba y error basado en la experiencia.

Con lo cual aparecen una serie de aspectos a mejorar relacionados con el ámbito de la ingeniería de la calidad, los cuáles despiertan el interés del autor por desarrollarlos, y de esta forma mejorar los procesos.

En concreto se detectan 3 oportunidades de mejora: la primera de ellas basada en el diseño de experimentos, la segunda en los estudios de capacidad y la última en el análisis multi-variable, todas ellas aplicadas a procesos industriales.

Dichas oportunidades están enfocadas principalmente a conseguir dos beneficios:

- Reducción del nº de piezas ensayadas, lo que significa reducir la cantidad de chatarra, lo cual conlleva un ahorro económico a la empresa.
- Reducción de los tiempos de homologación para las piezas nuevas, lo cual aporta flexibilidad a la hora de cumplir las fechas acordadas con el cliente.

Por una parte, si la cantidad de piezas ensayadas es considerablemente menor, esto provoca un ahorro de dinero ya que se reduce el scrap, es decir, la cantidad de piezas achatarradas, además del tiempo de mano de obra del inspector de calidad realizando los pertinentes ensayos.

Y por otro lado, si se realiza un menor número de pruebas de ajuste se requiere un menor tiempo para la homologación de la soldadura, lo cual es un beneficio muy importante ya que el tiempo entre que se adjudica una pieza nueva y la fecha límite de homologación a cliente es bastante reducida.

A nivel personal la motivación que tiene el presente proyecto para el autor es la posibilidad de poder realizar el TFM sobre un problema real y que necesita ser resuelto para evitar pérdidas de tiempo y económicas.

Además se realiza en una empresa de un sector que siempre ha sido del agrado del autor y que le permite insertarse en el mundo laboral y comenzar a formarse como profesional.

## 1.2. OBJETIVOS DEL TFM.

El objetivo general del presente trabajo fin de máster es el análisis y mejora continua de la calidad de los procesos de soldadura de una empresa del sector de la automoción mediante técnicas y herramientas estadísticas.

Para ello se van a desarrollar tres líneas de acción a lo largo del TFM, una por capítulo, a través de las cuales se va a conseguir satisfacer los dos objetivos específicos: la reducción del nº de piezas ensayadas y la reducción de los tiempos de homologación para las piezas nuevas.

Las 3 líneas de acción desarrolladas como objeto principal del TFM son:

### **DOE sobre los parámetros en la soldadura de tuercas.**

El diseño de experimentos que se pretende realizar en esta sección del TFM está basado en un proceso de soldadura de tuercas por resistencia. Donde el objetivo es reducir el número de pruebas y ensayos con el fin de encontrar los parámetros de serie.

La justificación de realizar este DOE viene dada por la necesidad de conocer los parámetros correctos en la soldadura de tuercas para aquellas piezas de nuevos proyectos.

### **Estudios de capacidad sobre características significativas.**

En este apartado se analizan los informes sobre los estudios de capacidad de las características significativas de las piezas para conocer su patrón de variabilidad y de esta forma comprender mejor los procesos involucrados.

Además, en el sector de la automoción es un requisito general la realización de estudios de capacidad sobre aquellas características más relevantes del producto a fabricar. Dicho requisito viene englobado dentro de lo que se conoce como PPAP.

### **Análisis multi-variable de la soldadura tipo MAG.**

Se pretende realizar un análisis multi-variable centrado en los ensayos de la soldadura tipo MAG, donde se pretende cuantificar qué nivel de correlación existe entre las diversas variables medidas en los ensayos.

Dicho estudio viene motivado debido a la gran cantidad de variables que se pueden medir en un cordón de soldadura, lo cual provoca que se presente la oportunidad de analizar cómo están relacionadas entre ellas. Hecho que puede suponer una ayuda a la hora de mejorar el proceso de soldadura MAG.

### 1.3. ESTRUCTURA DEL TFM.

El TFM consta de 5 partes principales:

La primera consiste en la descripción del entorno (Capítulo 2) donde se va a desarrollar el proyecto, donde se va a describir toda aquella información necesaria para poder entender posteriormente el resto de capítulos.

Con lo cual se realiza una breve descripción de los procesos involucrados (estampación y distintas clases de soldadura) y los ensayos e inspecciones de calidad que se llevan a cabo con el objetivo de asegurar la calidad del producto

Una vez situados en contexto se pasan a analizar las 3 oportunidades de mejora detectadas:

Capítulo 3: DOE sobre los parámetros en la soldadura de tuercas.

En él se explica paso a paso la elaboración del diseño de experimentos y cómo realizar el análisis de la varianza asociado.

Capítulo 4: Estudios de capacidad sobre características significativas.

Se dedica a detallar como obtener los índices de calidad de un estudio inicial de proceso como parte del PPAP.

Capítulo 5: Análisis multi-variable de la soldadura tipo MAG.

Engloba una descripción de los estadísticos de aquellas variables involucradas y se determinan los modelos de predicción para aquellas relaciones significativas.

Y por último, el capítulo 6 engloba el presupuesto, donde se realiza una estimación de cuál es el coste de llevar a cabo el presente TFM, incluyendo: mano de obra, amortización de equipos y recursos materiales.

## 1.4. TÉCNICAS ESTADÍSTICAS PARA LA CALIDAD.

### 1.4.1. Precedentes.

El control de calidad tuvo su origen en la producción industrial masiva de principios del siglo XX, con el desarrollo de los métodos de producción en cadena se plantearon los primeros problemas alrededor de la calidad, en cuanto que ésta estaba ligada a la conformidad con las especificaciones de los productos y sus componentes: a una más alta conformidad (calidad), correspondería un número menor de desechos y reprocesos, con lo que el coste del proceso productivo, y del producto, se reduciría.

Surgen entonces los primeros procedimientos de control de calidad. La función de calidad, bajo esta óptica clásica, se limita a la realización de una serie de observaciones que tienen como objetivo la verificación de la concordancia de los diferentes dispositivos y componentes a su especificación, previamente establecida. Los resultados de las observaciones permitirían separar el producto aceptable del no aceptable mediante la inspección final del producto ya terminado.

Desde el punto de vista del control de calidad, también se segregó la producción de la inspección. Se crearon entonces departamentos de inspección, llamados de “Aseguramiento de la Calidad”, con la finalidad de separar los productos buenos de los defectuosos de forma que éstos no llegaran al cliente.

Si bien el aumento de la productividad fue evidente, se fomentó la idea de que la calidad era materia de los departamentos especializados en la inspección de la calidad. El concepto subyacente de gestión de la calidad era que cada departamento funcional entregaba su producto al siguiente y, finalmente, el departamento de calidad separaba la producción correcta de la incorrecta.

En el desarrollo de los métodos de control de calidad se produjo un salto cualitativo con los estudios de Walter A. Shewhart, quien a partir de la década de 1920 inició el perfeccionamiento del control de la calidad introduciendo el muestreo estadístico de los procesos. Definió el control de calidad en términos de variación provocada por causas asignables y causas aleatorias e introdujo los gráficos de control de proceso como una herramienta para distinguir entre los dos tipos de variaciones.

El control de calidad se desplaza entonces de la mera inspección final del producto, al control estadístico del proceso con el fin de determinar cuándo un proceso está sometido a variaciones en su comportamiento, tales que su resultado derivará en producto defectuoso, es decir, fuera de los límites de las especificaciones establecidas en el diseño.

En la década de 1950, Joseph M. Juran hizo hincapié en no limitar la calidad a los ingenieros y a los especialistas en calidad sino extenderla a toda la empresa, dando paso a lo que se denominó “control total de calidad”. Trasladando de esta forma el control de calidad del final de la línea al propio proceso, donde serían los propios empleados de la línea operativa los encargados de realizar los controles.

Esto implica una importante reducción de los costes de no calidad, ya que se detectan con mayor antelación los problemas que han surgido en el proceso, y por lo tanto se pueden solucionar antes, evitando así producir productos no válidos, es decir, sin la calidad requerida.

No obstante las técnicas estadísticas del control de calidad poseían una cierta complejidad que impedía su uso por parte del personal no especializado en ellas. Era entonces necesario disponer de herramientas que no requirieran de un conocimiento experto en técnicas estadísticas y que, por tanto, pudieran ser aplicadas en los círculos de calidad.

En 1968 Ishikawa propone un conjunto de técnicas estadísticas sencillas para ser aplicadas por los círculos de calidad. Según Ishikawa, con las siete herramientas básicas es posible resolver el 95% de los problemas que presenta una organización.

Estas herramientas pueden ser descritas genéricamente como métodos para la mejora continua y la solución de problemas, son las siguientes:

### 1.4.2. Las 7 herramientas básicas para la calidad.

**Diagrama causa – efecto.** Ayuda a identificar, clasificar y poner de manifiesto posibles causas, tanto de problemas específicos como de efectos deseados.

La variabilidad de una característica de calidad es un efecto o consecuencia de múltiples causas, por ello, al observar alguna inconformidad en alguna característica de calidad de un producto o servicio, es sumamente importante detallar las posibles causas de la inconsistencia.

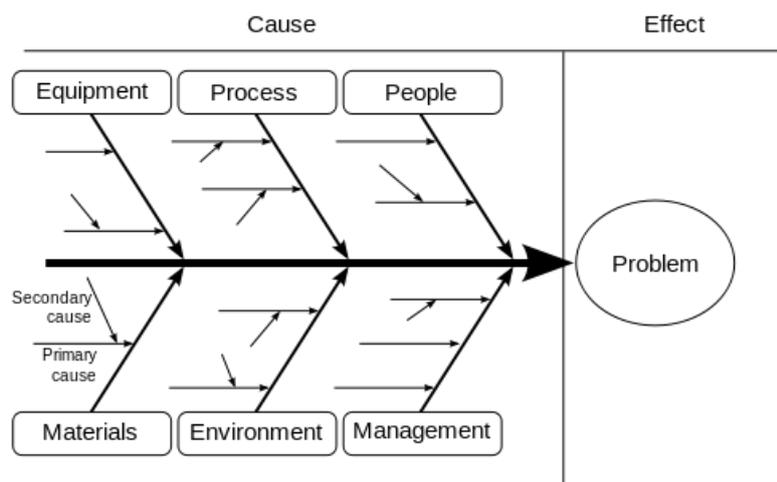


Figura 1: Plantilla de diagrama de causa-efecto. Fotografía obtenida de la web [innovando.net](http://innovando.net)

**Hoja de inspección.** Registro de datos relativos a la ocurrencia de determinados sucesos.

Las plantillas de inspección son una herramienta de registro y comprobación de información. La principal ventaja de éstas es que dependiendo de su diseño sirven tanto para registrar resultados, como para observar tendencias y dispersiones, lo cual hace que no sea necesario concluir con la recolección de los datos para disponer de información de tipo estadístico.

**PLANILLA DE INSPECCIÓN**

Producto: Ensamble A N°: \_\_\_\_\_

Característica de Calidad: Peso total del ensamble

Magnitud: Peso - Kilogramos

Fecha: 19-ago-12

Proceso: ENS - 01 - M2

N° de lote: 3758 - T2

Inspector: Ing. Salazar

Escaleta	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
Frecuencia																
30																
25																
20																
15																
10																
5																
0																
Frecuencia	0	1	1	5	5	13	20	21	17	18	10	10	5	2	1	0

Figura 2: Ejemplo de plantilla de inspección. Fotografía obtenida de la web [ingenieriaindustrialonline.com](http://ingenieriaindustrialonline.com)

**Gráfico de control.** Herramienta estadística utilizada para controlar y mejorar un proceso mediante el análisis de su variación a través del tiempo.

Los gráficos de control son diagramas preparados donde se van registrando valores sucesivos de la característica de calidad que se está estudiando. Estos datos se registran durante el proceso de elaboración o prestación del producto o servicio. Cada gráfico de control se compone de una línea central que representa el promedio histórico, y dos límites de control (superior e inferior).

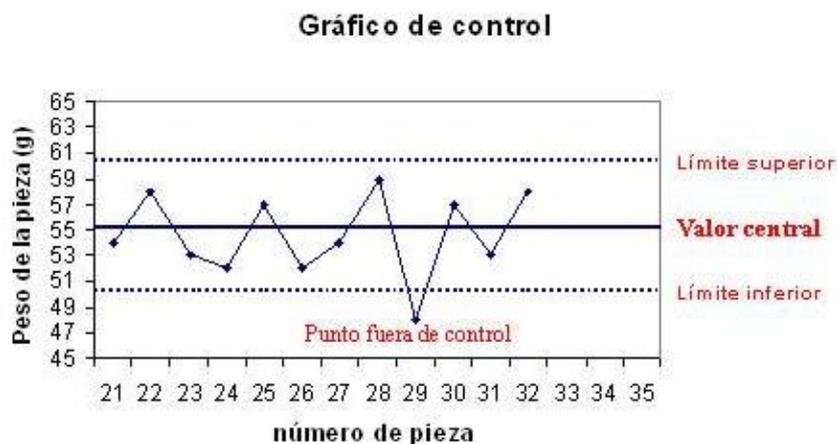


Figura 3: Ejemplo de gráfico de control. Fotografía obtenida de la web [spcgroup.com](http://spcgroup.com)

**Histograma.** Gráfico de barras verticales que representa la distribución de frecuencias de un conjunto de datos.

Un histograma o diagrama de barras es un gráfico que muestra la frecuencia de cada uno de los resultados cuando se efectúan mediciones sucesivas. Éste gráfico permite observar alrededor de qué valor se agrupan las mediciones y cuál es la dispersión alrededor de éste valor. La utilidad en función del control de calidad que presta ésta representación radica en la posibilidad de visualizar rápidamente información aparentemente oculta en un tabulado inicial de datos.

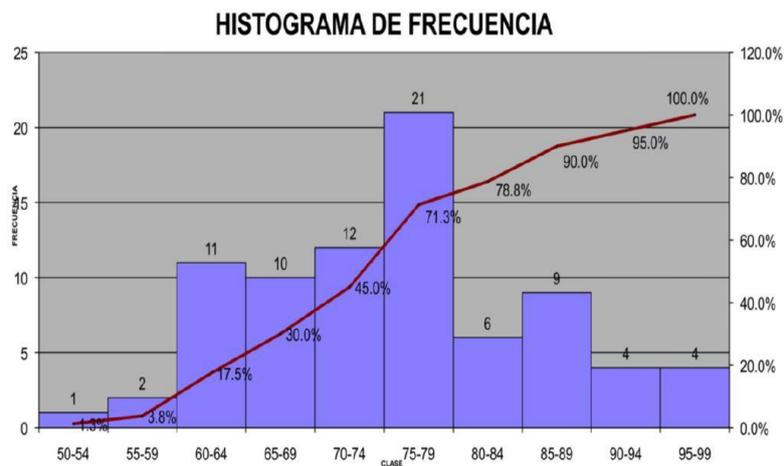


Figura 4: Ejemplo de gráfico de histograma. Fotografía obtenida de la web [optyestadistica.com](http://optyestadistica.com)

**Diagrama de Pareto.** Método de análisis que permite discriminar entre las causas más importantes de un problema (los pocos y vitales) y las que lo son menos (los muchos y triviales).

El objetivo de un diagrama de Pareto es el de evidenciar prioridades, puesto que en la práctica suele ser difícil controlar todas las posibles inconformidades de calidad de un producto o servicios.

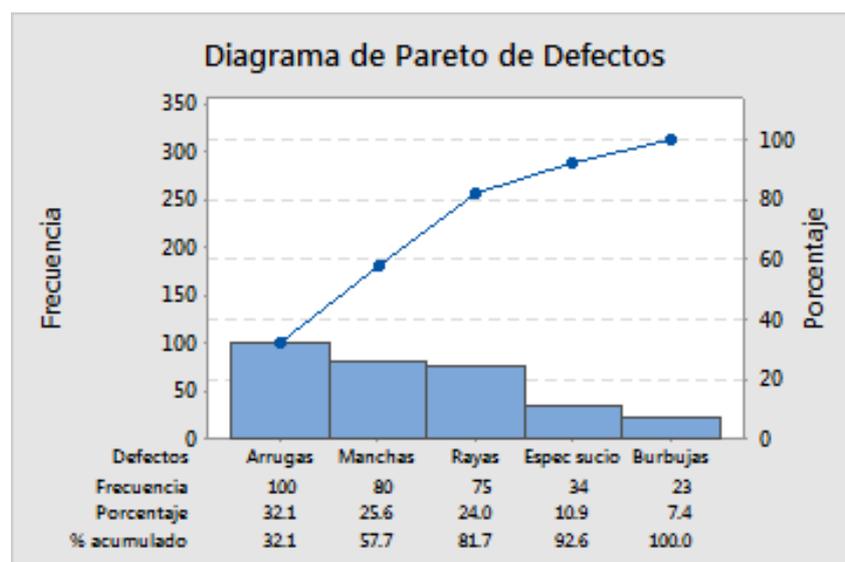


Figura 5: Ejemplo de diagrama de Pareto. Fotografía obtenida de la web [minitab.com](http://minitab.com)

**Diagrama de Dispersión.** Herramienta que ayuda a identificar la posible relación entre dos variables.

También conocidos como gráficos de correlación, estos diagramas permiten básicamente estudiar la intensidad de la relación entre 2 variables. Dadas dos variables X e Y, se dice que existe una correlación entre ambas si éstas son directa o inversamente proporcionales (correlación positiva o negativa).

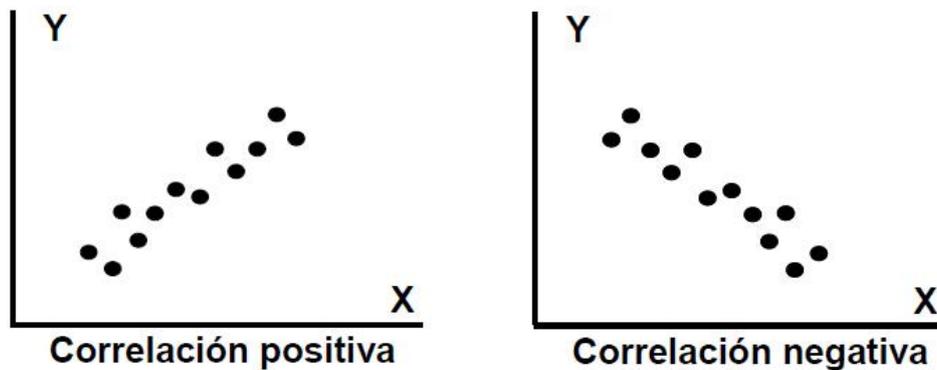


Figura 6: Ejemplo de diagramas de dispersión. Fotografía obtenida de la web [spcgroup.com](http://spcgroup.com)

**Estratificación.** Procedimiento consistente en la clasificación de datos en subgrupos homogéneos por alguna característica común, que permite extraer conclusiones sobre el efecto que se produce de acuerdo a dicha característica.

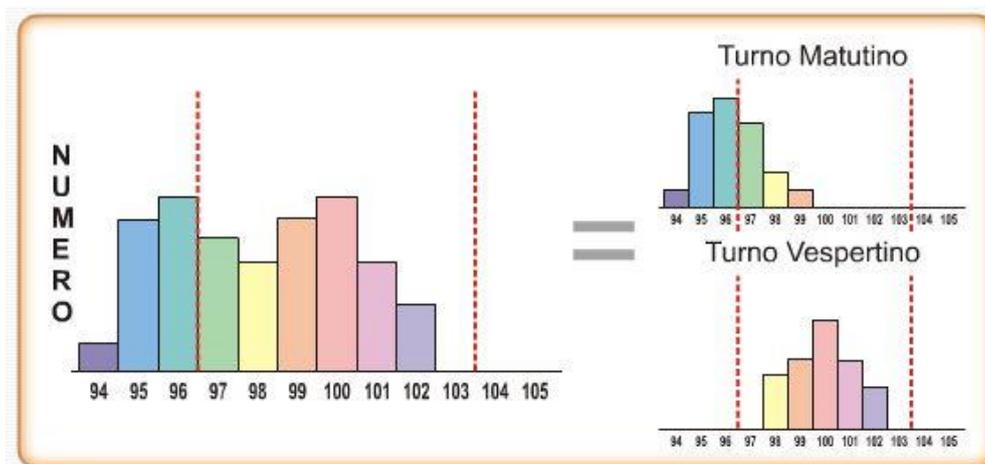


Figura 7: Ejemplo de diagramas de dispersión. Fotografía obtenida de la web [mxcalidad.com](http://mxcalidad.com)

La aplicación de técnicas estadísticas al control de calidad está basada en el estudio y evaluación de la variabilidad existente en cualquier tipo de proceso que es principalmente el objeto de la estadística.

El control intrínseco del proceso se basa no solo en detectar fallos en curso de fabricación sino también aprender cuáles son las causas que provocan la variabilidad, aportando datos para mejorar el proceso.

Por lo tanto, los pasos generales a seguir en el control estadístico de la calidad son:

1. Detectar rápidamente la ocurrencia de variabilidad debida a causas asignables.
2. Investigar las causas que la han producido.
3. Informar de ella para la toma de decisión oportuna, pues de lo contrario se producen gran cantidad de unidades de calidad no aceptable, originando una disminución de la capacidad productiva e incremento de costos del producto terminado.
4. Eliminar, si es posible, o al menos reducir al máximo la variabilidad del proceso.

### 1.4.3. Software estadístico.

Para las distintas tareas relacionadas con el análisis estadístico que se realiza a lo largo de este Trabajo Fin de Máster se van a emplear principalmente dos aplicaciones informáticas.

Por una parte, el programa Statgraphics, que es un software extendido tanto por las Universidades como por las empresas, que está diseñado para facilitar el análisis estadístico de datos. Mediante su aplicación es posible realizar un análisis descriptivo de una o varias variables, utilizando gráficos que expliquen su distribución o calculando sus medidas características.

Entre sus muchas prestaciones, también figuran el cálculo de intervalos de confianza, contrastes de hipótesis, análisis de regresión, análisis multivariantes, así como diversas técnicas aplicadas en control de calidad.

Y por otra parte, el programa QS-STAT, de carácter exclusivo de la empresa en estudio. Su función principal es la realización de informes sobre estudios de capacidad de aquellas características significativas de los procesos





La nave de estampación cuenta con 5 prensas, donde se fabrican las piezas. En esta nave se encuentran también los departamentos de Compras, RRHH, Calidad, Producción y Nuevos Proyectos.

La nave de montaje cuenta con 3 robots de soldadura MAG, un robot de soldadura por puntos y 5 robots de soldadura estática. En esta nave se encuentran también las áreas de matricería, mantenimiento y el laboratorio de ensayos.

En las naves de almacén se encuentran además los departamentos de Logística e Informática.

Tanto la nave de estampación como la de montaje cuentan con puentes grúa para poder desplazar con facilidad los elementos de elevado peso como las bobinas o las matrices que se introducen en las prensas.



*Figura 9: Planta Kemmerich Ibérica en Almussafes. Fotografía elaborada por la empresa.*

Kemmerich Ibérica cuenta con una amplia lista de clientes, entre los que destacan:

- FORD
- VW
- SEAT
- GENERAL MOTORS (OPEL)
- DAIMLER (MERCEDES)
- BMW
- BROSE

## 2.2. EL PRODUCTO.

Asumiendo como producto la pieza acabada lista para enviar al cliente, se puede hacer distinción entre 3 tipos de productos:

1. Piezas obtenidas tan solo mediante estampación.
2. Piezas sometidas a un proceso de montaje después de la estampación. Por ejemplo, la unión de 2 piezas diferentes mediante soldadura, la soldadura de un incorporable a la pieza, el montaje de gomas o el montaje de clips a la pieza estampada.
3. Piezas de uno de los dos tipos anteriores a las cuales se les aplica recubrimiento, como puede ser una capa de pintura o de galvanizado. Este tipo de proceso de recubrimiento se subcontrata a un proveedor, es decir, se lleva a cabo en una empresa externa.

Las piezas producidas se montan en su mayoría en el chasis del automóvil, una parte fundamental y delicada, por tanto las tolerancias dimensionales son muy pequeñas, del orden de décimas de milímetros.

Dada la precisión requerida en las piezas, el departamento de Calidad es de gran importancia en la empresa.

### 2.3. EL DEPARTAMENTO DE CALIDAD.

Durante el desarrollo de este proyecto, su autor estuvo realizando prácticas de empresa en el departamento de calidad, como Ingeniero de Calidad.

Este departamento es el encargado de realizar un seguimiento continuo sobre la calidad de la producción, y en el caso de detectar alguna anomalía en las piezas producidas es el responsable de tomar las decisiones pertinentes para que no lleguen piezas defectuosas a los clientes.

También tiene un papel fundamental en el lanzamiento de los nuevos proyectos, pues es el departamento encargado de preparar y reunir toda la documentación e informes necesarios para la homologación de nuevas piezas. Entre las tareas más representativas propias de la ingeniería de calidad se incluirían:

- Asegurar la mejora continua en la gestión de la documentación de forma que se cumplan tanto los requerimientos generales, recogidos en la ISO/TS 16949:2017, como los específicos de cada cliente, recogidos en las normas internas de cada uno de ellos.
- Elaboración de planes de control e instrucciones de control mediante el sistema informático CAQ (Computer Aided Quality), el cual ayudará a la realización de los controles por parte de los operarios de manera más rápida, autónoma y segura.
- Diseño de las pruebas de ensayo (par y tracción habitualmente) y de los útiles de ensayo específicos necesarios para la homologación de las nuevas piezas.
- Estudios de capacidad estadística de las características significativas de las nuevas piezas,
- Análisis de los modos de fallo del proceso así como de las medidas de prevención y de corrección implementadas, lo cual consiste principalmente en la validación de los sistemas poka-yoke de las distintas máquinas.
- Estudios de repetibilidad y reproducibilidad de los distintos medios de control empleados para el aseguramiento de la calidad, lo cual implica principalmente a las galgas y los calibres.
- Validación de los embalajes utilizados para el almacenamiento de las piezas, tanto de carácter interno (embalajes utilizados entre procesos) como de cliente (embalaje final). Para ello se diseñan pruebas de embalaje de tipo estático y dinámico.

El departamento de calidad lo componen el director del departamento, los ingenieros de calidad, el encargado del área de estampación, el encargado del área de montaje, el responsable de medioambiente y los metrólogos. Además se cuenta con una máquina CMM (máquina de medición por coordenadas, o también denominada máquina de medición 3D).

El departamento de calidad también incluye el área de medioambiente, la cual se encarga de una correcta gestión y tratamiento de los residuos producidos por la planta, a pesar de que en una empresa de estas características la cantidad de residuos producidos no es muy grande.

## 2.4. EL ÁREA DE ESTAMPACIÓN.

La estampación es un proceso que se encuentra al inicio de la cadena de valor del automóvil, y las tecnologías existentes en este ámbito están ya muy desarrolladas, siendo los niveles de eficiencia alcanzados muy elevados.

Los principales materiales empleados en estampación para el sector de la automoción son el acero y el aluminio, siendo la versatilidad de dichos materiales forjables una ventaja ya que permiten fabricar piezas desde unos pocos gramos a cientos de Kg., en series de hasta miles de piezas, con gran variedad de formas y características mecánicas adaptadas a la aplicación correspondiente.

Normalmente esta clase de piezas son poco visibles al ir incorporadas en conjuntos interiores del vehículo, principalmente en el chasis, y en partes del motor.

En lo que respecta a los principales mercados clientes de la estampación, el de automoción mantiene su liderazgo como principal cliente para la forja, absorbiendo un 65% de las entregas totales en tonelaje en 2015 (Fuente: Sociedad de Industrias de Forja por Estampación).

En cuanto a los aspectos más técnicos a continuación se desarrollan algunos conceptos básicos para entender mejor la problemática que se plantea en apartados posteriores.

La estampación es un tipo de proceso de fabricación por el cual se somete un metal a una carga de compresión entre dos moldes. La carga puede ser una presión aplicada progresivamente o una percusión, para lo cual se utilizan las prensas. Los moldes, son matrices de acero, una de ellas deslizante a través de una guía (martillo) y la otra fija (yunque).

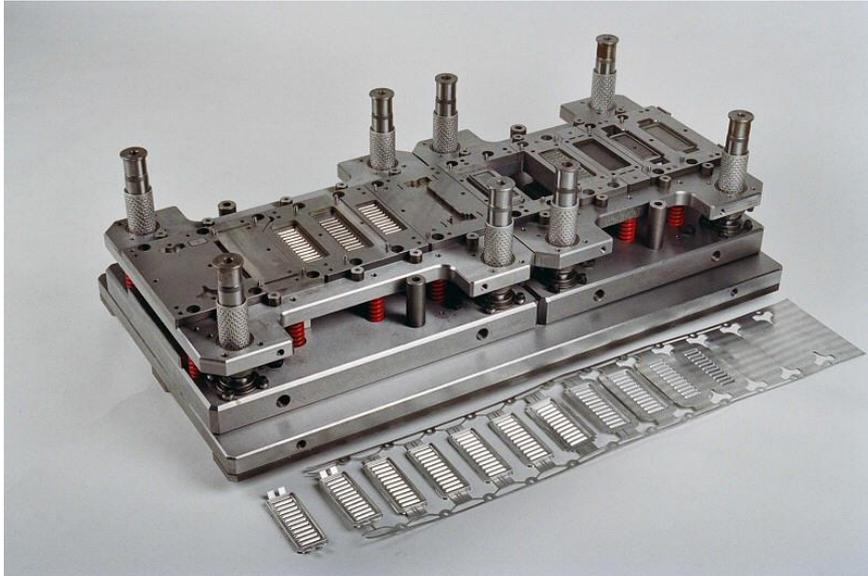
Si la temperatura del material a deformar es mayor a la temperatura de recristalización, se denomina estampación en caliente, y si es menor se denomina estampación en frío. La empresa en estudio es especialista en esta última clase de estampación.

Entre las ventajas y capacidades de la estampación en frío destaca la posibilidad de trabajar con materiales de alta resistencia que posibilitan soluciones de reducción de peso de la estructura del vehículo. Esto es especialmente relevante para piezas de chasis, en las que los requerimientos de espesor y resistencia de los materiales son mayores.

Una matriz de estampación como se ha dicho es el útil que se introduce en las prensas para producir las piezas. Consiste en muchas estaciones de trabajo individuales, realizando cada una de ellas una o varias operaciones sobre la pieza. La última estación es el corte que separa la pieza de la lámina de material.

Dependiendo de la matriz, puede salir una o dos piezas por golpe. Si salen dos piezas, pueden ser dos manos distintas o dos cavidades distintas. Si son manos distintas significa que son simétricas pero no iguales en geometría. Si son dos cavidades distintas significa que la geometría es exactamente la misma aunque las dimensiones pueden variar en décimas de milímetros.

Las matrices pueden ser de tamaños y pesos muy diferentes en función de la pieza fabricada. Las matrices progresivas son utilizadas para producir un gran número de piezas manteniendo un coste bajo.



*Figura 10: Interior de una matriz progresiva con su correspondiente tira de material después de ser sometida a las operaciones de cada estación. Fotografía obtenida de upacat.com*

El proceso de estampación representa la actividad principal de la empresa, debido a que es donde más valor añadido se le da al producto, ya que se pasa de la materia prima en forma de bobinas de acero a piezas ya acabadas o semi-acabadas con la forma y dimensiones requeridas.

En dicha área además de las 5 prensas que existen en la empresa, se pueden observar: el almacén de bobinas, las estanterías donde se guardan las matrices y las estanterías donde se guardan las galgas.

Una breve explicación del proceso de estampación sería la siguiente:

Los operarios preparan la prensa introduciendo la matriz de la pieza que se desea fabricar y al mismo tiempo otro grupo de operarios introduce la bobina correspondiente al material requerido.

A continuación, el encargado de prensas ajusta los parámetros, como pueden ser la velocidad de estampación o el número de piezas deseado y se comienza la producción. Los operarios deben realizar controles rutinarios sobre las piezas con el útil de control, denominado galga. Dichos controles se llevan a cabo a principio de serie, cada una determinada frecuencia y a final de serie, todo ello para comprobar que se está produciendo conforme a los requerimientos establecidos por el cliente.

Los controles a realizar por parte del operario vienen especificados en los distintos pasos de una instrucción de control, la cual aparece en la pantalla de un ordenador que se encuentra junto a la prensa, para lo cual se emplea un software de control de calidad asistido por computadora (CAQ: Computer Aided Quality).



*Figura 11: Área de estampación. Fotografía elaborada por la empresa.*

### 2.4.1. Galgas y elementos de control.

En este contexto una galga es un conjunto mecánico que sirve para la verificación dimensional de una pieza determinada, existiendo para cada pieza distinta su galga correspondiente.

Generalmente una galga está formada por las siguientes partes:

Posicionadores: ayudan a situar y colocar la pieza en la galga de forma correcta.

Clampas: sirven para fijar la pieza y evitar que esta pueda tener algún tipo de movimiento.

Pasas/No pasas: se utilizan para realizar las comprobaciones de las distintas tolerancias superficiales que pueda tener la pieza.

Pletinas de enrase: se utilizan para realizar las comprobaciones de las distintas tolerancias de contorno que pueda tener la pieza.

Puntos de reloj: se utilizan para conocer con mayor precisión cuál es la dimensión real de un punto de la superficie de la pieza, para ello se emplean relojes comparadores, cuya precisión es del orden de décimas de milímetros.

Además de las galgas, también se suelen emplear otros elementos de control como pueden ser: el gramil de alturas, el medidor de espesores, el pie de rey.

Una de las características más importante de esta herramienta es que los controles sean repetibles, es decir, que independientemente de qué operario realice los controles, los resultados sobre una misma pieza sean los mismos. Para ello es necesaria la existencia de una instrucción de galga, donde se especifique como montar la pieza en el útil de control.

## 2.5. EL ÁREA DE SOLDADURA.

La soldadura en la automoción comporta características específicas debido a la constante evolución de los materiales y los procesos para conseguir los niveles de calidad y productividad que requiere esta competitiva industria.

En la actualidad las industrias automotrices realizan este trabajo con la ayuda de robots, tratándose por lo tanto de procesos semiautomáticos o automáticos, es decir, con reducida dependencia del operario.

La soldadura por resistencia, y en particular la soldadura por puntos, está especialmente indicada para el sector de la automoción, y particularmente para la soldadura de las carrocerías, debido a los reducidos espesores de las chapas empleadas en las mismas. Normalmente, dichos espesores no exceden de 3 mm.

En todo proceso de soldadura por resistencia, es vital encontrar los parámetros adecuados de intensidad de corriente, presión y tiempo empleado en el proceso para obtener una soldadura de calidad. Todo ello teniendo en cuenta a priori la resistencia eléctrica de los materiales a unir, parámetro que no puede regularse, ya que depende de la propia naturaleza de los materiales.

Otra técnica ampliamente empleada en automoción es la soldadura por arco metálico con gas, conocida como MIG/MAG, donde se establece un arco eléctrico entre la pieza de trabajo y el alambre electrodo que se alimenta continuamente.

Este tipo de unión se requiere cuando hay que soldar sobre una chapa algún tipo de incorporable, como pueden ser por ejemplo: varillas, alambres, pletinas. Esta tipología de soldadura aporta mayor resistencia a la unión y a diferencia de la soldadura por puntos es un sistema más productivo por no tener que cambiar de electrodo, sin embargo, se necesita material de aporte.

El proceso de soldadura es de gran importancia en la empresa, ya que permite añadir valor a las piezas procedentes de estampación, y a la vez hace posible fabricar una mayor variedad de producto acabado.

En el área de soldadura existen 3 tipologías distintas de máquinas: 5 máquinas estáticas, 2 robots de soldadura MAG y 1 robot de soldadura por puntos. Además en esta zona existe un almacén de producto semi-acabado (contenedores con piezas que salen del área de estampación y deben ser soldadas posteriormente) y las estanterías donde se guardan los útiles de soldadura.



*Figura 12: Área de soldadura. Fotografía elaborada por el autor del TFM.*

## 2.5.1. Tipos de soldadura.

### 2.5.1.1. Soldadura por puntos.

Este tipo de soldadura se realiza en una máquina estática, en el caso de que solamente se tenga que soldar un punto entre las dos piezas, o en el robot de soldadura por puntos, si la unión entre las dos piezas consiste en más de un punto. Es un tipo de soldadura donde no existe fusión del metal base a soldar.

En la soldadura por puntos las piezas se encuentran una sobre la otra y la corriente de soldadura es suministrada a través de los electrodos, una vez alcanzada la temperatura de fusión, las piezas se unen entre sí en los puntos de contacto utilizando la presión que ejercen los electrodos.

Por lo tanto, las 4 principales variables a tener en cuenta en dicho proceso son: la intensidad aplicada, el tiempo de soldadura, la presión de apriete y la resistencia eléctrica de la unión.

Otras variables que podrían afectar a este tipo de soldadura son: el estado superficial de las superficies a unir, su limpieza y la eliminación de rugosidades hace que existan menores resistencias de contacto; o el estado de conservación de los electrodos, cuyo desgaste y deterioro provoca el aumento de las resistencias de contacto con las piezas a unir.

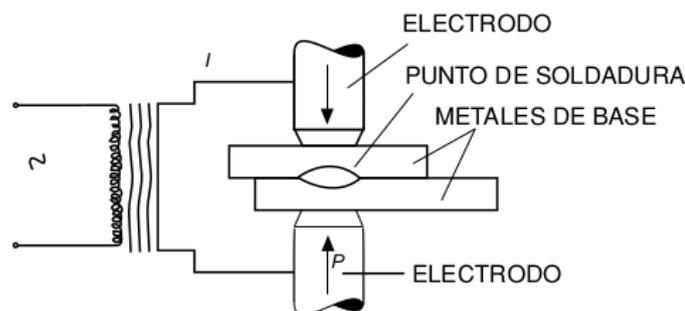


Figura 13: Detalle del proceso de soldadura por puntos. Fotografía obtenida de la web GasolSRL.com

### 2.5.1.2. Soldadura de tuercas.

Este tipo de soldadura se lleva a cabo en las máquinas estáticas.

La soldadura por protuberancias es una variante de la soldadura por puntos, consistente en practicar previamente resaltes o protuberancias en uno de los materiales base, en aquellos lugares donde se desea que exista un punto de soldadura.

El objeto de tales resaltes es concentrar el área de aplicación de la fuerza ejercida por medio de los electrodos. En este procedimiento, los electrodos son de mayor diámetro que en la soldadura por puntos, pues habitualmente se cubren a la vez varias protuberancias.

Las protuberancias se aplastan ligeramente antes de iniciar el proceso de soldadura, debido a la presión que los electrodos ejercen sobre las mismas. Una vez se ha alcanzado la presión deseada, comienza a circular la corriente desde el electrodo superior al electrodo inferior.

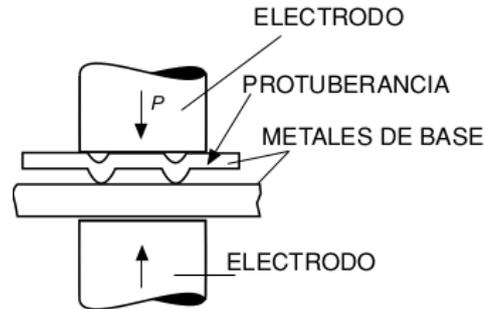


Figura 14: Detalle del proceso de soldadura por protuberancias. Fotografía obtenida de la web GasolSRL.com

### 2.5.1.3. Soldadura tipo MAG.

Este tipo de soldadura se lleva a cabo en los robots de soldadura MAG. Todos los parámetros y las coordenadas de localización de la unión que se va a soldar se programan mediante una unidad CNC.

Este proceso se basa en una soldadura en la cual el calor necesario es generado por un arco que se establece entre un electrodo consumible y el metal que se va a soldar. Un alambre macizo, desnudo, que se alimenta de forma continua automáticamente y se convierte en el metal depositado según se consume, realiza la función de electrodo.

La característica que más diferencia este proceso del resto es que el electrodo, el arco y las zonas adyacentes del metal base, quedan protegidas de la contaminación de los gases atmosféricos mediante una corriente de gas que se aporta por la tobera de la pistola, concéntricamente al electrodo (alambre).

El electrodo es continuo, lo que aumenta la productividad por no tener que cambiar de electrodo y la tasa de deposición es elevada. Por otra parte, es un proceso delicado, ya que requiere de bombonas de gas con una mezcla determinada de Argón, Oxígeno y CO<sub>2</sub>. En este caso el gas utilizado es activo, ya que participa de forma activa en la soldadura, por eso se habla de soldadura MAG y no MIG, donde el gas es inerte.

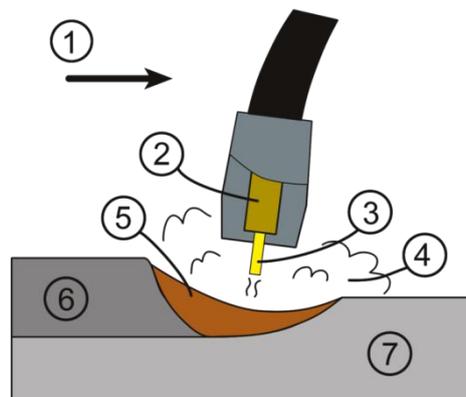


Figura 15: Detalle del proceso de soldadura MAG. Fotografía obtenida de la web Wikipedia.org 1. Dirección de la soldadura 2. Tubo de contacto 3. Hilo 4. Atmósfera de gas protector 5. Baño de fusión 6. Cordón de soldadura 7. Metal de base.

Las variables principales a definir son las que controlan la estabilidad del arco, el régimen de soldadura y la calidad de la misma, y son:

Tensión del arco.

Corriente de soldadura.

Velocidad de avance.

Otras variables a tener en cuenta son las denominadas variables secundarias, que pueden ser modificadas de manera continua. Son a veces difíciles de medir con precisión y especialmente en soldadura automática. Estas no afectan directamente la forma del cordón, pero actúan sobre una variable primaria que a su vez influye en el mismo. Estas variables son:

Altura de la boquilla.

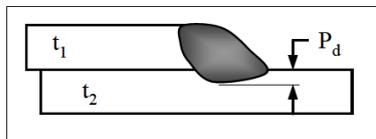
Ángulo de la boquilla.

Velocidad de alimentación del alambre.

### 2.5.2. Control de la calidad de la soldadura.

Según se ha comentado en el apartado anterior “Requerimientos de calidad” los clientes del sector de la automoción exigen unos estándares de calidad sobre los distintos tipos de soldadura que se han comentado, estas especificaciones se encuentran definidas en las normas propias de cada cliente.

#### III.4.2 Penetration



**Figure 15: Weld Penetration**

The target is that the weld penetration  $P_d$  into lower sheet, as shown in Figure 15, shall be between:

$$0.3 * t_2 \leq P_d \leq t_2$$

Please see III.4.9 for weld penetration (root convexity) in excess of  $t_2$ .

*Figura 16: Ejemplo de especificación de cliente. Requerimiento de penetración en soldadura MAG. Fotografía obtenida de la “Engineering Specification of Ford” ESBM5A-1B310-AA.*

Con el objetivo de asegurar el cumplimiento de estos requerimientos, se deben definir un conjunto de ensayos. La periodicidad de estos ensayos y el tamaño de la muestra a ensayar vienen determinados en la respectiva instrucción de control de la pieza.

Por una parte, existen los ensayos que simulan los esfuerzos que deben soportar las piezas una vez montada en el automóvil, entre los que destacan los ensayos de par y los ensayos de tracción.

Por otra parte, existen los ensayos analíticos, cuyo fin es realizar un análisis de las distintas características intrínsecas de la propia soldadura, es decir, calcular parámetros como: la penetración, la altura, el gap, etc.

Por lo tanto, a continuación, se van a describir con más detalle los ensayos más comunes que se realizan en la empresa en estudio.

### *2.5.2.1. Ensayo de par.*

Los ensayos de par se emplean para simular esfuerzos de torsión sobre las tuercas soldadas. Esta prueba puede ser de carácter destructivo o no destructivo.

Los valores de par de giro mínimos establecidos en los requerimientos están fijados de forma que la unión soldada no se desprenda incluso cuando produzca una rotura de la rosca. Dicha exigencia es importante en virtud parcialmente de la difícil accesibilidad, dado que su recambio puede ser muy costoso en caso de reparación.

Para realizar este tipo de ensayo se debe emplear como herramienta una llave dinamométrica o torquímetro, la cual consiste en una llave fija de vaso que puede ser intercambiable con otras llaves de vaso de otras dimensiones (se escoge el vaso dependiendo de la métrica de la tuerca), a la que se acopla un brazo que incorpora el mecanismo de medida.

Para el caso de un ensayo destructivo se emplea una llave dinamométrica de reloj, la cual consta de una esfera de reloj en la que se muestra mediante una aguja móvil el valor del par de apriete máximo (N·m) ejecutado durante el esfuerzo.

Mientras que si el ensayo es no destructivo se utiliza una llave dinamométrica de salto que contiene un sistema mecánico regulable a través de un nonio, que libera la tensión de la llave cuando se alcanza el par de apriete preajustado.

Los pares de giro mínimos son válidos para la unión soldada y están fijados de forma que la unión soldada no se desprenda incluso cuando produzca una rotura de la rosca. Dicha exigencia es importante en virtud parcialmente de la difícil accesibilidad, dado que su recambio puede ser muy costoso en caso de reparación.

### *2.5.2.2. Ensayos de tracción.*

La función de esta tipología de ensayo es reproducir esfuerzos de tracción en las tuercas soldadas para probar la resistencia de su unión con la pieza principal. Esta prueba siempre es de carácter destructivo.

El medio utilizado para llevar a cabo este control es la máquina universal de ensayos de tracción-compresión. Dicho aparato viene acompañado de un software a través del cual se obtiene la información del resultado de la prueba. Por ello al lado de la máquina se encuentra instalada una computadora, cuya utilidad es mostrar el valor (kN) alcanzado durante el esfuerzo de tracción. Además, el software muestra información sobre la velocidad a la cual se desarrolla el test, parámetro relevante que debe ser ajustado previamente a empezar, y que puede variar dependiendo de la pieza.



*Figura 17: Ejemplo de máquina de ensayos universal de tracción-compresión. Fotografía obtenida de la web Testersupply.es*

En cuanto al procedimiento habitual previo al ensayo es importante resaltar que hay que introducir un tornillo de la misma métrica y paso que la tuerca que se va ensayar hasta la mitad de esta y por su parte trasera, es decir, dejando que sobresalga la cabeza del tornillo con el fin de que al aplicarle una fuerza de compresión se esté probando realmente la resistencia a tracción de la unión soldada.

En el caso de que la tuerca no sea roscada, y por lo tanto no se pueda roscar un tornillo para poder aplicar el esfuerzo sobre la unión soldada, habrá que emplear un punzón de un diámetro específico.

Para poder realizar una prueba lo más representativa posible hay que colocar la pieza sobre un útil que permita que la pieza se mantenga fija sin necesidad de sujetarla con la mano, ya que esto no está permitido, al tenerse que cerrar la puerta de la máquina una vez se ponga en funcionamiento. El útil debe ser diseñado para que la tuerca se pueda introducir en el interior de un cilindro parcialmente hueco de un determinado diámetro.



*Figura 18: Ejemplo de ensayo de tracción en la máquina de ensayos universal. Fotografía elaborada por el autor del TFM.*

### 2.5.2.3. Ensayos por ultrasonidos.

El objetivo del ensayo por ultrasonidos es verificar que la soldadura por puntos cumple el diámetro de lenteja requerido, y además también sirve para comprobar que la lenteja esté completa, que no esté suelta y que no esté quemada. Este ensayo es de carácter no destructivo, ya que las piezas una vez chequeadas con el medidor ultrasonidos, si son correctas se devuelven al contenedor de pieza soldada.

El medidor ultrasonidos empleado para dicho test viene acompañado de un software donde se muestra un gráfico con las señales recibidas por el aparato y se muestra si el punto es OK o NOK, en este último caso indica el defecto del punto. Para realizar la medición se emplea un palpador de burbuja, cuya función es emitir y recibir las señales, dicho palpador es una acople que se va intercambiando dependiendo del diámetro del punto que se quiere comprobar.

Cada pieza distinta que se suelde por puntos necesita que se cree un programa específico para ella en el software, ya que el sistema de ultrasonidos depende del espesor de las dos chapas a soldar, del número de puntos y del diámetro de estos.

### 2.5.2.4. Ensayo de metalografía.

El ensayo de metalografía es aquel que permite asegurar la calidad de la soldadura de tipo MAG, ya que en él se analizan todos aquellos parámetros del cordón de soldadura requeridos en la norma de cliente.

Este ensayo es de carácter destructivo, debido a que para calcular el valor de todos los medibles se debe realizar un corte transversal sobre el cordón. Para ello se sigue un procedimiento común a todas las piezas: primero se separa el cordón del resto de la pieza con la radial; en segundo lugar, una vez tenemos el cordón se realiza el corte transversal con una tronzadora; y por último, antes del análisis se debe atacar el trozo de metal con un ácido específico que ayuda a distinguir los distintos materiales que forman la muestra.

La herramienta empleada para estos ensayos es el Welding Expert, la cual consiste en un sistema de captura de imagen digital con óptica invertida que tiene por objetivo mejorar los ajustes de luz complicados a la hora de tomar imágenes de superficies metálicas.

Este equipo está formado por una parte óptica y otra de software de análisis que, combinadas, ayudan en la toma de imágenes de la soldadura mediante autoenfoco y permite realizar y evaluar las medidas específicas de ésta.



Figura 19: Equipo de ensayos de metalografía Welding Expert. Fotografía obtenida de la web [Struers-welding-expert.com](http://Struers-welding-expert.com)

Dicho software es capaz de dotar de cierto grado de flexibilidad a los ensayos de metalografía, ya que permite personalizar los medibles que se necesitan evaluar sobre cada una de las tipologías de piezas existentes. Estos medibles se corresponden con los requerimientos de soldadura que se exigen por parte del cliente.

Conforme se van trazando las líneas que proporcionan las mediciones de los parámetros sobre la captura de imagen hecha al cordón se van calculando estos y se comparan automáticamente con los límites establecidos para cada uno de ellos.

Una vez finalizado el análisis se reporta toda la información directamente en un informe donde aparecen resumidos todos los ensayos, mostrándose los valores en verde si estos se encuentran dentro de especificaciones, o en rojo si están fuera del rango. En el caso de que uno sólo de los parámetros sea NOK, el resultado global del ensayo para esa pieza es NOK.

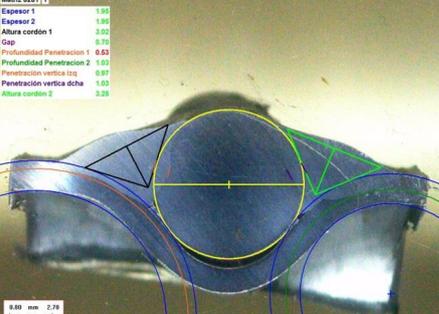
		INFORME DE MEDIDAS																																									
		Fecha:	03/01/2017																																								
Piezas Final Serie 8281		Oper.:	Andrés																																								
<b>1</b>	O.T.1231758	A-1																																									
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Medidas</th> <th>Min</th> <th>Max</th> <th>Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Espesor 1</td> <td>1,92</td> <td>2,08</td> <td>1,95</td> </tr> <tr> <td>Espesor 2</td> <td>1,92</td> <td>2,08</td> <td>1,95</td> </tr> <tr> <td>Altura cordón 1</td> <td>1,4</td> <td>-</td> <td>3,02</td> </tr> <tr> <td>Gap</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0,7</td> </tr> <tr> <td>Profundidad Penetración 1</td> <td>0,6</td> <td>-</td> <td>0,61</td> </tr> <tr> <td>Profundidad Penetración 2</td> <td>0,6</td> <td>-</td> <td>1,03</td> </tr> <tr> <td>Penetración vertical izq</td> <td>0,6</td> <td>-</td> <td>0,97</td> </tr> <tr> <td>Penetración vertical dcha</td> <td>0,6</td> <td>-</td> <td>1,03</td> </tr> <tr> <td>Altura cordón 2</td> <td>1,4</td> <td>-</td> <td>3,25</td> </tr> </tbody> </table>		Medidas	Min	Max	Valor	Espesor 1	1,92	2,08	1,95	Espesor 2	1,92	2,08	1,95	Altura cordón 1	1,4	-	3,02	Gap	0	1	0,7	Profundidad Penetración 1	0,6	-	0,61	Profundidad Penetración 2	0,6	-	1,03	Penetración vertical izq	0,6	-	0,97	Penetración vertical dcha	0,6	-	1,03	Altura cordón 2	1,4	-	3,25
Medidas	Min	Max	Valor																																								
Espesor 1	1,92	2,08	1,95																																								
Espesor 2	1,92	2,08	1,95																																								
Altura cordón 1	1,4	-	3,02																																								
Gap	0	1	0,7																																								
Profundidad Penetración 1	0,6	-	0,61																																								
Profundidad Penetración 2	0,6	-	1,03																																								
Penetración vertical izq	0,6	-	0,97																																								
Penetración vertical dcha	0,6	-	1,03																																								
Altura cordón 2	1,4	-	3,25																																								
Grieta	<input type="radio"/>	OK																																									
Poro	<input type="radio"/>																																										
Otros	<input type="radio"/>																																										

Figura 20: Ejemplo de informe de metalografía. Fotografía elaborada por el autor del TFM.

## 2.6. REQUERIMIENTOS DE CALIDAD.

La industria de la automoción es una de las más exigentes del mundo, debido a que opera bajo altas presiones de costo y tiempo, y por lo tanto, ser capaz de confiar en los proveedores es un factor clave. Hay que tener siempre presente que los fallos detectados por el cliente cuestan muchísimo más que las medidas que se toman para evitarlos.

Todos los fabricantes requieren proveedores que tengan sus procesos bajo control, que entiendan los requisitos específicos de los clientes y se centren en la mejora continua, con lo cual, la certificación adecuada de su Sistema de Gestión de Calidad (SGC) ofrece una ventaja decisiva en la demostración de que su empresa coincide con estos criterios.

La certificación ISO / TS 16949 es el único estándar reconocido en todo el mundo relacionado con la gestión de la calidad que se aplica a cualquier organización activa en la cadena de suministro del automóvil.

Una empresa que trabaja de acuerdo a un Sistema de Gestión de Calidad bajo los requerimientos de la ISO/TS 16949 mejora la calidad de los productos, procesos y servicios para los clientes de la industria automotriz.

La empresa utiliza el SGC como herramienta para trabajar bajo el concepto de seguimiento y control de procesos, todos ellos orientados permanentemente hacia la satisfacción del cliente.

Estas actividades así como las auditorías, permiten la retroalimentación y mejora continua de la gestión de calidad de la organización. Y este proceso permite involucrar a los proveedores dentro del sistema y mejorar la confianza en la calidad de sus productos y servicios.

La norma UNE-ISO/TS 16949 establece los requisitos particulares para la aplicación de la Norma ISO 9001 para la producción en serie y piezas de recambio original en la industria del automóvil. La certificación es un requisito indispensable para todos los proveedores que suministran directamente a los constructores y dependiendo de los requisitos contractuales de los clientes, también para proveedores de los niveles inferiores.

El objetivo principal de la Norma UNE-ISO/TS 16949 es la mejora continua, poniendo énfasis en la prevención de los defectos y los desperdicios en la cadena de suministro. Por ello, la norma asegura que los componentes, piezas y sistemas de seguridad del automóvil cumplen los requisitos especificados por los clientes así como la reglamentación aplicable. Por otro lado, esta norma impulsa la mejora continua de los productos a mejores precios, así como la investigación y desarrollo de nuevos componentes que influyen en la seguridad del propio vehículo y su entorno.

Como se ha dicho la Norma UNE-ISO/TS 16949 es un requerimiento general en la industria automotriz, pero luego cada cliente tiene sus propias normas específicas que deben cumplirse.

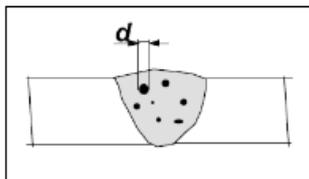
Normalmente estos requerimientos característicos del cliente o incluso de la pieza en concreto a fabricar vienen reflejados en el plano de la pieza, y habitualmente tratan sobre la composición de los materiales a emplear y los procesos de fabricación que pueda llevar aplicados.

A continuación, se muestran dos ejemplos de requerimientos específicos extraídos de normas de cliente.

Diámetro interno de rosca y de rosca basta	Grosor de chapa en mm	Fuerza de sustentación mínima en cabeza $F_K$ en N	Par de giro mínimo M en Nm <sup>1)</sup>
M4, CT4	0,5	1 200	10
	$\geq 1,25$	2 000	15
M5, CT5	0,5	1 200	14
	$\geq 1,25$	2 000	20
M6, CT6	0,5	1 400	25
	$\geq 1,75$	2 500	35
M8, CT8	0,75	2 300	65
	$\geq 3$	4 000	85

Tabla 1: Parámetros de ensayo para la comprobación de uniones soldadas según la norma de Volkswagen VW\_6560.

### III.4.3 Porosity



The target is that porosity as shown in Fig. 16 shall not be present.

The upper tolerance for porosity is:

- Single pore extension  $d_{\max} \leq 0.4 \cdot t_{\min}$ , and
- Multiple pore extension max. 20 % of projected area.
- Pinholes are not permitted.

Figura 21: Tolerancias de porosidad según la norma Ford ESBM5A-1B310-AA.



## 3. DOE SOBRE LOS PARÁMETROS EN LA SOLDADURA DE TUERCAS.

### 3.1. INTRODUCCIÓN.

#### 3.1.1. DOE (Design of Experiments).

La mejora continua de procesos se ha convertido en un objetivo fundamental para garantizar la competitividad de las empresas industriales de hoy en día. Los métodos estadísticos usados para la mejora de la calidad y productividad pueden clasificarse en primer lugar en métodos “on-line” y métodos “off-line”.

Los primeros abarcan el conjunto de técnicas de control estadístico de procesos (SPC) utilizadas durante el proceso de fabricación del producto o de prestación del servicio. Los segundos se refieren al conjunto de técnicas de diseño de productos, procesos y servicios que es necesario usar previamente a la puesta en marcha de la fabricación de productos o de la prestación de servicios propiamente dicha.

Entre los métodos off-line más importantes destaca el de Diseño de Experimentos (DOE), son técnicas dirigidas a organizar la experimentación de forma que se maximice la información obtenida de los experimentos y se facilite su interpretación.

La mejora de procesos y productos conlleva, necesariamente, la introducción de cambios. Estos cambios, para que resulten positivos, no pueden ser fruto de la improvisación o de la intuición. Los cambios racionales deben basarse en datos. Las técnicas estadísticas son las idóneas para el análisis de datos pero no es menos importante la capacidad de generación de datos altamente informativos.

##### 3.1.1.1. Definiciones.

A continuación, se van a presentar los conceptos más importantes relacionados con la metodología del Diseño de Experimentos (DOE). En un contexto industrial un experimento no es más que un conjunto de pruebas, cuyo objetivo es obtener información que permita resolver un problema o mejorar un producto o proceso.

La variable respuesta de interés es aquella característica de calidad o productividad del proceso sobre la que se desea incidir con el fin de mejorarla. Todo experimento tiene como objetivo cuantificar los efectos que sobre la respuesta/s de interés tienen un conjunto de factores controlados cualitativos o cuantitativos.

En un experimento para cada factor se estudian dos o más alternativas llamadas niveles en el caso de factores cuantitativos y variantes en el caso de factores cualitativos. En cada una de las pruebas del experimento se utiliza un determinado tratamiento, que no es más que una condición operativa definida eligiendo un nivel, o variante, de entre los planteados para cada uno de los factores estudiados. El número de posibles tratamientos a ensayar es el producto de los números de niveles o variantes de los distintos factores.

### 3.1.1.2. Fases.

Para realizar un DOE hay que seguir paso a paso unas fases, las cuales implican abordar los siguientes aspectos:

- 1) Definir de forma operativa la característica de calidad o productividad sobre los que se quiere investigar los posibles efectos de los factores.
- 2) Seleccionar los factores a incluir en el experimento.
- 3) Seleccionar los niveles o variantes a ensayar de cada factor.
- 4) Definir en qué va a consistir cada prueba.
- 5) Decidir el número de pruebas a realizar y el tratamiento a aplicar en cada una.
- 6) Organizar todo el trabajo experimental.

### 3.1.1.3. Análisis de resultados.

Una vez realizadas las pruebas previstas en el diseño, y obtenido en cada una de ellas el valor de la respuesta de interés, el análisis estadístico de los resultados tiene como objetivo extraer de éstos toda la información relevante que contienen respecto al problema planteado.

El análisis implica responder, entre otras, a preguntas como:

¿Qué factores tienen efecto significativo sobre la media de la respuesta?

¿Qué interacciones son significativas?

¿Cuál es la naturaleza de los efectos significativos encontrados?

¿Cuáles serían los niveles o variantes óptimos para los diferentes factores, en función de sus efectos sobre la media de la respuesta?

¿Qué respuesta media cabe esperar trabajando en las condiciones óptimas?

### 3.1.2. ANOVA.

El análisis estadístico más básico tiene como objetivo la comparación de dos poblaciones o tratamientos, consistente en determinar si la diferencia que presentan las medias de las dos muestras es indicativa de una diferencia en las medias poblacionales o si, por el contrario, puede ser atribuida al azar. La comparación de dos poblaciones constituye el caso más sencillo que puede plantearse en el contexto del DOE, ya que se trata de investigar el posible efecto de un solo factor (que sólo tiene dos variantes), dicha problemática puede resolverse con cálculos estadísticos básicos.

Pero cuando se trata de comparar más de dos medias, los cálculos se complican y la técnica que se utiliza para la resolución del DOE es el Análisis de la Varianza (ANOVA). Este constituye la técnica básica para el estudio de observaciones que dependen de varios factores.

En la mayor parte de los problemas reales suele haber más de un factor que puede afectar al resultado o resultados de interés. Tradicionalmente, el enfoque que suele adoptarse al abordar estos problemas consiste en estudiar cada factor por separado, o, en contextos de experimentación industrial, hacer pruebas modificando cada vez un sólo factor. Ello refleja la idea, que se tiene habitualmente, de que si se modifican muchos factores a la vez, no va a ser posible precisar cuáles de estos factores han sido los responsables de los cambios observados en los resultados.

Sin embargo, este enfoque, pese a parecer lógico a primera vista, es completamente desaconsejable, por resultar ineficaz e ineficiente, al exigir una gran cantidad de pruebas y no permitir estudiar las posibles interacciones (ver más adelante) entre los efectos de los factores.

La alternativa consiste en estudiar simultáneamente los efectos de los diferentes factores y sus posibles interacciones mediante un estudio multifactorial.

La idea básica del ANOVA consiste en descomponer la variabilidad total observada en unos datos en una serie de términos, asociados a los efectos de cada factor estudiado y a sus posibles interacciones, más una parte residual con la que después se compararán los primeros.

Los resultados de un ANOVA se sintetizan en una tabla, el Cuadro Resumen del Análisis de la Varianza, que tiene siempre 6 columnas y una fila por cada factor y cada posible interacción doble, además de una fila para la variabilidad residual y otra para la variabilidad total.

A continuación, se va a detallar paso a paso como se realiza el análisis de la varianza (ANOVA) con el programa Statgraphics.

En la Figura 1 se presenta el menú general del paquete Statgraphics Centurión. El menú desplegable *Compare* nos permitirá realizar el análisis de la varianza de los datos correspondientes tanto en el caso de un solo factor cómo en el caso de 2 o más factores.

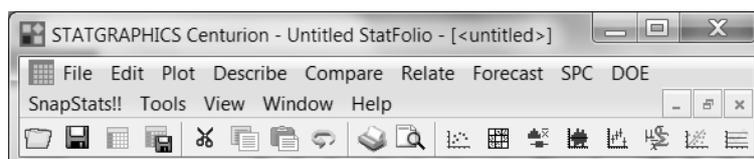


Figura 22: Barra de herramientas disponibles.

Para realizar el análisis de la varianza de los datos correspondientes en el caso de más de un factor, la ruta de acceso se puede observar en la Figura 2: *Compare / Analysis of Variance / Multifactor ANOVA...*

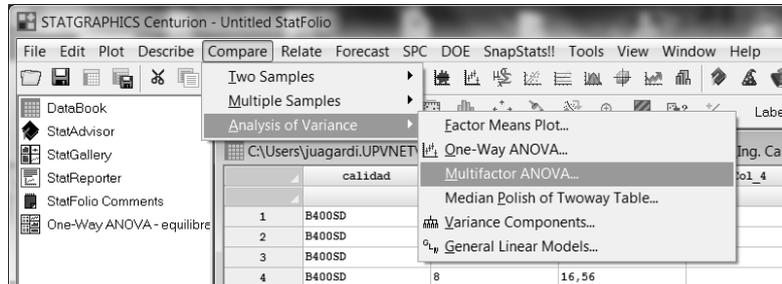


Figura 23: Barra de herramientas disponibles. Ruta de acceso a la realización del ANOVA multifactorial

En primer lugar se introducen los datos o se carga la variable respuesta con los datos del problema a analizar y las variables que contienen a los factores como se puede observar en la Figura 6.

Y para poder visualizar la tabla resumen del ANOVA activamos en la opción de Tablas y Gráficos dicha tabla, según la Figura 4. Podemos también obtener el gráfico de los intervalos LSD en la opción Means Plot.

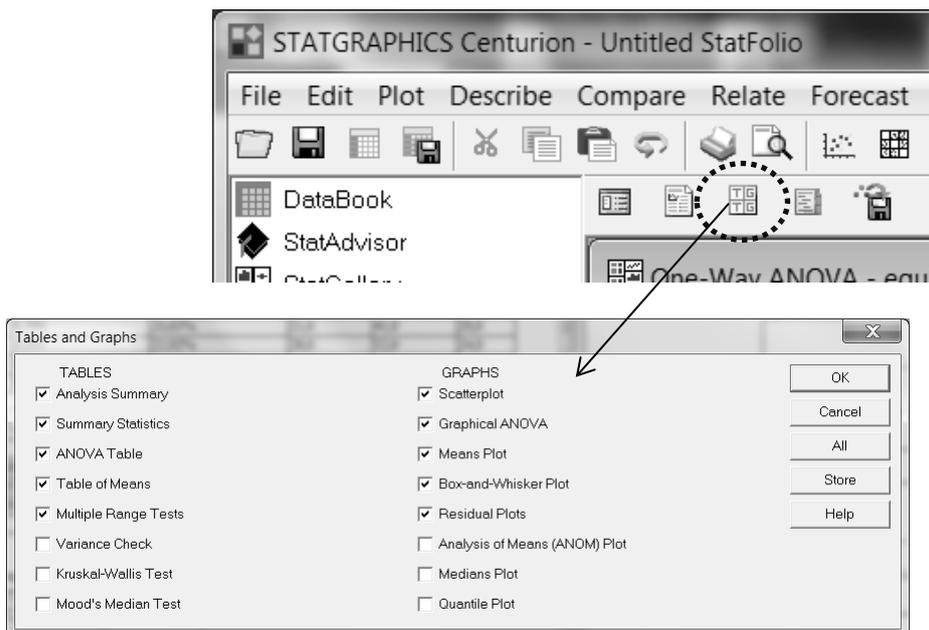


Figura 24: Tablas y Gráficos disponibles en este módulo.

### 3.2. JUSTIFICACIÓN.

El diseño de experimentos que se pretende realizar en esta sección del TFM está basado en un proceso de soldadura de tuercas por resistencia. En primer lugar se van a identificar y definir claramente los objetivos perseguidos.

La motivación de realizar este DOE viene dada por la necesidad de conocer los parámetros correctos en la soldadura de tuercas para aquellas piezas de nuevos proyectos.

La forma tradicional que se utiliza en la experimentación, para el estudio de estos problemas, se basa en estudiar los factores uno a uno, esto es, variar los niveles de un factor permaneciendo fijos los demás. Esta metodología presenta grandes inconvenientes:

- Es necesario un gran número de pruebas.
- Las conclusiones obtenidas en el estudio de cada factor tiene un campo de validez muy restringido.
- No es posible estudiar la existencia de interacción entre los factores.
- Es inviable, en muchos casos, por problemas de tiempo o de costo.

Las técnicas de diseño de experimentos se basan en estudiar simultáneamente los efectos de todos los factores de interés, son más eficaces y proporcionan mejores resultados con un menor coste.

El método de ajuste empleado habitualmente en la empresa en estudio es el de prueba y error basado en la experiencia, con lo cual la introducción de un DOE mejora este aspecto sustancialmente, ya que con un número limitado de pruebas acotadas y controladas se pueden obtener los parámetros más adecuados.

La principal ventaja de emplear un DOE frente al método de prueba y error basado en la experiencia es la reducción de la cantidad de pruebas a realizar con el fin de conseguir los parámetros más adecuados. Lo cual implica dos beneficios directamente:

1. Menor tiempo requerido para la homologación de la soldadura, lo cual es un beneficio muy importante ya que el tiempo entre que se adjudica una pieza nueva y la fecha límite de homologación a cliente es bastante reducido, permitiendo de esta forma tener un margen de reacción ante posibles errores.
2. La cantidad de piezas ensayadas es considerablemente menor, provocando esto un ahorro de dinero en cantidad de piezas ensayadas y consecuentemente achatarradas, además del tiempo de mano de obra del inspector de calidad realizando los pertinentes ensayos.

En este proyecto se va a desarrollar el diseño de experimentos para una pieza concreta a la cual se le suelda una única tuerca. Hay que resaltar que esta técnica puede extenderse al resto de nuevas piezas pendientes de homologar en un futuro, de las cuales aproximadamente el 65% contienen un proceso de soldadura de tuercas, ya sea 1 o más.

### 3.3. CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO.

La soldadura por resistencia es un proceso termoeléctrico en el que se genera calor, mediante el paso de una corriente eléctrica a través de la zona de unión de las partes de las piezas que se desean unir durante un tiempo y bajo una presión controlada.

Esencialmente, son 4 los parámetros que influyen en la calidad de la soldadura por resistencia y deben ser vigilados estrechamente para lograr resultados deseados.

- Intensidad de la corriente de soldeo:

Observando la expresión de la Ley de Joule ( $Q = I^2 \cdot R \cdot T$ ) se observa que la intensidad de soldeo es el factor de mayor influencia en la generación de calor, por tanto es el que más cuidadosamente hay que controlar. Será necesario alcanzar un valor mínimo para que los metales a unir se fundan, sin superar un valor máximo que llevaría a un exceso de fusión y salpicaduras debidas a la presión de los electrodos.

- Tiempo de soldeo:

Es el tiempo durante el cual está circulando la corriente de soldeo entre las dos partes a unir. Valores típicos están comprendidos entre 0,1 y varios segundos.

- Presión aplicada:

Esta fuerza es necesaria para asegurar un buen contacto eléctrico entre las partes que van a ser soldadas, y para mantener las partes fijas hasta que el metal derretido que forma la junta sólida tenga tiempo de solidificarse. Dependiendo del tamaño y tipo de máquina soldadora, se usan varios métodos de desarrollo de los electrodos, pero lo más común es usar aire comprimido.

- Resistencia eléctrica de la unión:

Esta variable es una característica intrínseca de los materiales a unir, tanto del de la tuerca a soldar como del de la pieza base, y como dichos materiales vienen impuestos por parte del cliente se trata de un parámetro sobre el cual no se tiene poder de actuación.

La pieza seleccionada para desarrollar el DOE es la de la siguiente imagen, se trata de una pieza estampada a la cual se le suelda una tuerca con 4 protuberancias de métrica M6.



Figura 25: 3D de la pieza seleccionada para el estudio. Imagen elaborada por el autor del TFM.

La **característica de calidad** que se quiere estudiar es la **resistencia a tracción** de la tuerca soldada, valor expresado siempre en kN. Siendo el objetivo aumentar la resistencia a tracción lo máximo posible, con lo cual se trata de una variable a maximizar.

Los factores que se incluyen en el experimento son tres: intensidad, tiempo y presión. Y se va a realizar un diseño factorial completo  $2^3$ , lo que significa que tendremos 8 tratamientos distintos, teniendo cada uno de ellos dos réplicas, por lo tanto en total tendremos 16 datos de la variable respuesta.

Ahora se detallan los niveles a los cuales se ha decidido probar los distintos **factores** que pueden influir en la resistencia a tracción de la soldadura.

En primer lugar, en cuanto a la **intensidad** (factor A) decir que no es un solo valor, sino que varía en cierto rango entre un límite superior y un límite inferior. En el diseño de experimentos en estudio los dos niveles que puede tomar la intensidad son: 8 kA y 10 kA.

Una intensidad de corriente de soldeo alta asegura mayor resistencia a la tracción, pero como inconveniente puede ocasionar que aparezcan proyecciones alrededor de la tuerca o incluso en su interior, llegando a dañar la rosca.

Mientras que una intensidad a nivel bajo puede ocasionar que la resistencia a tracción de la tuerca sea insuficiente y no soporte el valor mínimo exigido. Destacar que siempre se debe trabajar con la menor intensidad necesaria, ya que esto disminuye el consumo eléctrico de la máquina, lo cual genera un ahorro importante.

En segundo lugar, respecto al **tiempo de soldeo** (factor B) se va a considerar que puede tomar dos valores: 0,5 seg y 1 seg.

Un tiempo elevado hace que la intensidad circule durante más tiempo entre los dos metales, lo cual es beneficioso para asegurar la resistencia de la unión. Pero este hecho ocasiona que aumente el tiempo de ciclo de la máquina, al tardarse más en producirse la soldadura.

Y por otra parte, tener un tiempo de soldeo menor beneficia al tiempo de ciclo, lo cual significa que se pueden producir mayor cantidad de piezas en el mismo tiempo.

Por último, sobre la **presión** (factor C) aplicada por los electrodos sobre el material para poder unir ambas partes una vez fundidas las protuberancias, decir que puede tomar dos variantes: 100 psi y 110 psi.

Una presión alta hace que la fuerza ejercida asegure una mejor unión, y consecuentemente una resistencia más fiable. Como inconvenientes destacar que a mayor presión, la máquina sufre mayor desgaste en cada ciclo, lo que puede ocasionar fallos en ella.

Y una presión más baja hace que no aseguremos tanto la calidad de la unión, pero sin embargo la máquina sufre menor desgaste, lo que en teoría ocasiona un menor mantenimiento correctivo de ella.

## 3.4. DISEÑO DEL EXPERIMENTO.

### 3.4.1. Matriz de diseño.

Una vez descritas las características del proceso, establecida la variable respuesta y los factores, con sus respectivos niveles, hay que organizar todo el trabajo experimental. Para ello hay que basarse en los 3 principios básicos del DOE: aleatorización, replicación y bloqueo.

- **Principio de aleatorización:**

El orden de realización de las pruebas debe ser aleatorio. De esta forma podemos neutralizar fuentes de variación que puedan estar presentes durante el experimento. Una vez obtenida la matriz de diseño se deberán aleatorizar el orden de realización de las pruebas. De esta forma se obtienen observaciones que son variables aleatorias independientes, aspecto fundamental en la validación teórica de los modelos que permiten analizar los datos.

- **Principio de replicación:**

Es muy recomendable replicar el experimento para poder estimar el error experimental. Una réplica genuina es la obtenida en una sola prueba o medición para cada combinación de factores, y volver a repetir dichas condiciones para cada réplica adicional, en lugar de tomar varias muestras o mediciones de una vez en cada combinación.

- **Principio de bloqueo:**

Ocasionalmente pueden existir variables cuyo efecto no se desea probar, y que incluso pueden afectar o encubrir la influencia de las variables con las que se desea experimentar. En este caso es necesario neutralizar o bloquear el efecto de tales variables nocivas.

Los niveles de cada factor serán representados en la matriz con un 1 o un -1, dependiendo si se encuentran a nivel alto o bajo respectivamente. Y el signo en las distintas interacciones viene dado por el signo de los factores implicados, por ejemplo: si en un determinado tratamiento el factor A está a nivel -1 y el B a nivel 1, la interacción AB es el resultado de la multiplicación de los niveles, es decir, estaría a nivel -1.

Para poder ensayar todas las combinaciones de factores posibles, además de poder estudiar la existencia de interacción entre factores (todo ello con el mínimo número de pruebas posibles) hay que hacer que los efectos sean ortogonales, es decir, que cada nivel de un factor se combine en la misma proporción con todos los niveles de los otros factores.

Para representar correctamente el diseño del experimento se plantea la siguiente matriz de diseño, donde cada columna indica un factor y cada fila un tratamiento. Inicialmente se construye la matriz según el orden de Yates, y luego se aleatoriza el orden de ejecución de los distintos tratamientos.

Ensayo número	Notación geométrica		
	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Tabla 2: Orden de Yates.

ORD.	TRAT.	FACTORES			INTERACCIONES				REPLICACIONES		MEDIA
		A	B	C	AB	AC	BC	ABC	1	2	
6	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	3,36	3,41	3,385
1	2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	4,15	4,22	4,185
8	3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	3,74	3,81	3,775
7	4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	4,87	4,83	4,850
3	5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	3,42	3,33	3,370
4	6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	4,19	4,25	4,220
2	7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	3,82	3,76	3,790
5	8	1	1	1	1	1	1	1	4,98	5,05	5,015

Tabla 3: Matriz de diseño del experimento.

### 3.4.2. Cálculo de efectos.

A continuación, se calculará el efecto de cada uno de los factores sobre la media de la resistencia a tracción de la tuerca, el efecto de un factor se obtiene como la media poblacional del nivel alto menos la del nivel bajo, y análogamente para las interacciones. Se obtienen los siguientes resultados:

CÁLCULO DE LOS EFECTOS	
EFEECTO	VALOR
A	0,9875
B	0,5675
C	0,0500
AB	0,1625
AC	0,0500
BC	0,0400
ABC	0,0250

Tabla 4: Cálculo de efectos.

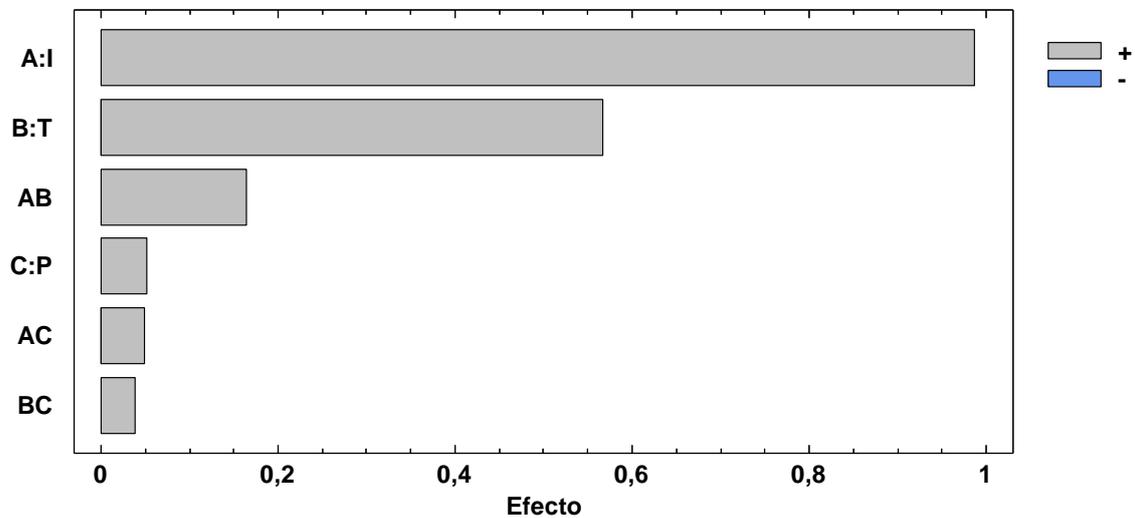
Mediante la herramienta de DOE disponible en StatGraphics se ha calculado también el valor de los efectos para cada uno de los factores y para las interacciones dobles. Comparando ambas tablas se observa que los valores obtenidos son prácticamente los mismos.

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
promedio	4,07437	0,0121031	
A:I	0,98625	0,0242061	1,0
B:T	0,56625	0,0242061	1,0
C:P	0,05125	0,0242061	1,0
AB	0,16375	0,0242061	1,0
AC	0,04875	0,0242061	1,0
BC	0,03875	0,0242061	1,0
bloque	0,01625	0,0242061	1,0

*Tabla 5: Cálculo de efectos con Statgraphics.*

Con Statgraphics se ha obtenido también un gráfico de Pareto representativo de los efectos calculados, en él se observa la magnitud de cada uno, así como mediante el color se distingue si el factor o interacción se encuentra en signo positivo o negativo. El primer gráfico es sin estandarizar, mientras que en el segundo los valores del eje X se encuentran estandarizados.

**Diagrama de Pareto para R**



*Tabla 6: Gráfico de Pareto sobre efectos.*

Diagrama de Pareto Estandarizada para R

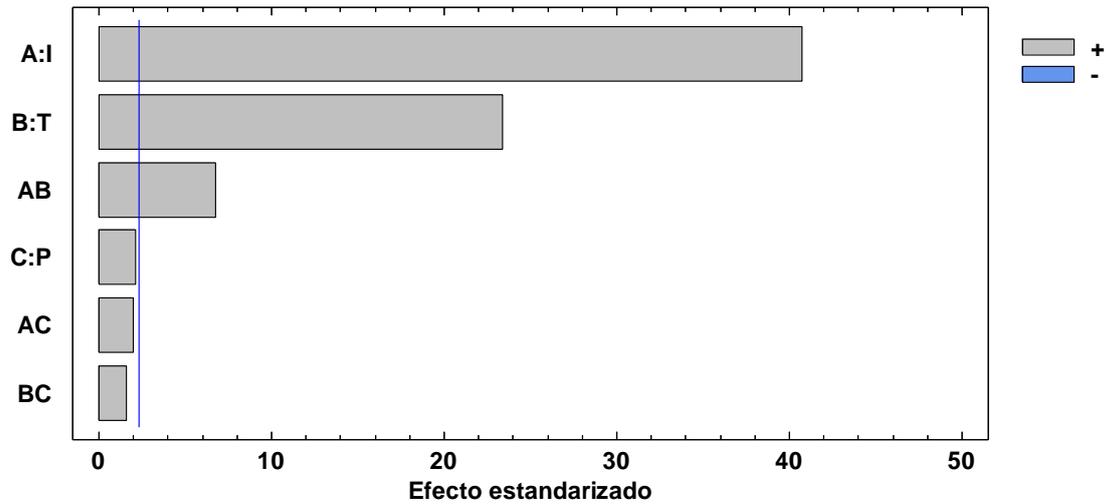


Tabla 7: Gráfico estandarizado de Pareto sobre efectos.

### 3.5. ANÁLISIS DE LA VARIANZA.

#### 3.5.1. Contraste de hipótesis y criterio de decisión.

En este apartado se va a emplear la herramienta estadística del ANOVA para el estudio del efecto de los factores comentados anteriormente sobre la media de la variable respuesta resistencia a tracción de la tuerca soldada.

En primer lugar hay que plantear un contraste de hipótesis para cada factor o interacción que se quiere analizar, y a continuación establecer un criterio de decisión

##### 1º Contraste de hipótesis:

Hipótesis nula (H0): No existen diferencias significativas entre la resistencia a la tracción para los dos niveles de intensidad estudiados (8 y 10 kA).

Hipótesis alternativa (H1): Sí existen diferencias significativas entre la resistencia a la tracción para los dos niveles de intensidad estudiados (8 y 10 kA).

##### 2º Contraste de hipótesis:

Hipótesis nula (H0): No existen diferencias significativas entre la resistencia a la tracción para los dos niveles de tiempo de soldeo estudiados (0,5 y 1 seg).

Hipótesis alternativa (H1): Sí existen diferencias significativas entre la resistencia a la tracción para los dos niveles de tiempo de soldeo estudiados (0,5 y 1 seg).

**3º Contraste de hipótesis:**

Hipótesis nula (H0): No existen diferencias significativas entre la resistencia a la tracción para los dos niveles de presión estudiados (100 y 110 psi).

Hipótesis alternativa (H1): Sí existen diferencias significativas entre la resistencia a la tracción para los dos niveles de presión estudiados (100 y 110 psi).

**4º Contraste de hipótesis:**

Hipótesis nula (H0): No existe interacción doble entre intensidad y tiempo de soldeo.

Hipótesis alternativa (H1): Sí existe interacción doble entre intensidad y tiempo de soldeo.

**5º Contraste de hipótesis:**

Hipótesis nula (H0): No existe interacción doble entre intensidad y presión.

Hipótesis alternativa (H1): Sí existe interacción doble entre intensidad y presión.

**6º Contraste de hipótesis:**

Hipótesis nula (H0): No existe interacción doble entre tiempo de soldeo y presión.

Hipótesis alternativa (H1): Sí existe interacción doble entre tiempo de soldeo y presión.

**Criterio de decisión:**

Primero hay que obtener el valor  $F(5\%)$ , el cual es aquel que tiene una probabilidad del 5% de ser superado por la variable  $F_{ge,gr}$ . Una vez obtenida este y conocido el Fratio de cada factor o interacción el criterio sería el siguiente:

Si  $F_{ratio} > F(5\%)$  se rechaza la hipótesis nula y se dice que el efecto es significativo estadísticamente.

Si  $F_{ratio} < F(5\%)$  se acepta la hipótesis nula y se dice que el efecto no es estadísticamente significativo.

Otra forma de resolver el contraste es la siguiente:

Si  $p\text{-value} < 0,05$  se rechaza la hipótesis nula y se dice que el efecto es significativo estadísticamente.

Si  $p\text{-value} > 0,05$  se acepta la hipótesis nula y se dice que el efecto no es estadísticamente significativo.

### 3.5.2. Obtención de la tabla del ANOVA.

Esta técnica consiste en descomponer la variabilidad total observada en los datos en las partes asociadas a cada factor estudiado más una parte residual, con la que después se compararán las dos primeras.

En primer lugar se calculan las sumas de cuadrados (SC) tanto para los efectos simples como para las interacciones. Las correspondientes a los efectos simples y las interacciones dobles se han obtenido a partir del valor de su efecto, mediante la siguiente fórmula:

$$SC_A = \frac{N}{4} \text{efo}(A)^2$$

*Ecuación 1: Fórmula para la obtención de los efectos simples e interacciones dobles*

La SC total se ha obtenido como la suma de cuadrados de las desviaciones de cada dato respecto a la media general del experimento.

Y finalmente la SC residual se obtiene como la diferencia entre la SC total y la suma de las SC de todos los factores e interacciones considerados.

A continuación, hay que calcular los grados de libertad, primero se hayan los totales que se obtienen como el nº total de datos que se tienen menos 1, en este caso existen 16 datos, ya que como se ha dicho se han realizado 2 réplicas por cada uno de los 8 tratamientos.

Seguidamente los g.l. para cada factor, se calculan como el nº de niveles menos 1, como en este experimento todos los factores tienen 2 niveles, los g.l. asociados serán 1 para todos ellos.

Los correspondientes a las interacciones se obtienen como el producto de los asociados a los efectos involucrados, con lo cual se tiene que será para todos 1.

Y los g.l. residuales se obtienen como la diferencia entre los totales y la suma de los asociados a los efectos simples e interacciones, es decir, para el caso en cuestión serían  $15 - 6 = 9$ , lo que indica que este ANOVA es válido porque los g.l. residuales son bastante mayores que 4, por lo tanto los resultados obtenidos son representativos.

Ahora ya se pueden calcular los cuadrados medios (CM), los cuales se obtienen como el cociente entre la SC y los g.d.l. para cada caso. Y a partir de estos se calculan las Fratios respectivas para los efectos simples e interacciones como el cociente entre su Fratio y la Fratio residual.

Por último, con la ayuda de la función DISTR.F se puede obtener el p-value para cada caso, para ello habrá que introducirle como parámetros: la Fratio correspondiente, los g.l. del factor y los g.l. residuales.

Ahora ya se pueden calcular los cuadrados medios (CM), los cuales se obtienen como el cociente entre la SC y los g.d.l. para cada caso. Y a partir de estos se calculan las Fratios respectivas para los efectos simples e interacciones como el cociente entre su Fratio y la Fratio residual.

Por último, con la ayuda de la función DISTR.F se puede obtener el p-value para cada caso, para ello habrá que introducirle como parámetros: la Fratio correspondiente, los g.l. del factor y los g.l. residuales.

A continuación, se muestra la tabla del ANOVA del caso de estudio que se ha obtenido siguiendo el procedimiento que se acaba de explicar:

TABLA DEL ANOVA					
	SC	g.d.l.	CM	F-Ratio	p-value
<b>EFFECTOS SIMPLES</b>					
A	3,9006	1	3,9006	1877,3061	0,0000
B	1,2882	1	1,2882	620,0013	0,0000
C	0,0100	1	0,0100	4,8128	0,0559
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	0,1056	1	0,1056	50,8356	0,0001
AC	0,0100	1	0,0100	4,8128	0,0559
BC	0,0064	1	0,0064	3,0802	0,1131
<b>RESIDUAL</b>	0,0187	9	0,0021		
<b>TOTAL</b>	5,3396	15			

Tabla 8: Tabla del ANOVA manual.

Aquí se muestra la tabla del ANOVA obtenida mediante StatGraphics, donde se observa que los resultados obtenidos son aproximadamente los mismos que los calculados manualmente.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A: Intensidad (kA)	3,89076	1	3,89076	1767,97	0,0000
B: Tiempo de soldeo (seg)	1,28256	1	1,28256	582,80	0,0000
C: Presión (psi)	0,0105062	1	0,0105062	4,77	0,0567
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	0,107256	1	0,107256	48,74	0,0001
AC	0,00950625	1	0,00950625	4,32	0,0674
BC	0,00600625	1	0,00600625	2,73	0,1329
<b>RESIDUOS</b>	0,0198063	9	0,00220069		
<b>TOTAL (CORREGIDO)</b>	5,32639	15			

Tabla 9: Tabla del ANOVA StatGraphics.

### 3.5.3. Análisis de resultados del ANOVA.

En este apartado se extraen una serie de conclusiones a partir de los resultados obtenidos del análisis de la varianza realizado. A la vista de la tabla del ANOVA se deduce cuáles son aquellos efectos simples e interacciones significativos.

Para ello hay dos opciones, como se ha descrito cuando se ha expuesto el criterio de decisión adoptado. Se observa como los efectos simples A y B y la interacción AB son muy significativos, ya que su p-value es considerablemente menor de 0,05.

Esto significa que los factores intensidad y tiempo de soldeo son significativos respecto a la resistencia a tracción de la tuerca, y la interacción de ambos factores también ha resultado significativa.

Pero para poder saber el orden de significación de estos tres efectos, habrá que fijarse en las Fratio, y cuando mayor sea dicho valor más significativo será dicho efecto. Para este caso se tiene que:  $1877,3061 > 620,0013 > 50,8356$ .

Con lo cual el orden de significación de mayor a menor es el siguiente: A – B – AB.

En apartados siguientes se determinará a qué nivel deben situarse dichos factores para tratar de minimizar el espesor de salida.

Por otra parte, se tiene que el efecto C no ha resultado significativo, lo que significa que la variante elegida del factor presión no afectará a la resistencia a tracción de la tuerca, por lo tanto el criterio empleado para decidir qué presión aplicar será otro.

Y tampoco han resultado significativas las interacciones AC y BC, con lo cual no serán estudiadas en más detalle.

Con la opción de DOE de StatGraphics se ha obtenido el gráfico de probabilidad normal o plot de Daniel, en él se observa como fuera de la recta normal se encuentran los efectos que se acaban de comentar que son significativos, por orden: A, B y AB.

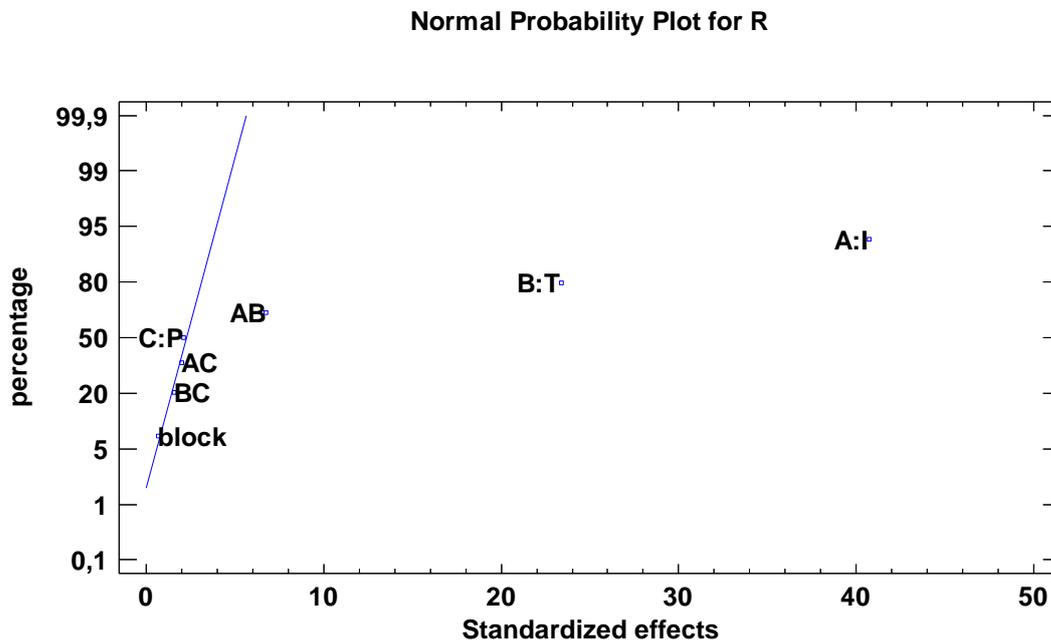


Figura 26: Gráfica de probabilidad normal.

Main Effects Plot for R

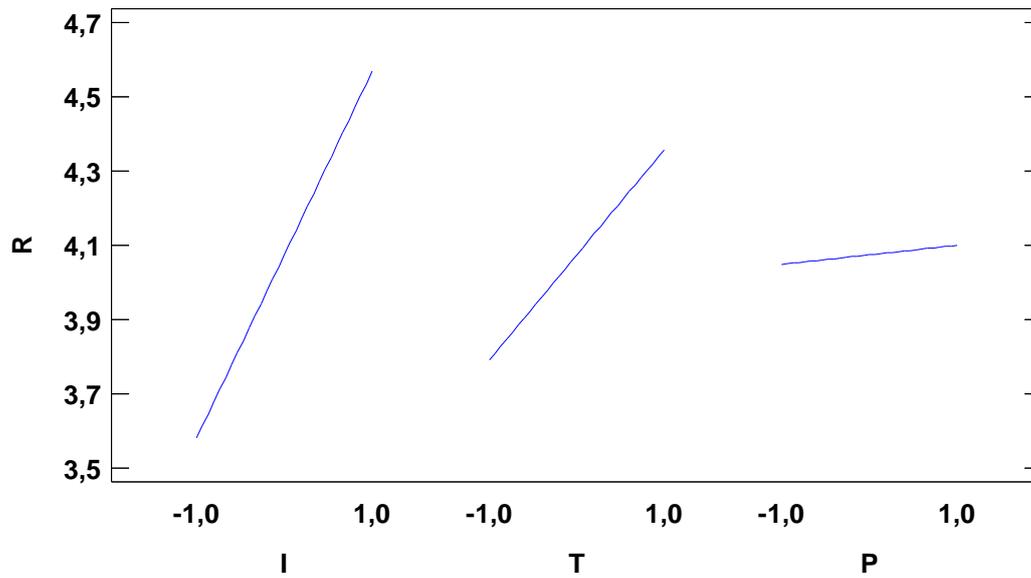


Figura 27: Gráfico de Daniel para los efectos principales

Interaction Plot for R

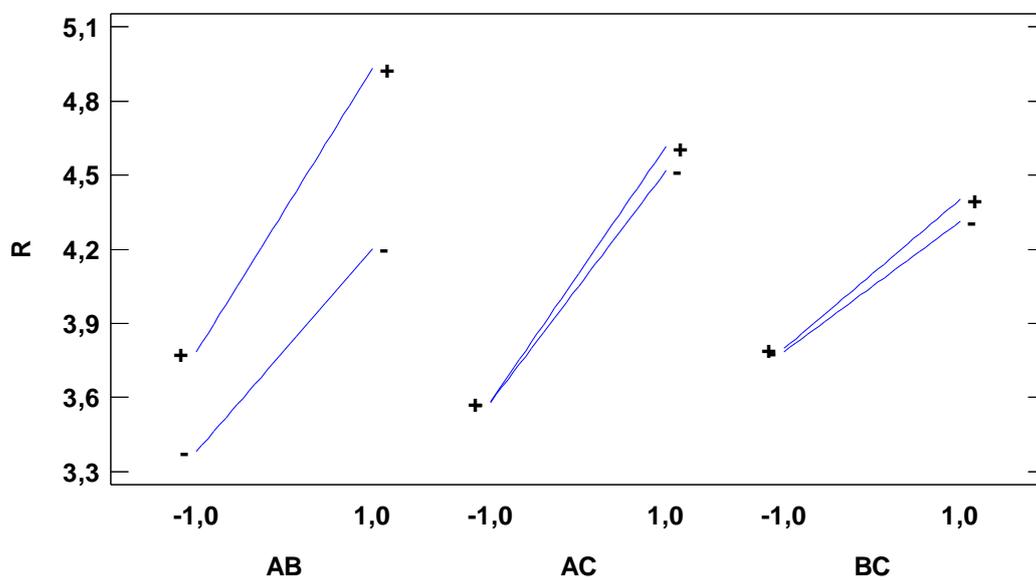


Figura 28: Gráfico de Daniel para las interacciones

### 3.5.4. Intervalos LSD.

Como se ha podido ver en el ANOVA analizado existen diferencias entre las medias de los factores A y B, pero únicamente con esta información no se puede saber a qué niveles hay que poner cada uno de estos factores. Para resolver dicha problemática se han realizado los intervalos LSD, tanto con la herramienta Excel como con StatGraphics, para cada uno de los 3 factores que tiene el ensayo.

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos mediante Excel y la tabla empleada para su obtención, junto con el valor de la t de Student para  $\alpha/2$ , con  $\alpha = 0,05$  y 9 grados de libertad y el valor de la raíz para calcular estos intervalos mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Media del tratamiento } i \pm 0,707 \times t_9 \times \sqrt{\frac{CM \text{ residual}}{n_i}}$$

*Ecuación 2: Fórmula para la obtención de los intervalos LSD*

NIVEL	MEDIA	VALOR INFERIOR	VALOR SUPERIOR
A			
-1	3,58	3,54355134	3,61644866
1	4,5675	4,53105134	4,60394866
B			
-1	3,79	3,75355134	3,82644866
1	4,3575	4,32105134	4,39394866
C			
-1	4,04875	4,01230134	4,08519866
1	4,09875	4,06230134	4,13519866

t( $\alpha/2$ ) con 9 g.d.l.	2,262
------------------------------	-------

Valor raíz	0,022791324
------------	-------------

*Tabla 10: Valores medios y límites manualmente.*

Para cada factor se pueden ver los valores para sus dos niveles, marcándose en azul los extremos para determinar si se solapan y por tanto no existen diferencias entre las medias poblacionales. Se puede ver que para los factores A y B, tal y como se esperaba al haber realizado el ANOVA, los intervalos no se solapan y por tanto se puede afirmar que hay diferencias poblacionales, mientras que para el factor C se puede ver que se solapan y por tanto no hay diferencias poblacionales entre los dos niveles.

Seguidamente, se muestra la tabla obtenida mediante StatGraphics para la realización de los intervalos LSD:

<i>Nivel</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Error Est.</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
MEDIA GLOBAL	16	4,07437			
Intensidad (kA)					
8	8	3,58125	0,0165857	3,54373	3,61877
10	8	4,5675	0,0165857	4,52998	4,60502
Tiempo de soldeo (seg)					
0,5	8	3,79125	0,0165857	3,75373	3,82877
1	8	4,3575	0,0165857	4,31998	4,39502
Presión (psi)					
100	8	4,04875	0,0165857	4,01123	4,08627
110	8	4,1	0,0165857	4,06248	4,13752
Intensidad (kA) por Tiempo de soldeo (seg)					
8 y 0,5	4	3,38	0,0234558	3,32694	3,43306
8 y 1	4	3,7825	0,0234558	3,72944	3,83556
10 y 0,5	4	4,2025	0,0234558	4,14944	4,25556
10 y 1	4	4,9325	0,0234558	4,87944	4,98556
Intensidad (kA) por Presión (psi)					
8 y 100	4	3,58	0,0234558	3,52694	3,63306
8 y 110	4	3,5825	0,0234558	3,52944	3,63556
10 y 100	4	4,5175	0,0234558	4,46444	4,57056
10 y 110	4	4,6175	0,0234558	4,56444	4,67056
Tiempo de soldeo (seg) por Presión (psi)					
0,5 y 100	4	3,785	0,0234558	3,73194	3,83806
0,5 y 110	4	3,7975	0,0234558	3,74444	3,85056
1 y 100	4	4,3125	0,0234558	4,25944	4,36556
1 y 110	4	4,4025	0,0234558	4,34944	4,45556

Figura 29: Valores medios y límites con StatGraphics.

Esto se puede ver más claramente en los siguientes gráficos, donde se ha representado en el eje vertical el espesor de salida en mm y en el eje horizontal los dos niveles para cada factor.

Medias y 95,0% de Fisher LSD

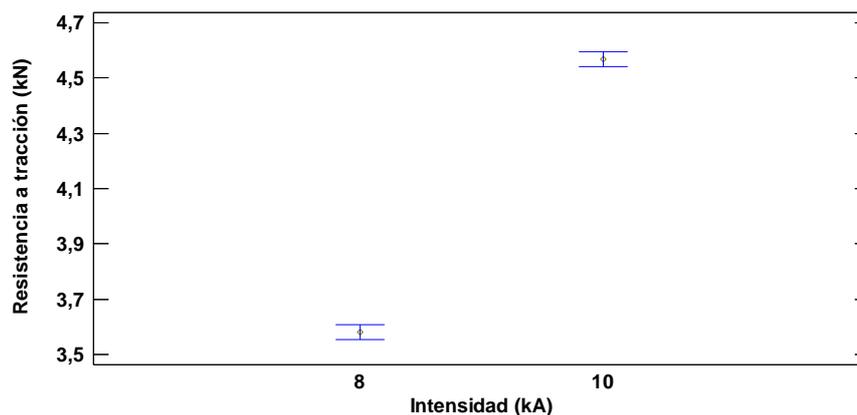


Figura 30: Intervalos LSD para el factor intensidad con StatGraphics.

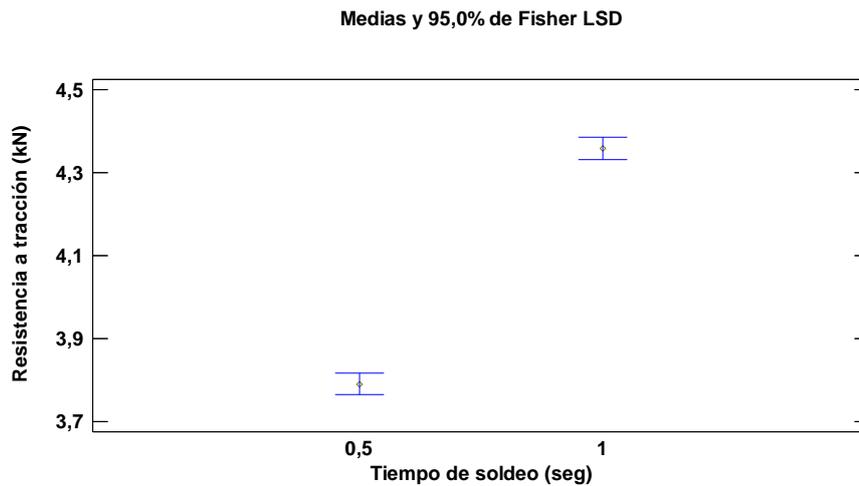


Figura 31: Intervalos LSD para el factor tiempo de soldeo con StatGraphics.

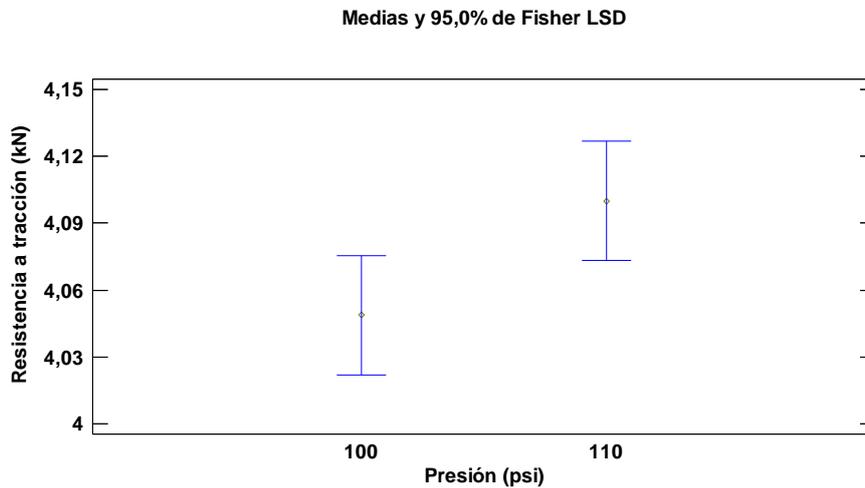


Figura 32: Intervalos LSD para el factor presión con StatGraphics.

### 3.5.5. Interacciones significativas.

Una vez analizados los efectos por separado, ahora se procede a analizar la única interacción que ha salido significativa en el ANOVA, que es la interacción AB. Igual que para los intervalos LSD se ha realizado primero mediante Excel y después con la herramienta StatGraphics.

Mediante Excel, se ha realizado una tabla para los valores de las interacciones y así poder realizar un gráfico para obtener información de forma más visual. Esto se muestra a continuación.

INTERACCIÓN SIGNIFICATIVA AB		
A / B	-1	1
-1	3,3775	3,7825
1	4,2025	4,9325

Tabla 11: Valores medios para la interacción AB.

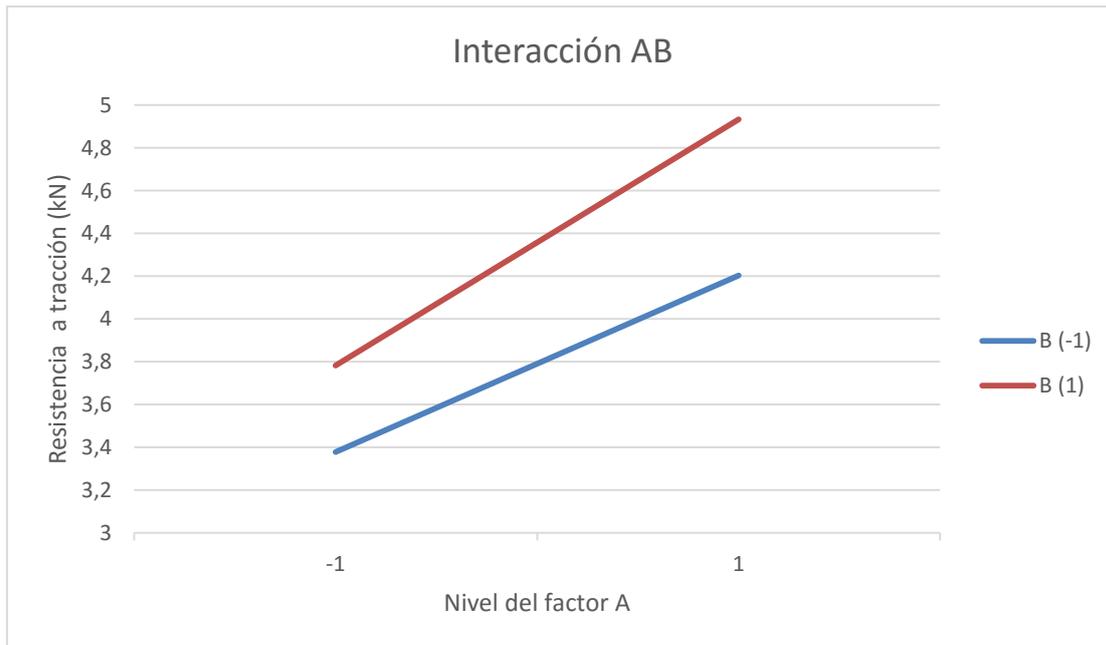


Figura 33: Interacción AB manualmente.

Mediante la herramienta StatGraphics se ha obtenido el siguiente gráfico para la interacción significativa AB.

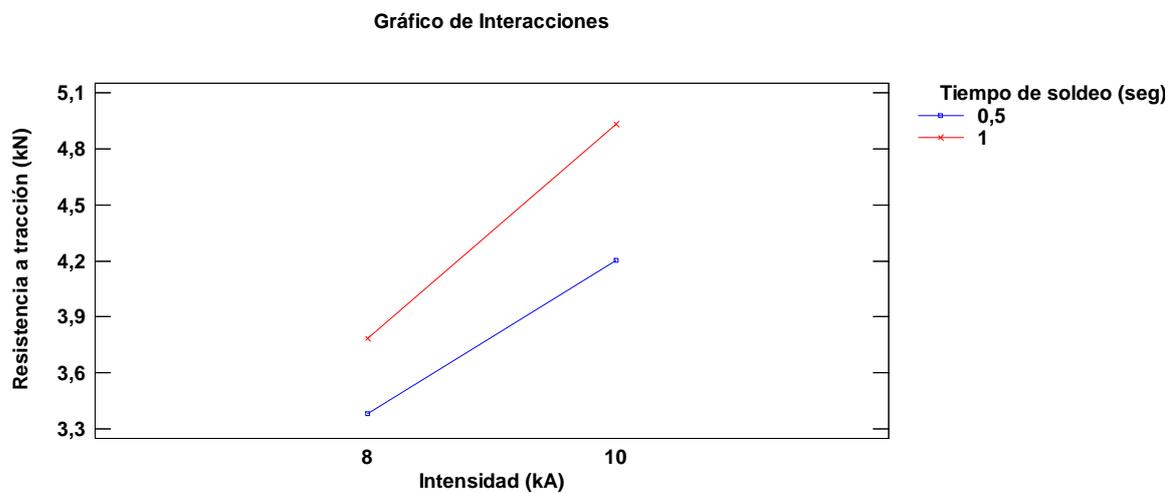


Figura 34: Interacción AB StatGraphics.

Tal y como se había obtenido en el ANOVA se puede ver claramente que hay interacción, ya que las rectas que se obtienen no son paralelas y además se puede ver que con el factor A a su nivel alto y el factor B a su nivel alto también, se obtiene la resistencia a tracción más elevada posible.

### 3.5.6. Condiciones operativas óptimas.

Una vez se ha analizado cada efecto por separado y la interacción AB, que es la única significativa, se procede a determinar las condiciones operativas óptimas para el proceso.

Para ello, el primer factor a fijar es el A, ya que es el que mayor valor de F-Ratio presenta. Este factor se fija a su nivel alto, que es donde se obtienen valores de resistencia a tracción más elevados. Y el segundo factor a fijar es el B. Este factor se fija también a su nivel alto.

A continuación, la interacción AB viene fijada por los niveles de los factores A y B y por tanto, queda determinado que ambos factores estarán a su nivel alto. Como era de esperar, en la interacción AB con ambos factores a nivel se obtienen los mayores valores de resistencia a tracción.

Y finalmente, el factor C no es significativo ni está presente en ninguna interacción significativa, por tanto se puede fijar a cualquiera de los dos niveles, siendo otro el criterio empleado para decidir qué presión aplicar.

### 3.5.7. Media prevista para la resistencia a tracción.

Una vez determinadas las condiciones operativas óptimas se procede a calcular la media prevista para la resistencia a tracción de la tuerca. Para lo cual se tiene en cuenta la media general, los efectos de A y B a nivel alto y el efecto de la interacción AB a nivel alto también. Los valores, tanto de la media general como de los efectos, se muestran en la siguiente tabla.

Con esto, ya se puede calcular la media prevista, que vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\text{Media prevista} = \text{Media General} + \text{Efecto A} + \text{Efecto B} + \text{Efecto AB}$$

Sustituyendo valores, el valor de la media prevista de la resistencia a la tracción es de 4,9325 kN.

Media General (kN)	4,0738
Efecto A (1)	0,4938
Efecto B (1)	0,2838
Efecto AB (1)	0,0812

<b>Media prevista (kN)</b>	<b>4,9325</b>
----------------------------	---------------

*Tabla 12: Cálculo de la media prevista*

Con la opción de DOE de StatGraphics se han obtenido también las condiciones operativas óptimas y la media prevista para el espesor de salida para dichas condiciones.

### Optimize Response

Goal: maximice Resistencia a la tracción

Optimum value = 4,933

<i>Factor</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	<i>Optimum</i>
Intensidad	-1,0	1,0	1,0
Tiempo	-1,0	1,0	1,0
Presión	-1,0	1,0	-1,0

Tabla 13. Condiciones operativas óptimas y valor medio esperado.

Se observa como las condiciones operativas óptimas sí que coinciden con las que habíamos obtenido nosotros manualmente.

### 3.5.8. Intervalo de confianza para la media prevista.

Finalmente se procede a calcular un intervalo de confianza con  $\alpha = 0,05$  y la siguiente expresión:

$$IC_{media} = \text{media prevista} \pm t_{9} \times \sqrt{\frac{CM_{residual} \times (1 + g.d.l. \text{predicción})}{N}}$$

Ecuación 3: Fórmula para el cálculo de los intervalos de confianza

Los valores que se emplean para los cálculos son los siguientes:

Media prevista (mm)	4,9325
$t(\alpha/2)$ con 9 g.d.l.	2,262
g.d.l. predicción	6
N	16
Valor raíz	0,0302

Tabla 14: Valores empleados en el cálculo del IC

Obteniéndose con estos valores el siguiente intervalo de confianza:

ICmin (mm)	4,8643
ICmax (mm)	5,0007

Tabla 15: Valores extremos del IC

Expresado de forma matemática sería:  $IC_{media} = [4,8643; 5,0007]$

### 3.5.9. Análisis de los residuos.

En este apartado se van a obtener los residuos de los datos del experimento, que se obtienen como la diferencia entre cada dato y la media de su tratamiento.

Esto va a permitir detectar datos anómalos o pautas de variabilidad sospechosas, lo cual ayudará a validar aún más el experimento, ya que una observación anómala puede invalidar por completo todas las conclusiones del ANOVA. Para una mayor visualización de estos, se han representado los residuos de cada factor en un gráfico:



*Figura 35: Residuos del factor intensidad*



*Figura 36: Residuos del factor tiempo de soldeo*

Gráfico de Residuos para Resistencia a tracción (kN)

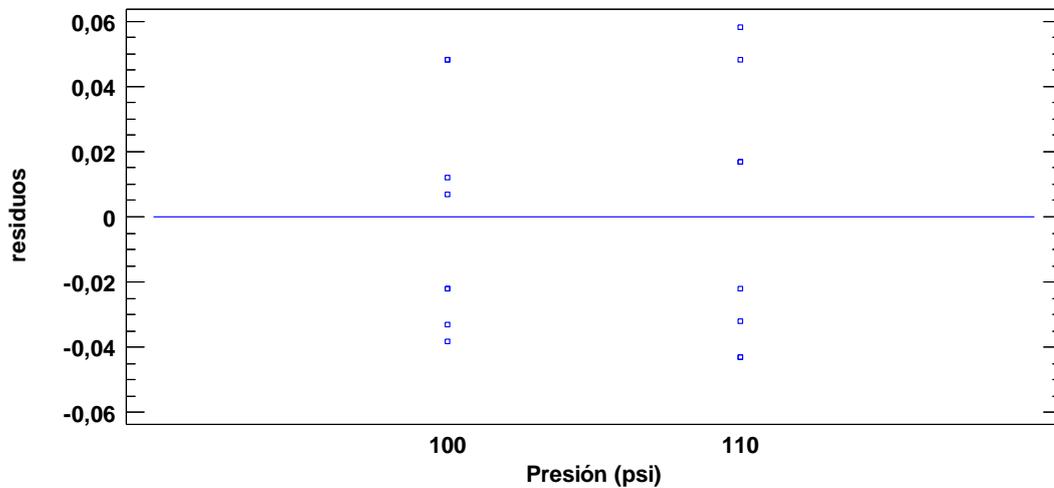


Figura 37: Residuos del factor presión

Como se observa en las tres gráficas los residuos se encuentran alrededor del cero y están distribuidos más o menos de manera uniforme, es decir, no se observa ningún patrón de comportamiento (los experimentos son independientes), con lo cual se puede asumir que el análisis ANOVA realizado es válido.

### 3.6. CONCLUSIONES.

Tras la realización del diseño de experimentos expuesto se ha llegado a una serie de conclusiones derivadas del análisis de los resultados obtenidos.

Principalmente, destacar que de los 3 factores considerados en el estudio de la resistencia a tracción en el proceso de soldadura de tuercas el principal factor que se debe controlar durante el proceso es la intensidad aplicada.

La razón técnica de este hecho explica que si el calentamiento al circular la intensidad es insuficiente el metal será más difícil de trabajar debido a que posee una menor ductilidad propiedad que se le confiere al calentarlo a una temperatura adecuada, con lo cual será más complicado que se produzca la unión entre ambas partes.

Aunque el factor tiempo de soldeo adquiere también bastante relevancia ya que su influencia es muy significativa, por lo tanto se puede decir que para conseguir un aumento de la resistencia a tracción aceptable debe ocurrir que el conjunto de intensidad y tiempo de soldadura sea el adecuado.

Destacar también que en el análisis realizado no se han tenido en cuenta una serie de factores que influyen también en el proceso, como serían: condiciones de la materia prima, temperatura ambiente, máquina empleada, geometría del útil, entre otros.

Los efectos provocados por todos estos factores no controlados se incluyen en la parte residual del experimento, con lo cual no se puede estudiar su relevancia. Pero se entiende que no se han incluido en el experimento porque basándose en los conocimientos técnicos se ha supuesto que su influencia no es determinante.

## 4. ESTUDIOS DE CAPACIDAD SOBRE CARACTERÍSTICAS SIGNIFICATIVAS.

### 4.1. INTRODUCCIÓN.

En el sector de la automoción es un requisito general la realización de estudios de capacidad sobre aquellas características más relevantes del producto a fabricar. Dicho requisito viene englobado dentro de lo que se conoce como PPAP.

El PPAP por sus siglas Production Part Approval Process, es una de las herramientas también conocidas como Core Tools y se utiliza en la cadena de suministro para establecer la confianza de los componentes y procesos de producción de los proveedores principalmente del sector automotriz. Esta es un requerimiento de la especificación técnica ISO/TS 16949, la cual ayuda a incorporar el enfoque de procesos orientado al cliente.

#### 4.1.1. PPAP (Production Part Approval Process).

El Proceso de Aprobación para la Producción de Partes define los requerimientos generales para la aprobación de producción de partes. El propósito del PPAP es determinar si todos los registros de requerimientos de diseños de ingeniería y especificaciones del cliente son entendidos apropiadamente por la organización y que el proceso de manufactura tiene el potencial para fabricar productos cumpliendo de manera consistente estos requerimientos durante una serie de fabricación con la tasa de producción programada.

Para la producción de partes, el producto para PPAP debe ser tomado una serie de producción significativa. Dicha serie deberá ser de una hora a ocho horas de producción, y con la calidad de producción especificada hasta totalizar un mínimo de 300 partes consecutivas, a menos que se especifique otra cosa por el representante autorizado del cliente.

Los requerimientos generales del PPAP se pueden resumir en una serie de puntos, que son:

1. Registros de diseño
2. Documentos de cambios autorizados de ingeniería
3. Aprobación de ingeniería del cliente
4. Análisis del Modo y Efecto de Falla de Diseño (FMEA de Diseño)
5. Diagrama (s) de flujo del proceso
6. Análisis del Modo y Efecto de Falla de Proceso (FMEA de Proceso)
7. Plan de Control
8. Estudios del Análisis de Sistemas de Medición
9. Resultados dimensionales
10. Registros de pruebas Materiales / Funcionamiento o Desempeño
11. Estudios iniciales de procesos
12. Documentación de Laboratorios calificados
13. Reporte de aprobación de apariencia
14. Muestra de partes de producción
15. Muestras maestras
16. Ayudas visuales de inspección

17. Requerimientos específicos de clientes
18. Garantía de presentación de partes (PSW)

Dependiendo del producto que se desarrolle en la empresa en estudio hay ciertos puntos del PPAP que no aplican en ciertos casos. Para determinar con certeza cuales aspectos deben estar incluidos, se deben consultar los registros de diseño o especificaciones relevantes de ingeniería, siendo también muy importante una buena comunicación y retroalimentación con el representante autorizado del cliente, llamado STA (Supplier Technical Assistance).

Al cumplir con todos los requerimientos del PPAP, la Organización deberá completar la Garantía de la presentación de la Parte (PSW por sus siglas en inglés). Un PSW separado deberá ser completado para cada número de parte del cliente.

DAIMLERCHRYSLER  		Part Submission Warrant	
Part Name _____		Cust. Part Number _____	
Shown on Drawing No. _____		Org. Part Number _____	
Engineering Change Level _____		Dated _____	
Additional Engineering Changes _____		Dated _____	
Safety and/or Government Regulation <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No		Purchase Order No. _____ Weight (kg) _____	
Checking Aid No. _____		Checking Aid Engineering Change Level _____ Dated _____	
<b>ORGANIZATION MANUFACTURING INFORMATION</b>		<b>CUSTOMER SUBMITTAL INFORMATION</b>	
Organization Name & Supplier/Vendor Code _____		Customer Name/Division _____	
Street Address _____		Buyer/Buyer Code _____	
City _____	Region _____	Postal Code _____	Country _____
Application _____			
<b>MATERIALS REPORTING</b>			
Has customer-required Substances of Concern information been reported? <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> n/a			
Submitted by IMDS or other customer format: _____			
Are polymeric parts identified with appropriate ISO marking codes? <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> n/a			
<b>REASON FOR SUBMISSION (Check at least one)</b>			
<input type="checkbox"/> Initial Submission		<input type="checkbox"/> Change to Optional Construction or Material	
<input type="checkbox"/> Engineering Change(s)		<input type="checkbox"/> Supplier or Material Source Change	
<input type="checkbox"/> Tooling: Transfer, Replacement, Refurbishment, or additional		<input type="checkbox"/> Change in Part Processing	
<input type="checkbox"/> Correction of Discrepancy		<input type="checkbox"/> Parts Produced at Additional Location	
<input type="checkbox"/> Tooling Inactive > than 1 year		<input type="checkbox"/> Other – please specify below _____	
<b>REQUESTED SUBMISSION LEVEL (Check one)</b>			
<input type="checkbox"/> Level 1 – Warrant only (and for designated appearance items, an Appearance Approval Report) submitted to customer.			
<input type="checkbox"/> Level 2 – Warrant with product samples and limited supporting data submitted to customer.			
<input type="checkbox"/> Level 3 – Warrant with product samples and complete supporting data submitted to customer.			
<input type="checkbox"/> Level 4 – Warrant and other requirements as defined by customer.			
<input type="checkbox"/> Level 5 – Warrant with product samples and complete supporting data reviewed at organization's manufacturing location.			
<b>SUBMISSION RESULTS</b>			
The results for <input type="checkbox"/> dimensional measurements <input type="checkbox"/> material and functional tests <input type="checkbox"/> appearance criteria <input type="checkbox"/> statistical process package			
These results meet all design record requirements: <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> NO (if "NO" – Explanation Required)			
Mold / Cavity / Production Process _____			
<b>DECLARATION</b>			
I affirm that the samples represented by this warrant are representative of our parts which were made by a process that meets all Production Part Approval Process Manual 4th Edition Requirements. I further affirm that these samples were produced at the production rate of _____ / _____ hours. I also certify that documented evidence of such compliance is on file and available for review. I have noted any deviations from this declaration below.			
EXPLANATION/COMMENTS: _____			
Is each Customer Tool properly tagged and numbered? <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> n/a			
Organization Authorized Signature _____		Date _____	
Print Name _____		Phone No. _____ FAX No. _____	
Title _____		E-mail _____	
FOR CUSTOMER USE ONLY (IF APPLICABLE)			
PPAP Warrant Disposition: <input type="checkbox"/> Approved <input type="checkbox"/> Rejected <input type="checkbox"/> Other _____			
Customer Signature _____		Date _____	
Print Name _____		Customer Tracking Number (optional) _____	

March 2010 CFG-1001

Figura 38: Ejemplo de plantilla de PSW

### 4.1.2. Estudio inicial del proceso.

Este apartado del TFM se va a centrar en el punto número 11 del listado mostrado anteriormente, es decir, en los estudios iniciales de los procesos.

En el estudio inicial de un proceso deberá determinarse el nivel de capacidad o desempeño inicial del proceso para ser aceptable previo a la presentación de todas las características especiales designadas por el cliente o la empresa.

El propósito de este requerimiento es determinar si el proceso de producción es capaz de fabricar productos que cumplan con los requerimientos del cliente. El estudio del proceso inicial está enfocado a datos por variables no a datos por atributos. Errores de ensamble, fallas en pruebas, defectos superficiales son ejemplos de datos de atributos, lo cual es importante que se entienda, pero no está cubierto en este estudio inicial.

Los estudios iniciales de proceso son a corto plazo y no predecirán los efectos del tiempo y variación en personal, materiales, métodos, equipos, sistemas de medición y medio ambiente. Para realizar el seguimiento a largo plazo se emplean las gráficas de control, normalmente la gráfica de control X-R.

## 4.2. ÍNDICES DE CALIDAD.

Un proceso productivo tiene habitualmente dos tipos de variabilidad:

**-Variabilidad inherente del proceso.** Aquella componente de la variabilidad debida a causas comunes solamente y representa la variabilidad que puede estar presente entre elementos fabricados en intervalos próximos (variabilidad en el corto plazo). Algunos autores denominan a este componente de la variabilidad como “ruido blanco”.

**-Variabilidad total del proceso.** Es la variación resultante de todas las causas de variabilidad (causas comunes y especiales), en la que se tienen en cuenta factores como el desgaste, cambios de lote de materia prima, etc. Representa la variabilidad que puede afectar al conjunto de los elementos fabricados recibidos por el cliente (variabilidad en el largo plazo). Algunos autores denominan a este componente de la variabilidad como “ruido negro”.

Los estudios iniciales de proceso deben ser resumidos con índices de capacidad o desempeño, siendo los más habituales los siguientes:

**Cp y Cpk.** Índice de capacidad para un proceso estable, donde el estimado de sigma está basado en variación dentro de subgrupos.

**Pp y Ppk.** Índice de desempeño, donde el estimado de sigma está basado en la variación total. Se trata de un indicador del desempeño del proceso basado en la variación del proceso con toda la serie de datos. A diferencia del Cpk, el Ppk no está limitado a la variación dentro de subgrupos.

Cp y Cpk se calculan con la variabilidad inherente del proceso (variabilidad en el corto plazo). En este caso se considera la variabilidad entre los elementos de la misma muestra.

Pp y Ppk se calculan con la variabilidad total del proceso (variabilidad en el largo plazo). En este caso se tiene en cuenta la variabilidad introducida por la deriva del centrado del proceso y la inestabilidad del mismo.

Las ecuaciones de los índices nombrados para datos que siguen una distribución normal son:

$$C_p = \frac{T_s - T_i}{6\sigma_{CP}}$$

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{T_s - \mu}{3\sigma_{CP}}, \frac{\mu - T_i}{3\sigma_{CP}} \right\}$$

$$P_p = \frac{T_s - T_i}{6\sigma_{LP}}$$

$$P_{pk} = \min \left\{ \frac{T_s - \mu}{3\sigma_{LP}}, \frac{\mu - T_i}{3\sigma_{LP}} \right\}$$

*Ecuación 4: Fórmulas para el cálculo de los índices de calidad para una distribución normal*

Siendo:

Ts: especificación superior

Ti: especificación inferior

$\mu$ : media de la muestra

$\sigma_{cp}$ : desviación estándar en el corto plazo

$\sigma_{lp}$ : desviación estándar en el largo plazo

El Cp representa como de capaz es un proceso teniendo solamente en cuenta la repetibilidad de los datos sin importar que tan lejos esté la media de esos datos respecto al punto medio de la tolerancia. Mientras que el Cpk además de la repetibilidad considera también la media de los datos, la cual debe estar lo suficientemente cerca del punto medio de la tolerancia a fin de que ningún dato se salga de la misma. Análogamente se distingue entre Pp y Ppk.

Como consecuencia de todo lo anterior, si un proceso normal está en control estadístico, la característica de calidad del 99,73% de los elementos fabricados estará comprendida entre  $\mu - 3\sigma$  y  $\mu + 3\sigma$ . El parámetro  $\mu$  depende del punto en el que centremos el proceso. Sin embargo  $\sigma$  depende del número y variabilidad de las causas comunes del proceso y por lo tanto es intrínseca a él. Con lo cual se tiene que  $6\sigma$  es la variabilidad natural del proceso.

Es esencial resaltar que la variabilidad natural del proceso ( $6\sigma$ ) es intrínseca a él e independiente de las tolerancias que se asignen. Con lo cual si  $6\sigma$  es menor que el intervalo de las tolerancias a cumplir, necesariamente algunos productos fabricados estarán fuera de tolerancia y serán no conformes.

De manera general, se verifica que  $C_p > P_p$  y  $C_{pk} > P_{pk}$ .

El propósito del estudio del proceso inicial es comprender la variación del proceso, no sólo alcanzar un valor específico del índice.

#### 4.2.1. Criterio de aceptación.

Los criterios de aceptación para evaluar los resultados del estudio inicial del proceso para procesos que sean estables son los siguientes:

<u>Resultados</u>	<u>Interpretación</u>
Índice > 1.67	El proceso cumple actualmente con los criterios de aceptación
1.33 <=índice<=1.67	El proceso podría aceptarse. Contactar al representante autorizado del cliente para una revisión del estudio de resultados.
Índice < 1.33	El proceso no cumple actualmente el criterio de aceptación. Contactar al representante autorizado del cliente para una revisión del estudio de resultados.

#### 4.3. ANÁLISIS DE LOS INFORMES DE CAPACIDAD.

Un estudio de capacidad sobre un determinado proceso tiene por objeto conocer:

- Distribución estadística que lo describe (normal o no normal).
- El patrón de variabilidad del proceso y principales factores relacionados con la variabilidad.
- Comprender los fenómenos físicos y tecnológicos importantes para el proceso.

Se realiza tomando muestras de la producción, a partir de aquí existen muchas diferencias en cuanto al modo de tomar las muestras. En particular es frecuente que se requiera que el proceso esté en control estadístico, este requisito es lógico cuando se pretende calcular los índices de variabilidad a corto plazo.

En la empresa en estudio los informes de capacidad se realizan mediante el programa QS-STAT, siendo este un software de uso exclusivo del grupo Kemmerich.

Por lo tanto, el objetivo de este apartado es analizar cómo este software obtiene los índices de calidad a partir de los datos introducidos, independientemente de la distribución estadística a la que se adapte la característica en análisis. El método empleado para dicho cálculo es el de los percentiles, debido a que a priori no se sabe si la característica estudiada va a seguir una distribución normal o no, y esta técnica para todos los casos posibles.

Como se ha dicho en la introducción para la presentación del PPAP deberá determinarse el nivel de capacidad inicial del proceso de aquellas características especiales designadas por el cliente o la empresa.

Más adelante, se van explicar paso a paso mediante ejemplos los informes de capacidad de 3 de las características significativas más habituales para la tipología de piezas que se producen en la empresa, estas son: el par de una tuerca soldada, la tracción de una tuerca soldada y las dimensiones de la superficie mating o de contacto de la pieza estampada.

Para ello se ha seleccionado una pieza que según el plano de cliente posee dichas 3 características significativas. A continuación se presenta toda la información necesaria de la pieza seleccionada como ejemplo:

<b>Datos Pieza</b>	
Cliente: XXX	
Part Number	6F2.805.327
Denominación:	CONJUNTO SOPORTE LIMPIA RL
Matriz	8852
Proyecto	4-0149112
Dimensiones piezas (WxHxL) mm:	75,55x52,47x46,06
Peso:	52,07 g / pieza
Piezas / año:	19.568
Referencia Interna:	1.011826.01

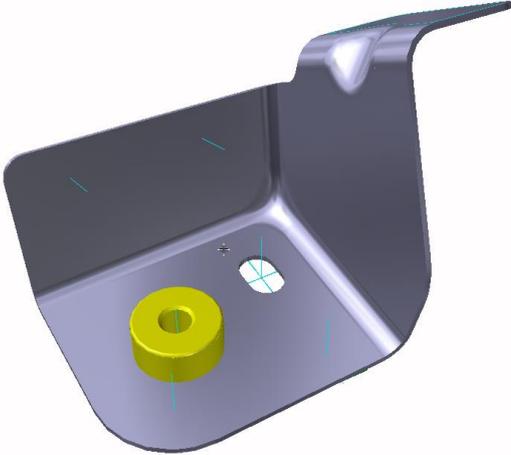
  


Figura 39: Información básica de la pieza seleccionada para el estudio

<b>Procesos</b>				
<b>Pasos de fabricación</b>				
Paso	Descripción	Nº Maq.	Ref. Interna	Pzs/h
AG1:	Stamping	V202/203	2.011552.01	2016
AG2:	Welding Nut	V310	2.011553.01	420
AG3:	Picking	FSI	1.011826.01	

Figura 40: Listado de procesos para la fabricación de la pieza en estudio

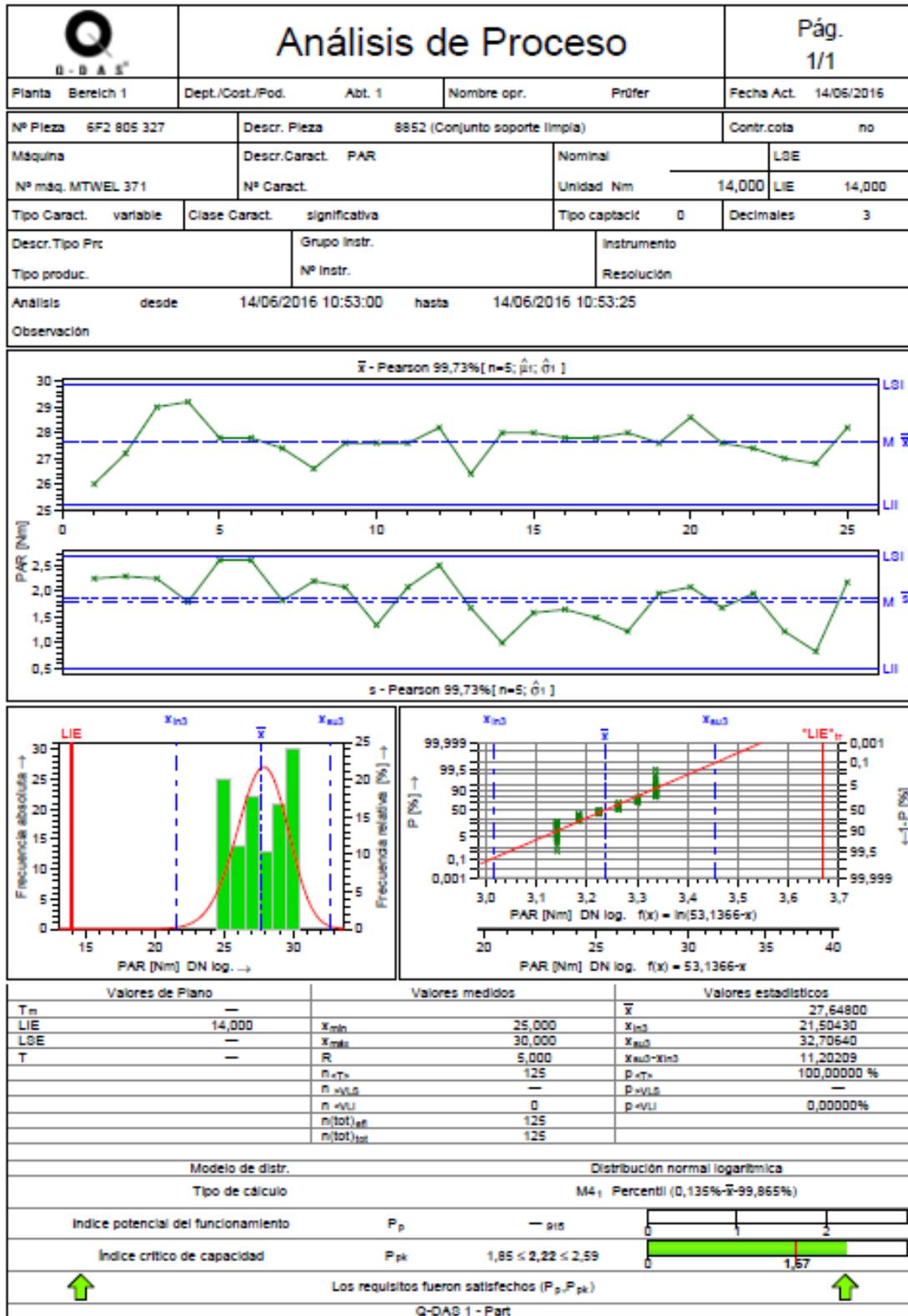


Figura 41: Ejemplo de informe obtenido tras realizar el estudio de capacidad de una característica significativa con QS-STAT

### 4.3.1. Diagnóstico del modelo de distribución.

Una de las funciones principales del software QS-STAT es asignar un modelo de probabilidad a un conjunto de datos, de forma que el modelo elegido pueda interpretarse como la población de la que proceden esos datos. A esta búsqueda de un modelo de probabilidad a partir de una muestra de datos se le denomina ajuste de una distribución. Para que un modelo de probabilidad pueda considerarse que es un modelo razonable para explicar los datos, han de realizarse pruebas estadísticas.

La realización de estas pruebas se denomina diagnóstico o crítica del modelo. Por tanto, se dice que un modelo tendrá un buen ajuste a nuestros datos si supera con éxito la diagnóstico. La forma habitual para hacer ajuste de modelos es la siguiente: a partir del análisis de la muestra se comparará su distribución con la de algún modelo conocido (Normal, Poisson, Exponencial, etc). Para evaluar si un modelo tiene un buen ajuste se debe realizar el test de la Chi-cuadrado.

El resultado del Test de la Chi-cuadrado se resume en los tres valores siguientes:

**$\chi^2$  (Chi-square)**, que representa el valor del estadístico calculado en el test. Este estadístico resume la discrepancia entre el histograma y la curva de la normal. Cuanto mayor sea este valor, peor es el ajuste de nuestros datos al modelo elegido.

$$\chi^2 = \sum \left[ \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e} \right]$$

*Ecuación 5: Fórmula para la obtención del valor chi-square*

Siendo:

$f_o$ : la frecuencia observada para un determinado valor de la muestra

$f_e$ : la frecuencia esperada para un determinado valor de la muestra

**D.f.** (degrees of freedom), son los grados de libertad de la distribución Chi-Cuadrado que se usa de referencia para valorar el ajuste de la distribución. Los grados de libertad se calculan como

$$\text{D.f.} = k - u - 1$$

*Ecuación 6: Fórmula para el cálculo de los grados de libertad*

Donde:

$k$ = número de intervalos

$u$ = número de parámetros del modelo escogido

**P-Value**, probabilidad que queda a la derecha el valor del estadístico calculado en la distribución de referencia. El área que queda a la derecha del valor chi-square obtenido en la distribución  $\chi^2_{k-u-1}$ .

La teoría estadística permite decir que cuanto peor es el ajuste del modelo elegido, el estadístico  $\chi^2$  dará un valor mayor, y que la referencia para evaluar cómo de grande es ese estadístico en cada caso es la distribución  $\chi^2_{k-u-1}$ .

Una forma sencilla de valorar la bondad del ajuste es calcular el área que queda a la derecha del valor del estadístico  $\chi^2$  en la distribución  $\chi^2_{k-u-1}$ . Esa área es precisamente el p-valor.

Si el p-valor es inferior a 0.05 se considera que el estadístico está ya en zonas de muy poca probabilidad, y por tanto concluimos que el ajuste no es satisfactorio. Por el contrario, si el p-valor es mayor de 0.05 consideramos que el ajuste es suficientemente bueno, y que el modelo elegido puede usarse como modelo para la población.

Existen otros tests de contraste de hipótesis alternativos al chi-cuadrado, entre ellos otro muy utilizado para estos casos es el test de Kolmogorov-Smirnov, cuyo resultado puede interpretarse también a través de sus p-valores de la misma forma que con el test de la chi-cuadrado.

### 4.3.2. Método de los percentiles.

Los índices de capacidad no se pueden estimar de la misma manera para los datos normales que para los no normales, porque sus distribuciones son diferentes. Por ejemplo, lo más probable es que las formas de las distribuciones no normales sean asimétricas y la cobertura de una distribución no normal no puede representarse mediante el número de desviaciones estándar (un parámetro exclusivo para la distribución normal).

Por lo tanto, si se pretenden calcular los índices de capacidad de un conjunto de datos que no siguen una distribución de tipo normal, se necesitan métodos equivalentes que sean análogos.

Un método reconocido para estimar la capacidad general de los datos no normales consiste en utilizar los percentiles 0.135 y 99.865 (que corresponden a la dispersión de 6 desviaciones estándar en el caso normal) y comparar los límites de especificación con estos percentiles, dicha técnica viene explicada ampliamente en la ISO 21747.

En primer lugar, se va a definir qué es un percentil, este es una medida de posición usada en estadística que indica, una vez ordenados los datos de la muestra de menor a mayor, el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de observaciones en el grupo de datos tomados.

Para estimar las probabilidades o los percentiles correspondientes a la capacidad general, necesitamos suficientes datos para estimar la función de distribución. Un subgrupo con pocas observaciones no funcionaría porque, con dos o más parámetros que estimar (dependiendo de la distribución), un número muy reducido de observaciones producirá estimaciones con un error grande y, por consiguiente, índices de capacidad inexactos.

A continuación se muestran las fórmulas a utilizar para el cálculo del Ppk mediante el método de los percentiles, existen 3 posibles casos, dependiendo de si la especificación es sólo inferior, sólo superior o en ambos sentidos.

$C_p \longleftrightarrow P_p = \frac{LES - LEI}{x_{0,99865} - x_{0,00135}}$	{ Sólo para especificaciones inferior y sup.
$P_{pl} = \frac{x_{0,5} - LEI}{x_{0,5} - x_{0,00135}}$	{ Sólo para especificación inferior
$P_{pu} = \frac{LES - x_{0,5}}{x_{0,99865} - x_{0,5}}$	{ Sólo para especificación superior
$C_{pk} \longleftrightarrow P_{pk} = \min(P_{pl}, P_{pu})$	{ Sólo para especificaciones inf. y sup.

*Ecuación 7: Fórmulas para el cálculo de los índices de calidad para una distribución NO normal mediante el método de los percentiles*

Siendo:

LES: especificación superior

LEI: especificación inferior

X 0,99865: percentil 99.865 %

X 0,00135: percentil 0,135 %

X 0,5: percentil 50 %

#### 4.3.3. Característica 1: Par.

En el apartado 2.5.2.1 de este TFM se ha descrito la importancia del ensayo de par como requisito para la validación de la soldadura de tuercas, ya que en la mayoría de casos se considera como característica significativa de la pieza. También se describe con detalle cómo se lleva a cabo dicho ensayo. Mientras que en el apartado 2.6 se especifica de donde se extrae la especificación mínima y/o máxima de par a tener en cuenta a la hora de calcular la capacidad del proceso.

Seguidamente se va a explicar cada una de las partes del informe generado por el QS-STAT. En primer lugar está el encabezado, donde aparece toda la información identificativa de la pieza y de la característica a controlar, destacando:

- **Nº pieza, o Part Number:** es el nombre asignado por el cliente, dependiendo del cliente sigue una codificación u otra. Pero dicha numeración siempre indica: el proyecto al que pertenece la pieza (modelo de coche donde será montada), parte de la carrocería o chasis donde será montada y nivel generacional de la pieza (va aumentado conforme se realizan modificaciones sobre la misma pieza).

- **Descripción de la pieza:** en este campo se indica el número de la matriz, que es como se conoce a la pieza entre los propios trabajadores de la planta.
- **Nº Máquina:** debe mostrarse el número de la máquina donde se han fabricado las piezas que han sido ensayadas, ya que se trata de un factor determinante.
- **Descripción característica:** incluye la característica de la pieza sobre la que se realiza el informe, cuanto más detalle se dé sobre la característica en estudio mejor, ya que ayudará a entender mejor el resto de información.
- **Especificaciones:** este campo es de obligatorio cumplimiento para que se puedan realizar a continuación los cálculos pertinentes. Está formado por la casilla de LSE (límite superior) y LIE (límite inferior), señalándose siempre cuáles son las unidades con las que se trabajan.

 Q - D A S®		<h2 style="margin: 0;">Análisis de Proceso</h2>				Pág. 1/1	
Planta	Bereich 1	Dept./Cost./Pod.	Abt. 1	Nombre opr.	Prüfer	Fecha Act.	14/06/2016
Nº Pieza	6F2 805 327	Descr. Pieza	8852 (Conjunto soporte limpia)			Contr.cota	no
Máquina		Descr.Caract.	PAR		Nominal	LSE	
Nº máq.	MTWEL 371	Nº Caract.		Unidad	Nm	LIE	14,000
Tipo Caract.	variable	Clase Caract.	significativa		Tipo captació	0	Decimales
							3
Descr.Tipo Prc		Grupo Instr.	Instrumento: llave dinamométrica				
Tipo produc.		Nº Instr.	Resolución				
Análisis	desde	14/06/2016 10:53:00	hasta	14/06/2016 10:59:25			
Observación							

*Figura 42: Encabezado del informe sobre el estudio de capacidad del PAR*

La siguiente parte del informe consiste en 2 gráficos de líneas donde se representa la tendencia que sigue el conjunto de datos medidos. Para la realización del estudio se ha ensayado y medido una muestra de 50 individuos. Estos 50 datos se han agrupado en subgrupos de 5 para representarse en los gráficos, por dicho motivo el eje X llega hasta 10 puntos.

En el gráfico superior se puede observar cómo evoluciona la media del par, mientras que en el gráfico inferior se muestra la evolución de su desviación, en los dos el eje Y representa el par, en la unidad de Nm.

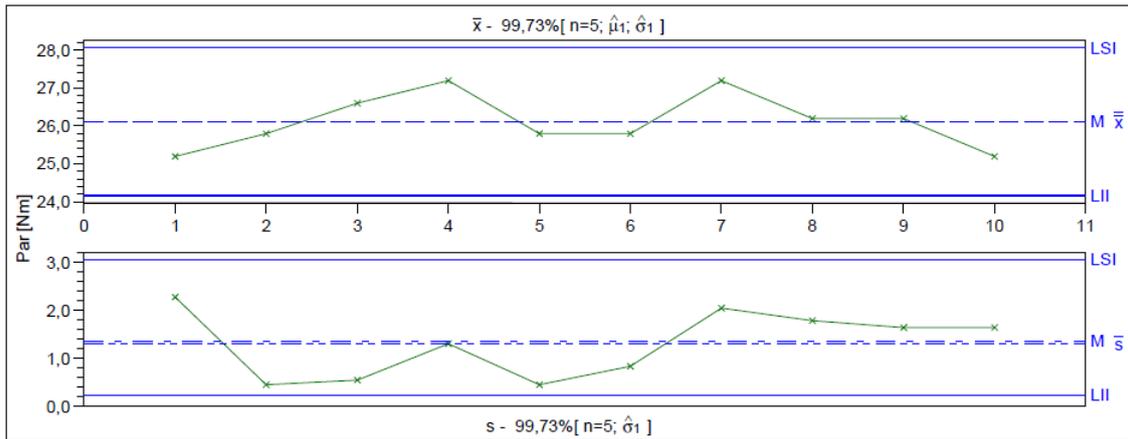


Figura 43: Gráfico representativo de la evolución de la media y la dispersión del PAR para la muestra seleccionada

El siguiente gráfico que aparece en el informe es un histograma de frecuencia, donde se ve reflejada la distribución que toma la muestra de datos, en el eje Y de la izquierda respecto a una escala absoluta y en el derecho respecto a una escala relativa.

Por la forma que toma la distribución el software toma como hipótesis que se trata de una normal, ya que la línea suavizada asociada al gráfico de barras tiene forma de campana de Gauss, y así lo valida el test chi-cuadrado realizado según el procedimiento detallado en el apartado anterior 4.3.1. Diagnóstico del modelo de distribución.

Además se muestra el intervalo 6sigma, marcándose con líneas azul discontinuas los límites inferiores y superiores de dicho rango, pudiéndose comprobar que queda dentro de las especificaciones requeridas.

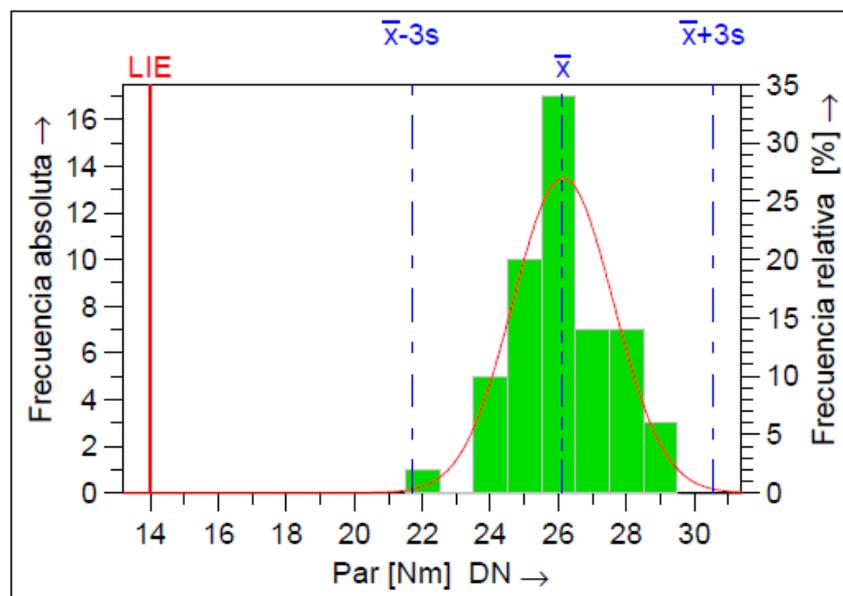


Figura 44: Histograma de frecuencia para la muestra de la característica PAR estudiada

Otro método empleado para confirmar que la distribución en análisis puede estudiarse como una distribución normal se va a hacer uso del gráfico de probabilidad normal, se trata de una técnica gráfica, utilizada para contrastar la normalidad de un conjunto de datos. Permite comparar la distribución empírica de una muestra de datos, con la distribución normal teórica.

La idea básica consiste en representar, en un mismo gráfico, los datos empíricos observados, frente a los datos que se obtendrían en una distribución normal teórica. Si la distribución de la variable es normal, los puntos quedarán cerca de una línea recta.

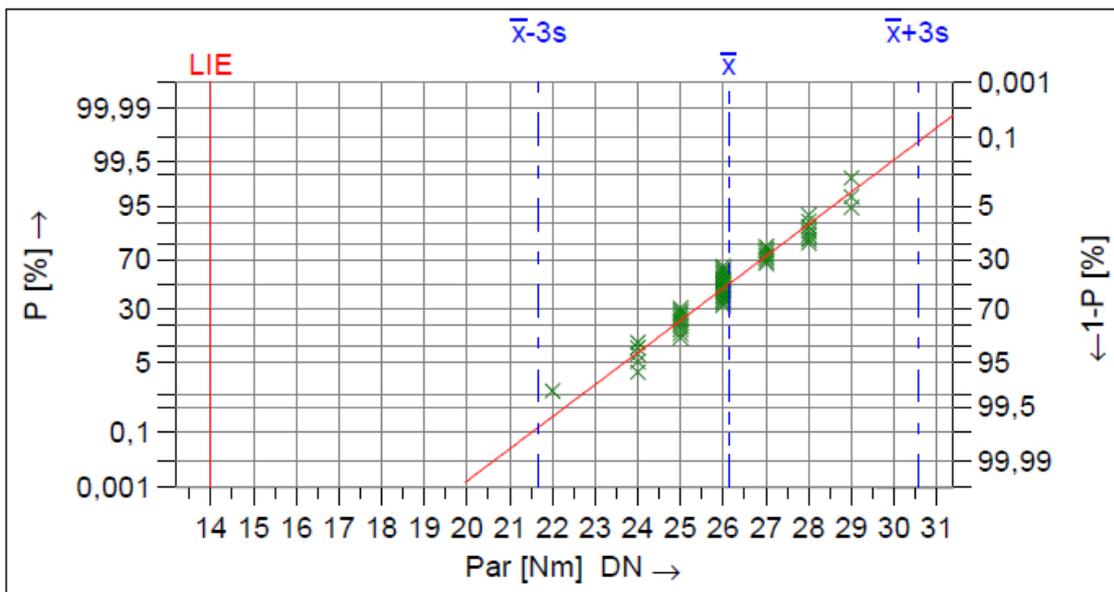


Figura 45: Gráfico de probabilidad normal para la característica PAR

Por último, aparecen tres columnas donde se resume cierta información:

- Valores de plano: en este caso sólo aparece el requisito de par mínimo introducido al principio.
- Valores medidos: valor mínimo, el máximo, el rango y la cantidad de datos empelados.
- Valores estadísticos: la media, el límite inferior y superior del intervalo 6sigma y el rango del intervalo 6sigma.

Como conclusión del informe aparece:

- El tipo de distribución que sigue la variable estudiada, en este caso normal.
- El tipo de cálculo, por el método de los percentiles.
- El índice potencial de funcionamiento, en este caso no se ha podido calcular porque no existe requisito máximo de par, sólo mínimo.
- El índice crítico de capacidad, que en este caso es de 2,73 (mayor que 1,67), por lo tanto se entiende que dicho proceso es capaz.

Valores de Plano		Valores medidos		Valores estadísticos	
T <sub>m</sub>	---			$\bar{x}$	26,12000
LIE	14,000	X <sub>min</sub>	22,000	$\bar{x}-3s$	21,68103
LSE	---	X <sub>máx</sub>	29,000	$\bar{x}+3s$	30,55897
T	---	R	7,000	6s	8,87795
		n<T>	50	p<T>	100,00000 %
		n>VLS	---	p>VLS	---
		n<VLI	0	p<VLI	0,00000%
		n(tot) <sub>eff</sub>	50		
		n(tot) <sub>tot</sub>	50		
Modelo de distr.			Distribución normal		
Tipo de cálculo			M4 <sub>1</sub> Percentil (0,135%- $\bar{x}$ -99,865%)		
índice potencial del funcionamiento	P <sub>p</sub>	---	915		
índice crítico de capacidad	P <sub>pk</sub>	2,01 ≤ 2,73 ≤ 3,45			
Los requisitos fueron satisfechos (P <sub>p</sub> ,P <sub>pk</sub> )					
Q-DAS 1 - Part					

Figura 46: Resumen de los estadísticos e índices de calidad para la característica PAR

#### 4.3.4. Característica 2: Tracción.

En el apartado 2.5.2.2 de este TFM se ha descrito la importancia del ensayo de tracción como requisito para la validación de la soldadura de tuercas, ya que en la mayoría de casos se considera como característica significativa de la pieza. También se describe con detalle cómo se lleva a cabo dicho ensayo. Mientras que en el apartado 2.6 se especifica de donde se extrae la especificación mínima y/o máxima de par a tener en cuenta a la hora de calcular la capacidad del proceso.

El informe de capacidad de la característica tracción sigue la misma estructura que el de par, por lo tanto solamente se van a remarcar aquellos aspectos que sean diferentes entre ellos. Como se observa la pieza es la misma, con lo cual los datos de la cabecera son prácticamente idénticos exceptuándole valor de la especificación.

		Análisis de Proceso				Pág. 1 / 1	
Planta	Bereich 1	Dept./Cost./Pod.	Abt. 1	Nombre opr.	Prüfer	Fecha Act.	20/04/2016
Nº Pieza	6F2 805 327	Descr. Pieza	8852 (Conjunto soporte limpia)			Contr.cota	no
Máquina		Descr.Caract.	TRACCIÓN		Nominal	0,000	LSE
Nº máq.	MTWEL 371	Nº Caract.		Unidad	kN		LIE
Tipo Caract.	variable	Clase Caract.	significativa		Tipo captaci	0	Decimales
							3
Descr.Tipo Prc		Grupo Instr.	Instrumento: máquina de ensayos universal				
Tipo produc.		Nº Instr.	Resolución				
Análisis	desde	20/04/2016 17:00:13	hasta	20/04/2016 17:00:13			
Observación							

Figura 47: Encabezado del informe sobre el estudio de capacidad del TRACCIÓN

Para la realización del estudio se ha ensayado y medido una muestra de 125 individuos. Estos 125 datos se han agrupado en subgrupos de 5 para representarse en los gráficos, por dicho motivo el eje X llega hasta 25 puntos.

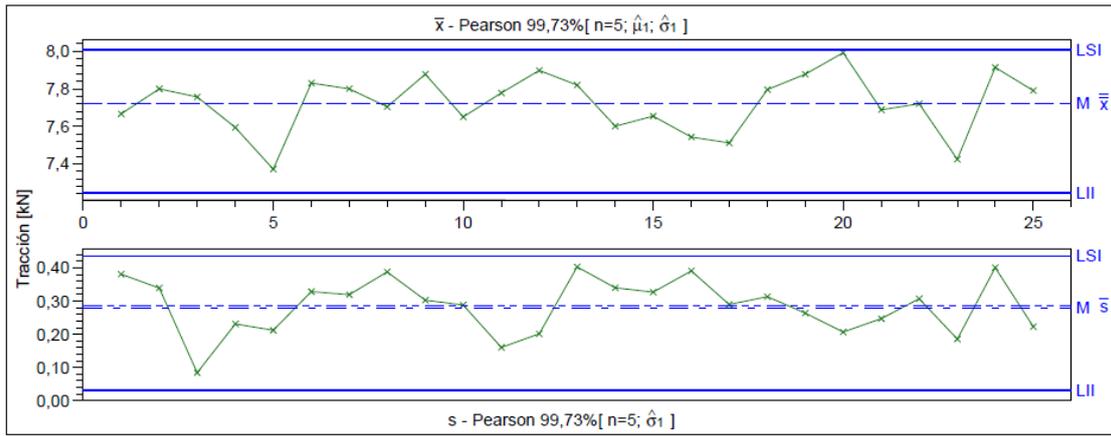


Figura 48: Gráfico representativo de la evolución de la media y la dispersión del TRACCIÓN para la muestra seleccionada

El programa QS-STAT mediante la sistemática del contraste de hipótesis determina que la muestra de datos introducida de la variable tracción sigue una función de distribución normal logarítmica (lognormal). Dicha distribución es una distribución de probabilidad de una variable aleatoria cuyo logaritmo está normalmente distribuido. Es decir, si  $X$  es una variable aleatoria con una distribución normal, entonces  $\exp(X)$  tiene una distribución log-normal.

La distribución lognormal es una distribución flexible que está estrechamente relacionada con la distribución normal. Esta distribución puede resultar particularmente útil para modelar datos que sean aproximadamente simétricos o asimétricos a la derecha.

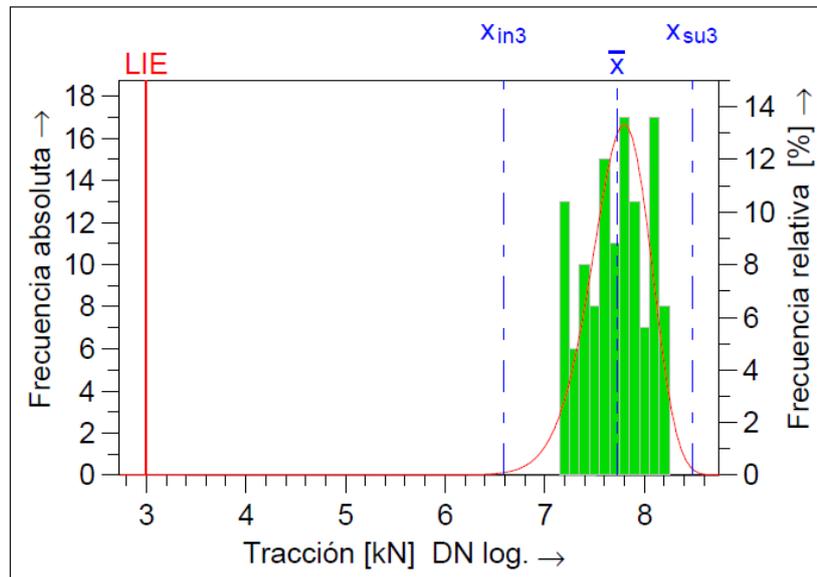


Figura 49: Histograma de frecuencia para la muestra de la característica TRACCIÓN estudiada

Para esta tipología de distribución la gráfica de distribución estadística se diferencia en que el eje de las  $X$  se encuentra en escala logarítmica, se observa en este caso que exceptuando en los extremos el resto de datos de la muestra siguen una línea recta.

Además el programa facilita una función de probabilidad, tanto para el eje logarítmico como para el normal, a partir de la cual se puede conocer la probabilidad de que la tracción tome un determinado valor concreto.

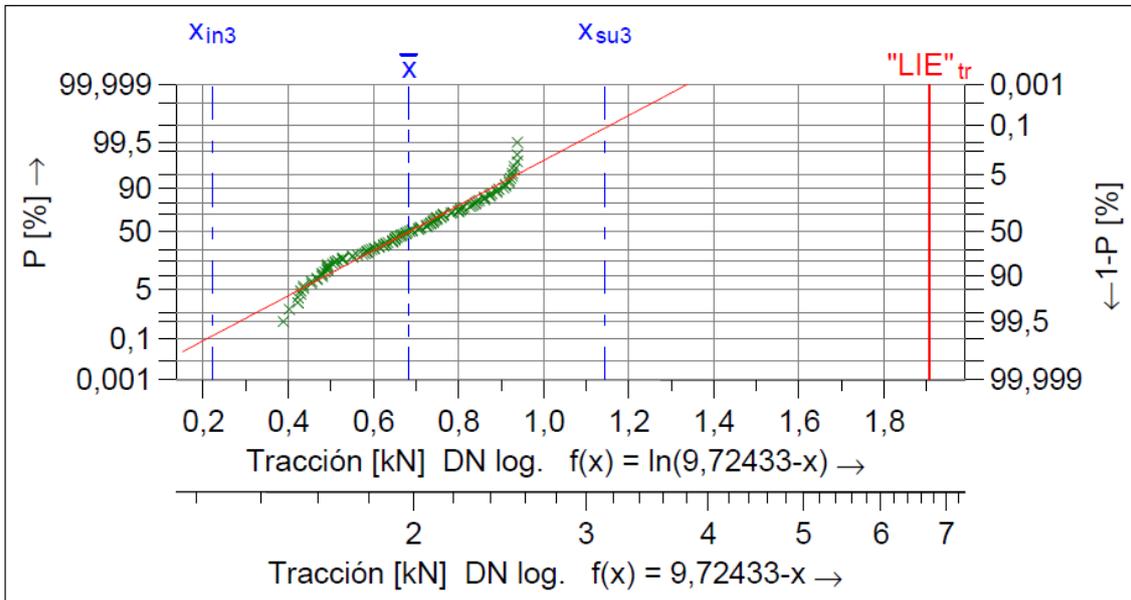


Figura 50: Gráfico de probabilidad normal para la característica TRACCIÓN

Como conclusión del informe aparece:

- El tipo de distribución que sigue la variable estudiada, en este caso normal logarítmica.
- El tipo de cálculo, por el método de los percentiles.
- El índice potencial de funcionamiento, en este caso no se ha podido calcular porque no existe requisito máximo de tracción, sólo mínimo.
- El índice crítico de capacidad, que en este caso es de 4,15 (mayor que 1,67), por lo tanto se entiende que dicho proceso es capaz.

Valores de Plano		Valores medidos		Valores estadísticos	
T <sub>m</sub>	---			$\bar{x}$	7,72224
LIE	3,000	X <sub>min</sub>	7,170	X <sub>in3</sub>	6,58409 [rt]
LSE	---	X <sub>máx</sub>	8,250	X <sub>su3</sub>	8,47741 [rt]
T	---	R	1,080	X <sub>su3</sub> -X <sub>in3</sub>	1,89332 [rt]
		n <T>	125	p <T>	100,00000 %
		n >VLS	---	p >VLS	---
		n <VLI	0	p <VLI	0,00000%
		n(tot) <sub>efi</sub>	125		
		n(tot) <sub>tot</sub>	125		
Modelo de distr.		Distribución normal logarítmica			
Tipo de cálculo		M4 <sub>1</sub> Percentil (0,135%- $\bar{x}$ -99,865%)			
índice potencial del funcionamiento	P <sub>p</sub>	---	915		
Índice crítico de capacidad	P <sub>pk</sub>	3,47 ≤ 4,15 ≤ 4,83			
Los requisitos fueron satisfechos (P <sub>p</sub> ,P <sub>pk</sub> )					
Q-DAS 1 - Part					

Figura 51: Resumen de los estadísticos e índices de calidad para la característica TRACCIÓN

### 4.3.5. Característica 3: Superficie mating.

Esta característica significativa está relacionada con el proceso de estampación, a diferencia de las dos anteriores que eran consecuencia del proceso de soldadura de tuercas.

La superficie mating de una pieza es aquella que está en contacto directo con otras piezas del conjunto una vez montada en el automóvil. La forma de evaluar esta variable es colocando la pieza en su correspondiente galga (ver apartado 3.4.1: galgas y elementos de control) para poder medir los puntos de reloj (MPs: master points) de esa zona, mediante los cuales se conoce con mayor precisión cuál es la dimensión real de un punto de dicha superficie, y para ello se emplean relojes comparadores.

La superficie mating de la pieza analizada es la marcada en rojo en la siguiente figura, en ella se pueden medir dos puntos de reloj, el informe que se va a detallar es el correspondiente al MP2.



Figura 52: Especificación de la superficie mating de la pieza a analizar (zona sombreada de rojo).

En la cabecera la única diferencia respecto a los informes previos es que existe una especificación para el límite superior también, además de la inferior. Esto se debe a que dicha superficie se puede desviar como máximo 0,5 mm respecto del nominal en ambos sentidos, es decir la tolerancia en plano de cliente es +/- 0,5 mm.

		<b>Análisis de Proceso</b>		Pág. 1 / 1	
Planta		Dept./Cost./Pod.		Nombre opr.	
Fecha Act.		21/06/2016			
Nº Pieza 6F2.805.327		Descr. Pieza 8852 (Conjunto soporte limpia)		Contr.cota no	
Máquina		Descr.Caract. Superficie mating		Nominal	
Nº máq. V202		Nº Caract.		Unidad mm	
LSE 0,500		LIE -0,500			
Tipo Caract. variable		Clase Caract. significativa		Tipo captació 0	
Decimales 3		Descr.Tipo Prc		Grupo Instr.	
Instrumento: reloj comparador		Tipo produc.		Nº Instr.	
Resolución		Análisis desde 21/06/2016 12:09:35 hasta 21/06/2016 12:09:35			
Observación					

Figura 53: Encabezado del informe sobre el estudio de capacidad de la SUPERFICIE MATING

Para la realización del estudio se ha ensayado y medido una muestra de 50 individuos. Estos 50 datos se han agrupado en subgrupos de 5 para representarse en los gráficos, por dicho motivo el eje X llega hasta 10 puntos.

Las piezas que forman parte de la muestra han sido seleccionada todas de la misma serie de fabricación, pero no son seguidas sino de diferentes tramos de producción.

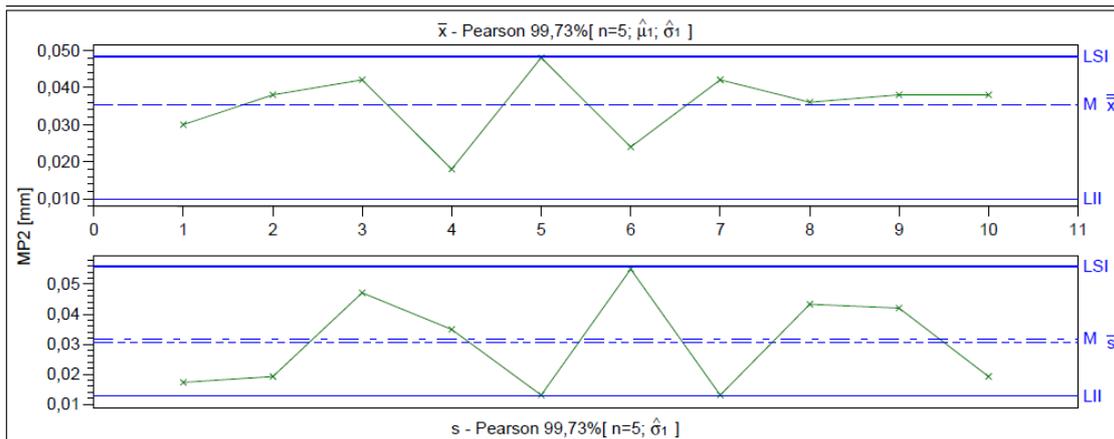


Figura 54: Gráfico representativo de la evolución de la media y la dispersión de la SUPERFICIE MATING para la muestra seleccionada

El programa QS-STAT determina la muestra de datos introducida de la variable superficie mating sigue una función de distribución de Weibull, y así lo valida el test chi-cuadrado realizado según el procedimiento detallado en el apartado anterior 4.3.1. Diagnóstico del modelo de distribución.

La distribución de Weibull se describe según los parámetros de forma, escala y valor umbral. Dicha distribución se define solo para variables no negativas, y dependiendo de los valores de los parámetros, la distribución puede adoptar varias formas.

Debido a que la distribución de Weibull puede asumir las características de otros tipos de distribución, es extremadamente flexible para ajustar diferentes tipos de datos. Siendo una alternativa a la distribución normal en el caso de datos asimétricos.

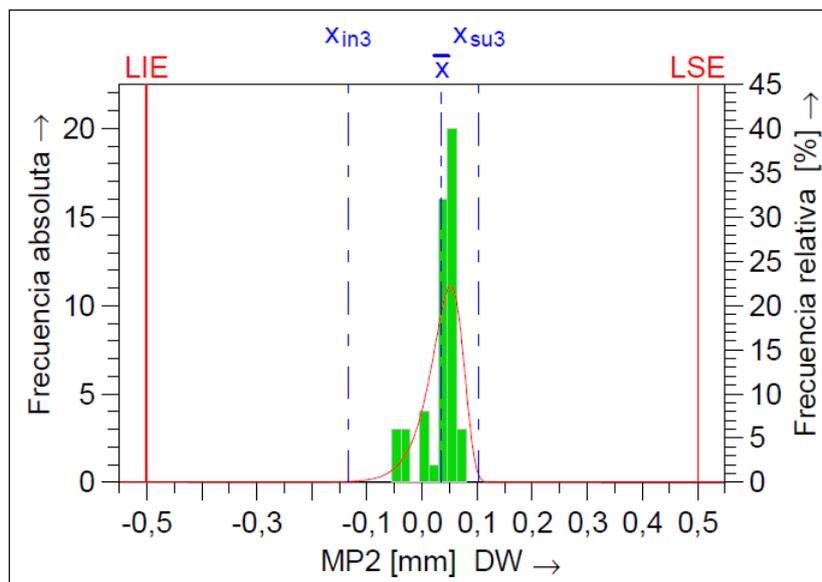


Figura 55: Histograma de frecuencia para la muestra de la característica SUPERFICIE MATING estudiada

El gráfico de distribución de la probabilidad para esta casuística no reproduce fielmente una recta como en el caso de la distribución normal, y además no están equitativamente repartidos a lo largo de la recta sino que existe una mayor cantidad de datos cerca de uno de los extremos (en este caso el superior) que del otro.

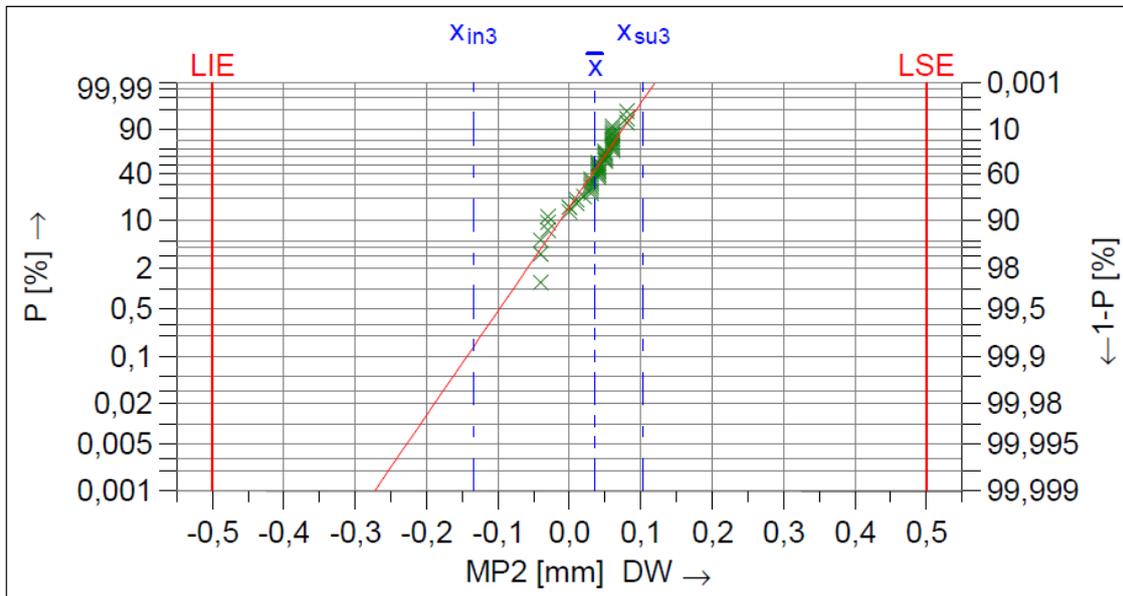


Figura 56: Gráfico de probabilidad normal para la característica SUPERFICIE MATING

Como conclusión del informe aparece:

- El tipo de distribución que sigue la variable estudiada, en este caso de Weibull.
- El tipo de cálculo, por el método de los percentiles.
- El índice potencial de funcionamiento, en este caso sí se ha podido calcular porque existe requisito en ambos sentidos, siendo el valor del Pp calculado de 4,18, lo que significa que el proceso es potencialmente capaz.
- El índice crítico de capacidad, que en este caso es de 3,14 (mayor que 1,67), por lo tanto se entiende que dicho proceso es capaz.

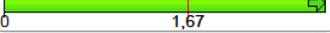
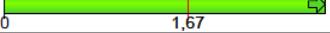
Valores de Plano		Valores medidos		Valores estadísticos	
T <sub>m</sub>	0,000	X <sub>min</sub>	-0,040	$\bar{x}$	0,03540
LIE	-0,500	X <sub>máx</sub>	0,080	X <sub>in3</sub>	-0,13499 [rt]
LSE	0,500	R	0,120	X <sub>su3</sub>	0,10396 [rt]
T	1,000			X <sub>su3</sub> -X <sub>in3</sub>	0,23896 [rt]
		n<T>	50	p<T>	100,00000 %
		n >VLS	0	p>VLS	0,00000%
		n <VLI	0	p<VLI	0,00000%
		n(tot) <sub>efi</sub>	50		
		n(tot) <sub>tot</sub>	50		
Modelo de distr.			Distr.Weibull		
Tipo de cálculo			M4 <sub>1</sub> Percentil (0,135%- $\bar{x}$ -99,865%)		
índice potencial del funcionamiento	P <sub>p</sub>	3,12 ≤ <b>4,18</b> ≤ 5,29			
Índice crítico de capacidad	P <sub>pk</sub>	2,32 ≤ <b>3,14</b> ≤ 3,97			
 Los requisitos fueron satisfechos (P <sub>p</sub> ,P <sub>pk</sub> ) 					
Q-DAS 1 - Part					

Figura 57: Resumen de los estadísticos e índices de calidad para la característica SUPERFICIE MATING

#### 4.4. CONCLUSIONES.

Tras el análisis de estos 3 informes de capacidad sobre características significativas se extraen una serie de conclusiones, que pueden servir de ayuda para entender un poco más los procesos productivos involucrados: estampación y soldadura. Pero teniendo en cuenta que los resultados obtenidos son propios de la pieza seleccionada para el estudio, es decir, dependen del material empleado para su conformado, de la máquina de soldadura utilizada, etc.

**Par:**

El proceso ha resultado capaz con un Ppk de 2,73, una media de 26,12 Nm y un rango de variabilidad de 7 Nm, siendo el mínimo requerido de 14 Nm.

**Tracción:**

El proceso ha resultado capaz con un Ppk de 4,15, una media de 7,72 kN y un rango de variabilidad de 1,08 kN, siendo el mínimo requerido de 3 kN.

Por lo tanto, analizando esta información se detecta que se puede ajustar un poco más el proceso de soldadura de tuercas, ya que ambas características tienen cierto margen para ver reducidos sus valores, y de esta forma reducir la potencia requerida por la máquina, lo cual afecta directamente al consumo eléctrico y a la fatiga de la máquina, suponiendo un ahorro en energía y en mantenimiento a largo plazo.

Teniendo en cuenta que dicha disminución de potencia debe hacerse siempre de forma controlada ya que una modificación de parámetros puede afectar también a la variabilidad del proceso, que en caso de aumentar perjudica gravemente a la capacidad.

**Superficie mating:**

El proceso ha resultado capaz con un Ppk de 3,14, una media de 0,035 mm y un rango de variabilidad de 0,12 mm, siendo las tolerancias de +/- 0,5 mm.

Se observa que el margen de mejora es muy pequeño, ya que la estampación es un proceso que se encuentra muy perfeccionado, la única opción de mejora sería centrar al nominal la superficie ya que se encuentra un poco desviada hacia el límite superior, esto permitiría tener un poco más de variabilidad sin que se viera afectado gravemente el Ppk.

## 5. ANÁLISIS MULTI-VARIABLE DE LA SOLDADURA TIPO MAG.

### 5.1. INTRODUCCIÓN.

El objetivo de esta sección del proyecto es realizar un profundo análisis de las relaciones existentes entre todas las variables ligadas a las características técnicas evaluadas resultantes de los ensayos de metalografía de la soldadura MAG.

Obtener el conocimiento de estas interdependencias va a ayudar a entender porqué algunas veces los resultados son OK y otras veces NOK, y de esta forma poder modificar los parámetros de soldadura de forma razonada y no mediante la técnica de prueba y error, ya que de esta forma se modifica algún parámetro con el objetivo de cumplir cierto requerimiento pero a la vez se deja de cumplir otro, que no se sabía que estaba relacionado.

Para ello se ha seleccionado la pieza con soldadura MAG que más problemas está ocasionando, y sobre esta se desarrolla todo el estudio. En primer lugar, se realiza un análisis descriptivo de cada una de las características medidas, consistente en una breve explicación de su naturaleza y a continuación un resumen de sus datos estadísticos más relevantes, también se añade un histograma para observar su distribución.

Posteriormente con toda la información se construye una matriz de correlaciones, donde se puede deducir entre qué variables existen relaciones significativas y entre cuáles no, y en esos casos además se calcula cuál es el grado de dependencia entre ellas.

Por último, se pretende obtener una ecuación polinómica de cada una de las relaciones que se hayan determinado importantes, con el fin de poder realizar predicciones, es decir, calcular el valor de una variable conocido el de su variable asociada.

### 5.2. JUSTIFICACIÓN.

En esta sección del TFM se pretende realizar un análisis multi-variable centrado en los ensayos de la soldadura tipo MAG. Dicho estudio viene motivado debido a la gran cantidad de variables que se pueden medir en un cordón de soldadura, lo cual provoca que se presente la oportunidad de analizar cómo están relacionadas entre ellas. Hecho que puede suponer una ayuda a la hora de mejorar el proceso de soldadura MAG.

Además, también se va a analizar si los resultados de la soldadura dependen de dos factores adicionales propios del proceso en sí, que son:

- La soldadura de una misma tipología de pieza se realiza en distintas cavidades/huellas del útil de soldadura montado en el robot, con lo cual habrá que averiguar si este hecho es significativo o no en los datos obtenidos.
- Los ensayos de metalografía son realizados por personas, y aunque el procedimiento para realizar el ensayo está estandarizado, esto provoca que el factor humano esté presente en los resultados. Por lo tanto, se quiere averiguar también si este factor es de carácter significativo.

En primer lugar, destacar que de las 87 piezas distintas que se sueldan en la fábrica solamente 8 de ellas llevan soldadura tipo MAG, es decir, alrededor de un 10%.

Se observa que el nivel de incidencias relacionadas con este 10% de piezas es de un 35% del total de material retenido. Y este material defectuoso no se puede retrabajar, debido a la imposibilidad de modificar la morfología del cordón una vez soldado, por lo tanto se trata de material que acaba siendo scrap.

Una vez justificada la importancia del presente problema, se ha de decidir con cuál de las 8 piezas implicadas se realiza el análisis. Aunque se podrían estudiar los 8 casos, este TFM se centra en una de ellas únicamente, enseñando detalladamente cuál sería el procedimiento a seguir en el resto.

Hay que matizar que los resultados obtenidos para la soldadura MAG en una pieza no son extrapolables a las otras, ya que este tipo de soldadura como se ha explicado en apartados anteriores depende de un conjunto de factores que están ligados a las características intrínsecas de la propia pieza.

Para determinar qué pieza con soldadura MAG es analizada, se va a tener en cuenta principalmente un dato: la cantidad de piezas que han sido achatarradas por soldadura NOK.

Se observa como la pieza que más cantidad de scrap semanal tiene es la Nº 8281, con 269 unidades achatarradas a la semana. Con lo cual esta es la pieza seleccionada para continuar con el análisis.

El gráfico se ha realizado por cantidad de piezas directamente y no por porcentajes respecto a cantidad producida, debido a que la cantidad de piezas producidas de cada una de ellas es el mismo: 300.000 unidades/año, es decir, alrededor de las 6.000 unidades semanales.

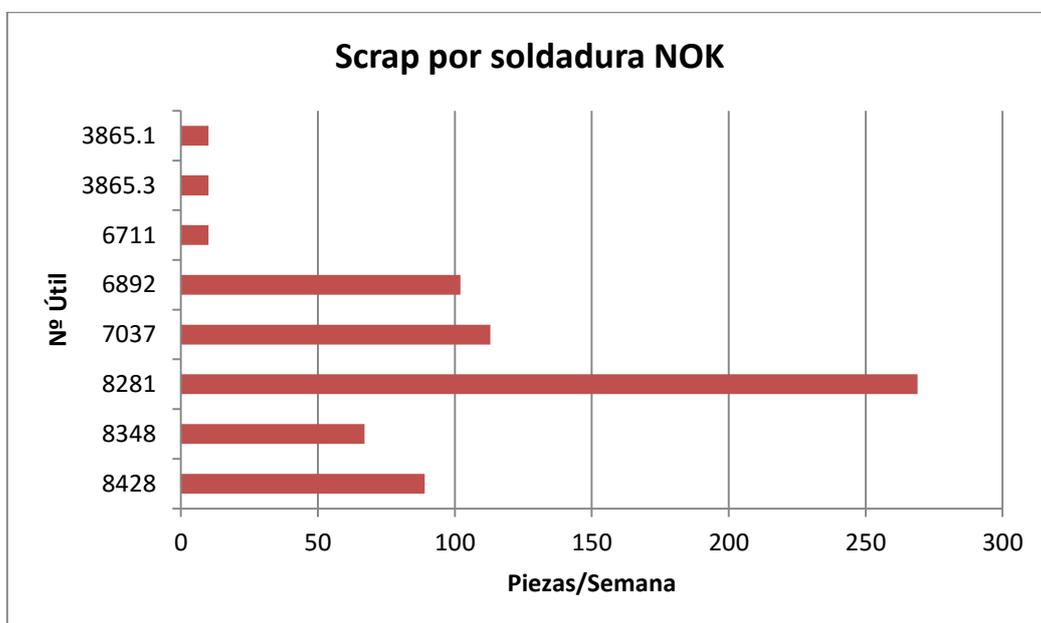


Figura 58: Gráfica representativa del scrap por soldadura NOK.

Nº ÚTIL	SCRAP (piezas /semana)
8428	89
8348	67
8281	269
7037	113
6892	102
6711	10
3865.3	10
3865.1	10

Tabla 16: Scrap por soldadura NOK.

### 5.3. RECOPIACIÓN DE DATOS.

En primer lugar, se van a presentar las características más relevantes de la pieza seleccionada. Esta consiste en una pieza estampada de espesor nominal 2 mm a la cual se le suelda una varilla de diámetro 10 mm mediante dos cordones de soldadura. La pieza tiene un peso teórico de 235 gramos y como se observa en la siguiente imagen existen dos manos de la misma pieza, derecha e izquierda, siendo simétricas entre ellas.



Figura 59: 3D de la pieza seleccionada para el estudio. Imagen elaborada por el autor del TFM.



Figura 60: Fotografía de la pieza situada en el útil de soldadura. Imagen elaborada por el autor del TFM.

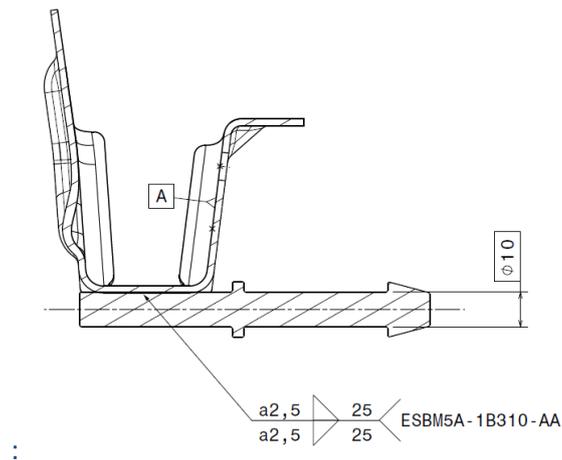


Figura 61: Corte transversal por el eje de simetría de la pieza. Imagen extraída del plano.

Para la recopilación de los datos necesarios en el análisis se ha recurrido al histórico de informes de los ensayos metalográficos del año 2016. Se han extraído los datos de 16 informes, incluyendo cada uno 6 piezas ensayadas, correspondientes a cada una de las 6 cavidades del robot de soldadura. Las variables medidas en cada pieza son: espesor, altura del cordón, penetración en la chapa, penetración en la varilla y gap.

Cada una de estas variables tiene unas especificaciones concretas:

- El espesor debe estar dentro de un intervalo calculado a partir de su valor nominal más/menos la tolerancia permitida según la norma de tolerancias dimensionales.
- La altura y la penetración tienen asignados unos límites inferiores extraídos de la norma de soldadura MAG del cliente. Mientras que el gap tiene un límite superior obtenido de esa misma norma.

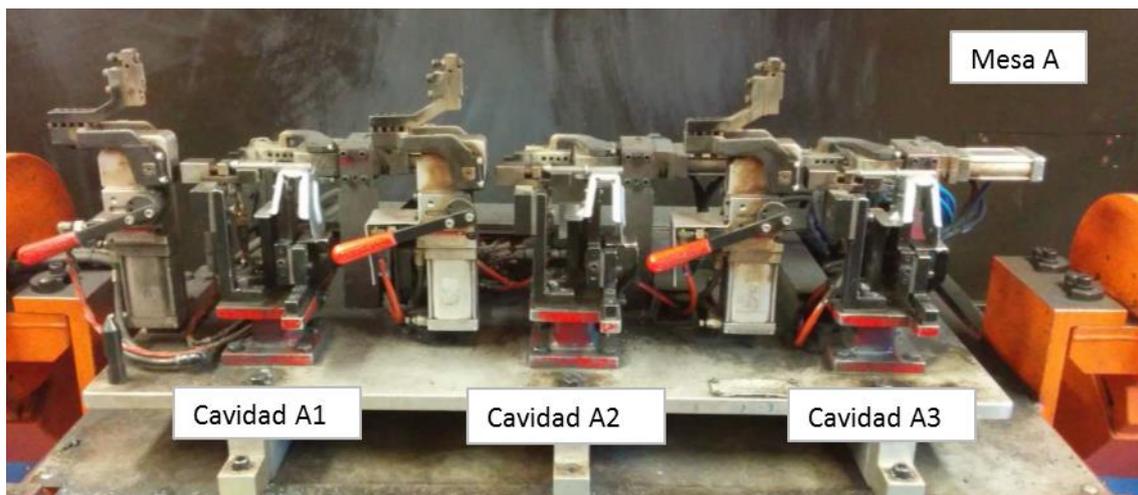


Figura 62: Fotografía de las 3 cavidades de la mesa A del útil de soldadura. Imagen elaborada por el autor del TFM.

Para poder distinguir bien las distintas fuentes de variabilidad del proceso en conjunto (soldadura más ensayo) hay que estructurar correctamente los datos en una matriz de entrada.

Dicha matriz será elaborada primero en un archivo de tipo Excel, recopilando y estructurando los datos de los 16 informes seleccionados. Para posteriormente ser introducida en el programa Statgraphics como conjunto de datos de entrada del estudio.

Las columnas de la matriz se corresponden con las distintas variables a tener en cuenta, mientras que las filas están asociadas a cada uno de los informes recogidos, desglosándose a su vez en cada uno de los distintos ensayos que incluye.

		Máximo	2,08	2,08	-	-	-	-	-	-	1	
		Mínimo	1,92	1,92	1,4	1,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0	
Fecha	Operario	Cavidad	Espesor 1	Espesor 2	Altura 1	Altura 2	Penetración en chapa 1	Penetración en chapa 2	Penetración en varilla 1	Penetración en varilla 2	Gap	Resultado
03/06/2016	1	A1	1,92	2,08	3,02	3,2	0,8	0,66	1,14	0,78	0,46	OK
		A2	1,92	1,93	3,39	3,35	1,04	0,6	1,01	0,72	0,55	OK
		A3	2,08	1,94	2,95	3,21	0,68	0,6	1,23	0,92	0,71	OK
		B1	1,95	1,94	3,15	2,96	2,15	1,01	0,9	0,94	0,26	OK
		B2	1,96	2,05	3,31	2,22	0,59	2,75	1,07	0,98	0,35	NOK
		B3	2,06	2,03	3,15	3,25	0,63	0,75	0,96	0,81	0,51	OK
23/06/2016	1	A1	1,92	1,97	2,61	2,8	0,77	0,97	1,93	0,66	0,41	OK
		A2	1,92	1,97	3,13	3,06	0,66	0,72	1,01	1,11	0,63	OK
		A3	1,92	1,99	2,75	2,96	0,72	0,61	1,6	1,37	0,58	OK
		B1	1,95	1,97	2,72	2,93	0,66	0,63	1,41	1,23	0,82	OK
		B2	1,95	1,96	3,1	2,85	0,7	0,86	0,97	0,96	0,28	OK
		B3	2,04	1,95	2,58	2,46	0,66	0,68	1,24	0,98	0,37	OK
15/07/2016	2	A1	1,92	1,92	3,11	3,7	0,6	0,62	1,03	0,97	0,9	OK
		A2	1,97	1,97	3,03	3,54	0,72	0,27	1	1,27	0,78	NOK
		A3	1,95	1,95	3,5	3,14	0,3	0,25	1,32	1,38	0,83	NOK
		B1	1,92	1,97	2,52	3,09	1,57	0,67	0,57	0,56	0,19	NOK
		B2	2,05	1,92	2,88	2,71	0,47	1,35	1,02	0,49	0,22	NOK
		B3	1,97	2,02	2,95	2,67	0,5	1,02	1,1	0,8	0,29	OK
21/07/2016	2	A1	1,93	2,08	2,96	2,78	0,88	1,03	0,93	1,18	0,76	OK
		A2	2,06	2,08	2,96	2,62	0,61	1,56	1,02	0,96	0,63	OK
		A3	1,99	2,01	2,64	2,47	0,63	1,89	1,09	0,88	0,76	OK
		B1	1,98	2	2,83	2,68	0,72	1,04	0,82	0,74	0,34	OK
		B2	2,05	2	3,24	2,81	0,56	2,85	0,91	0,68	0,39	NOK
		B3	2	2	3,1	2,17	0,87	2,2	0,79	0,6	0,57	OK

Tabla 17: Extracto del histórico de datos de los informes de metalografía

## 5.4. CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES.

En esta sección se pretende detallar cada una de las variables que entra en juego en el resultado final de la soldadura tipo MAG. Para ello, se va a indicar: de qué tipo de variable se trata, que valores puede tomar, cuáles son sus límites y también se presenta un resumen de aquellos estadísticos más importantes sobre cada una de ellas.

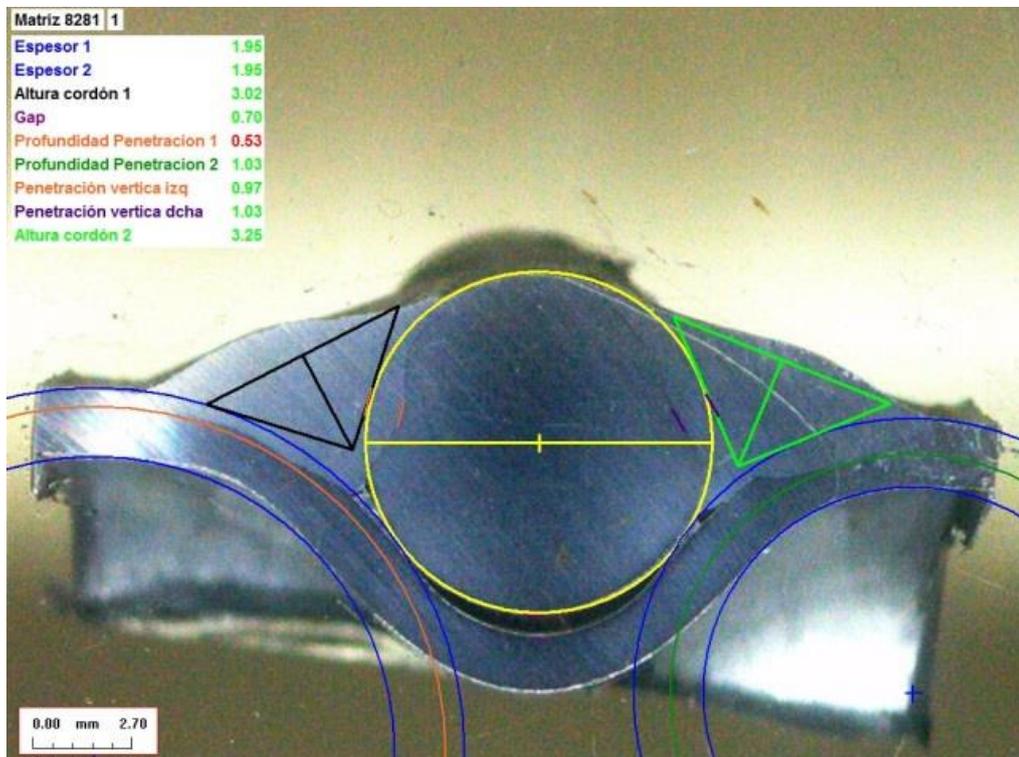


Figura 63: Ejemplo de imagen con Welding Expert del corte de cordón con los medibles trazados. Fotografía elaborada por el autor del TFM

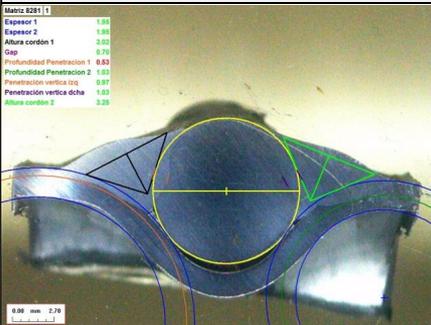
		<b>INFORME DE MEDIDAS</b>		Fecha:	03/01/2017																																								
		Piezas Final Serie 8281		Oper.:	Andrés																																								
<b>1</b>	O.T.1231758			A-1																																									
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Medidas</th> <th>Min</th> <th>Max</th> <th>Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Espesor 1</td><td>1,92</td><td>2,08</td><td>1,95</td></tr> <tr><td>Espesor 2</td><td>1,92</td><td>2,08</td><td>1,95</td></tr> <tr><td>Altura cordón 1</td><td>1,4</td><td>-</td><td>3,02</td></tr> <tr><td>Gap</td><td>0</td><td>1</td><td>0,7</td></tr> <tr><td>Profundidad Penetración 1</td><td>0,6</td><td>-</td><td>0,61</td></tr> <tr><td>Profundidad Penetración 2</td><td>0,6</td><td>-</td><td>1,03</td></tr> <tr><td>Penetración vertical izq</td><td>0,6</td><td>-</td><td>0,97</td></tr> <tr><td>Penetración vertical dcha</td><td>0,6</td><td>-</td><td>1,03</td></tr> <tr><td>Altura cordón 2</td><td>1,4</td><td>-</td><td>3,25</td></tr> </tbody> </table>				Medidas	Min	Max	Valor	Espesor 1	1,92	2,08	1,95	Espesor 2	1,92	2,08	1,95	Altura cordón 1	1,4	-	3,02	Gap	0	1	0,7	Profundidad Penetración 1	0,6	-	0,61	Profundidad Penetración 2	0,6	-	1,03	Penetración vertical izq	0,6	-	0,97	Penetración vertical dcha	0,6	-	1,03	Altura cordón 2	1,4	-	3,25
Medidas	Min	Max	Valor																																										
Espesor 1	1,92	2,08	1,95																																										
Espesor 2	1,92	2,08	1,95																																										
Altura cordón 1	1,4	-	3,02																																										
Gap	0	1	0,7																																										
Profundidad Penetración 1	0,6	-	0,61																																										
Profundidad Penetración 2	0,6	-	1,03																																										
Penetración vertical izq	0,6	-	0,97																																										
Penetración vertical dcha	0,6	-	1,03																																										
Altura cordón 2	1,4	-	3,25																																										
Grieta	0	<b>OK</b>																																											
Poro	0																																												
Otros	0																																												

Figura 64: Ejemplo de informe de metalografía. Fotografía elaborada por el autor del TFM

- **Operario:**

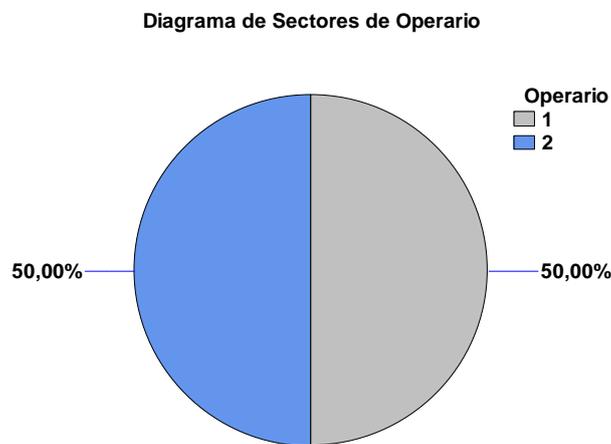
Se trata de una variable de tipo cualitativo, pudiendo tomar sólo dos valores. En vez de utilizar el nombre del inspector que ha realizado el ensayo se ha nombrado a un operario como nº 1 y al otro como nº2.

Esta variable es importante debido a que el corte de una misma pieza puede ser interpretado de distinta forma dependiendo de la persona que realice las trazas sobre la imagen obtenida en el microscopio.

Este hecho ocurre a pesar de que todos los inspectores tienen las mismas pautas generales a la hora de realizar los informes, pero dependiendo de cómo pulan la chapa o cuánto tiempo tengan el trozo de metal sumergido en el líquido de ataque químico, la diferencia de tonalidades será una u otra.

Número de observaciones: 96

Número de valores distintos: 2



*Figura 65: Diagrama de sectores para la variable operario.*

En los análisis realizados en apartados posteriores no se va a tener en cuenta el factor operario, ya que para poder determinar si es significativo o no es necesario realizar un estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) del sistema de medición, lo cual se escapa del alcance del proyecto.

- **Cavidad:**

Se trata de una variable de tipo cualitativo, pudiendo tomar 6 valores: A1, A2, A3, B1, B2 y B3. Tres de ellas se corresponden a la soldadura de una mano (A=izquierda) y las otras tres a la otra mano (B=derecha). Formando cada grupo de 3 cavidades una mesa del útil de soldar.

El comportamiento de cada cavidad es distinto a pesar de que el robot está programado para soldar de la misma forma en cada una de ellas, es decir, idénticos parámetros y movimientos. Con lo cual la diferencia está en que todas las huellas no son idénticas, suelen existir pequeñas diferencias entre ellas, ya sean dimensionales, de desgaste o a la hora de montar el útil.

Por lo tanto, es una variable a tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de la metalografía, pudiendo ser una fuente de variabilidad importante.

Número de observaciones: 96  
Número de valores distintos: 6

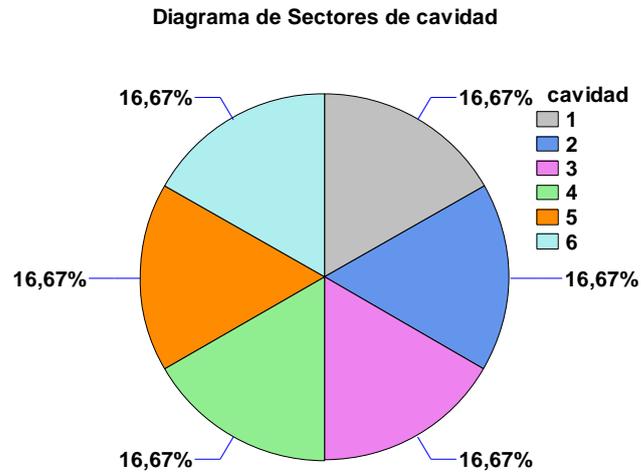


Figura 66: Diagrama de sectores para la variable cavidad (cavidad A1=1; cavidad A2=2; cavidad A3=3; cavidad B1=4; cavidad B2=5; cavidad B3=6).

Cavidad	Cantidad de ensayos NOK
A1	2
A2	2
A3	4
B1	2
B2	7
B3	0

Tabla 18: Nº de ensayos NOK x cavidad.

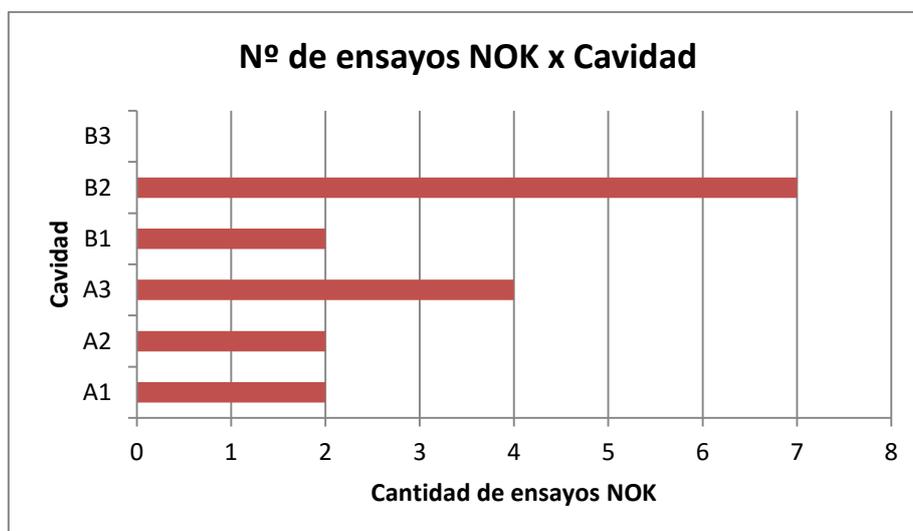


Figura 67: Gráfica representativa del Nº de ensayos NOK x cavidad.

- **Espesor 1 y 2:**

Se trata de una variable cuantitativa, la cual debe estar teóricamente entre 1,92 y 2,08 mm. Estos valores se extraen a partir del nominal de la chapa de la pieza estampada (2mm) y aplicándole la tolerancia según norma, que para este caso es de  $\pm 0,08$  mm. El espesor de la pieza base depende del proceso de estampación y no del de soldadura.

Recuento	96
Promedio	1,97812
Mediana	1,97
Varianza	0,00216908
Desviación Estándar	0,0465734
Coefficiente de Variación	2,35%
Mínimo	1,92
Máximo	2,08
Rango	0,16

Tabla 19: Resumen estadístico para la variable espesor 1.

Recuento	96
Promedio	1,9596
Mediana	1,97
Varianza	0,0355422
Desviación Estándar	0,188526
Coefficiente de Variación	9,62%
Mínimo	0,192
Máximo	2,08
Rango	1,888

Tabla 20: Resumen estadístico para la variable espesor 2.

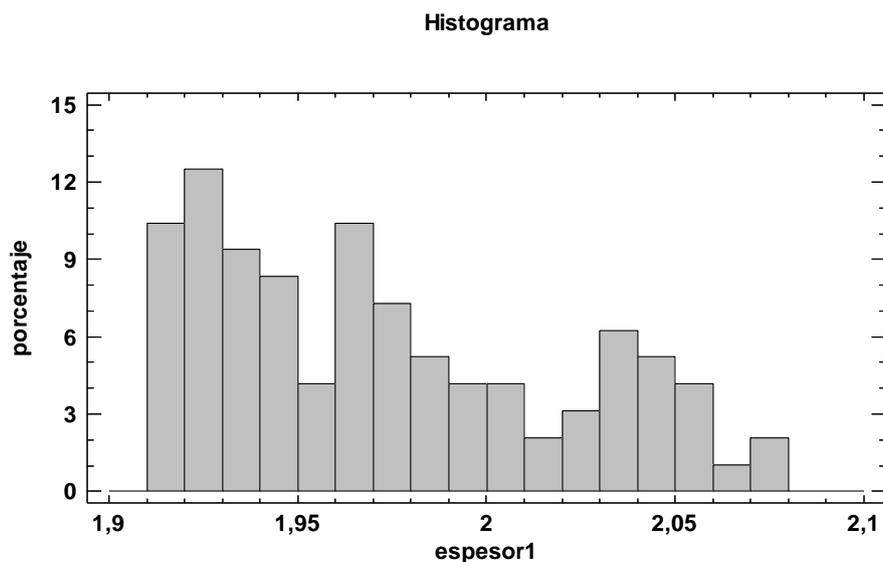


Figura 68: Histograma para la variable espesor 1.

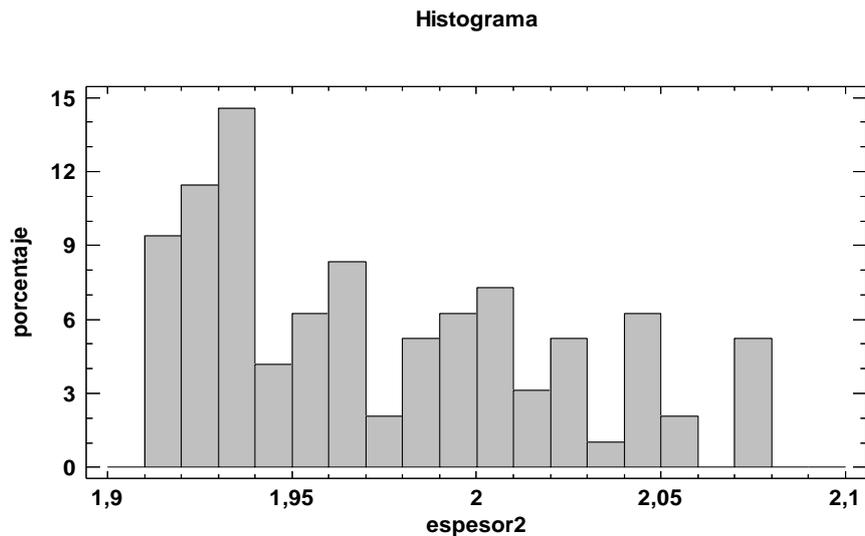


Figura 69: Histograma para la variable espesor 2.

- **Altura 1 y 2:**

La altura de los cordones de soldadura es una variable cuantitativa que debe cumplir un requisito mínimo impuesto por la norma del cliente.

Para el caso de esta pieza en concreto la norma aplicable específica que la altura debe ser como mínimo del 70% del espesor de la chapa más fina, con lo cual la altura mínima será de 1,4 mm, ya que como se ha visto el espesor es de 2 mm. En cuanto a altura máxima permitida no se especifica nada.

Hay que destacar que existen dos conceptos distintos en torno a cómo medir la altura de un cordón, como se observa en la figura dependiendo del punto de vista se puede considerar la altura la distancia que aparece nombrada como "a" o también la nombrada como "z". En Europa se suele utilizar la distancia "a", mientras que en EEUU se utiliza la distancia "z" para referirse a la altura.

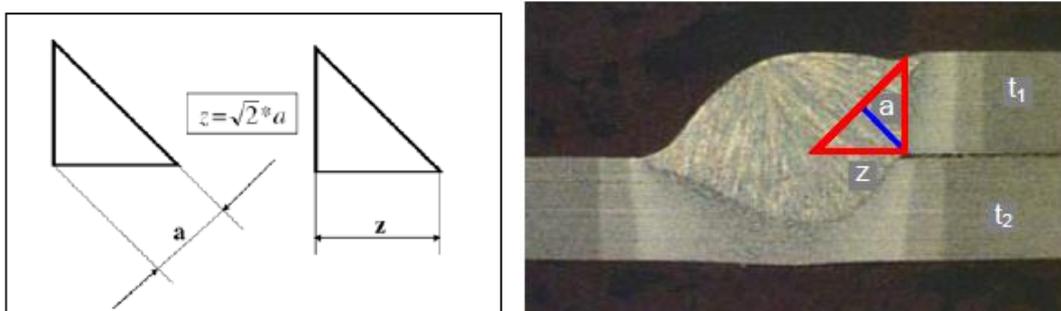


Figura 70: Ejemplo de medición de la altura de un cordón de soldadura. Fotografías extraídas de la especificación general de Ford sobre soldadura MAG ESBM5A-1B310-AA.

Recuento	96
Promedio	3,02
Mediana	3,06
Varianza	0,161585
Desviación Estándar	0,401977
Coefficiente de Variación	13,31%
Mínimo	2,03
Máximo	3,98
Rango	1,95

Tabla 21: Resumen estadístico para la variable altura 1.

Recuento	96
Promedio	2,89594
Mediana	2,925
Varianza	0,150957
Desviación Estándar	0,388532
Coefficiente de Variación	13,41%
Mínimo	2,12
Máximo	3,77
Rango	1,65

Tabla 22: Resumen estadístico para la variable altura 2.

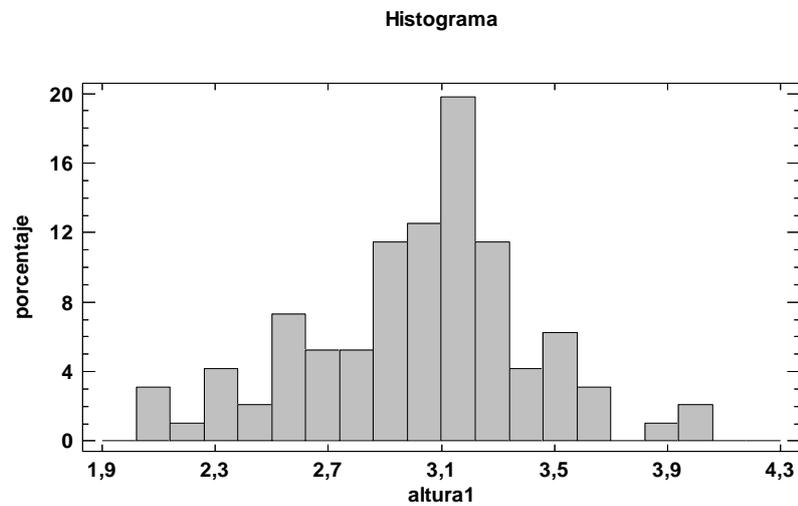


Figura 71: Histograma para la variable altura 1.

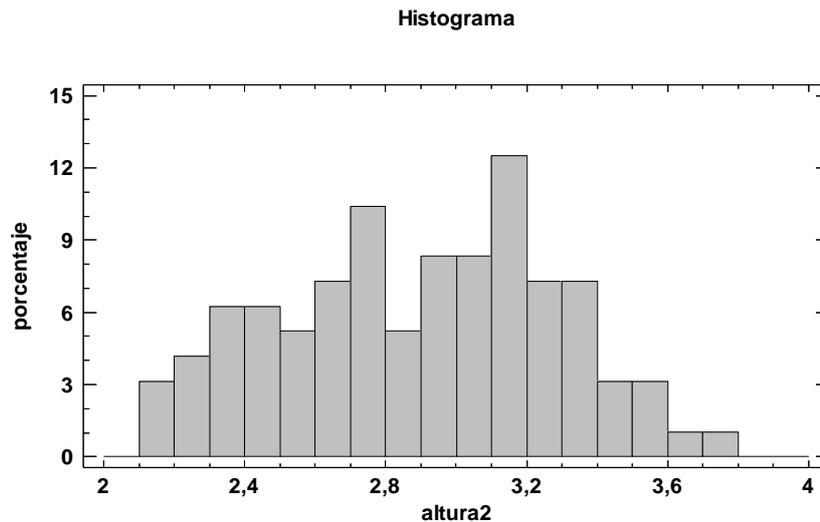


Figura 72: Histograma para la variable altura 2.

#### - Penetración en chapa 1 y 2:

La penetración en chapa de la soldadura MAG es una variable también de tipo cuantitativo, y al igual que la altura tiene especificado un valor de límite inferior pero no superior. Para el caso de esta pieza en concreto la norma aplicable especifica que la altura debe ser como mínimo del 30% del espesor de la chapa más fina, con lo cual la altura mínima será de 0,6 mm, ya que como se ha visto el espesor es de 2 mm.

Se trata de la variable más crítica del proceso, debido a que es la más complicada de asegurar y presenta poca estabilidad al depender de muchos factores.

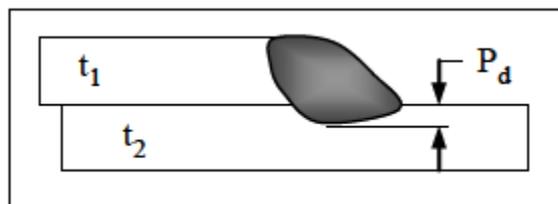


Figura 73: Ejemplo de medición de la penetración de un cordón de soldadura. Fotografía extraída de la especificación general de Ford sobre soldadura MAG ESBM5A-1B310-AA.

Recuento	96
Promedio	1,38667
Mediana	1,03
Varianza	0,886046
Desviación Estándar	0,9413
Coefficiente de Variación	67,88%
Mínimo	0,09
Máximo	4,23
Rango	4,14

Tabla 23: Resumen estadístico para la variable penetración en la chapa 1.

Recuento	96
Promedio	1,42781
Mediana	1,055
Varianza	0,829683
Desviación Estándar	0,910869
Coefficiente de Variación	63,79%
Mínimo	0,25
Máximo	3,92
Rango	3,67

Tabla 24: Resumen estadístico para la variable penetración en la chapa 2.

Histograma

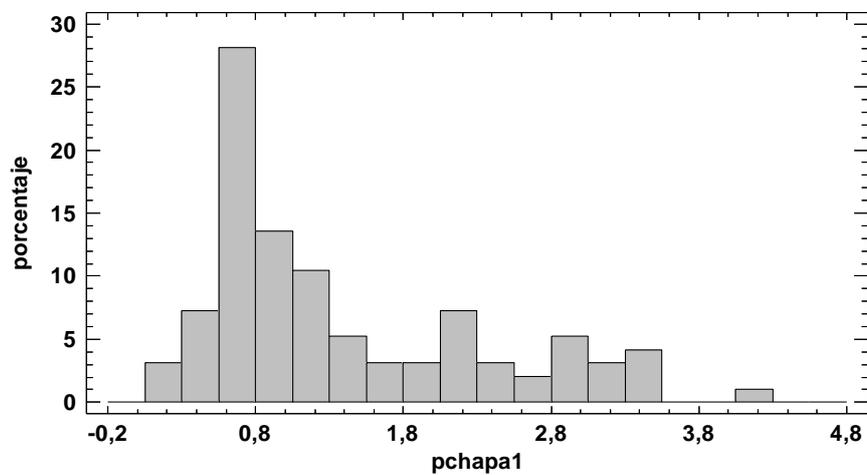


Figura 74: Histograma para la variable penetración en la chapa 1.

Histograma

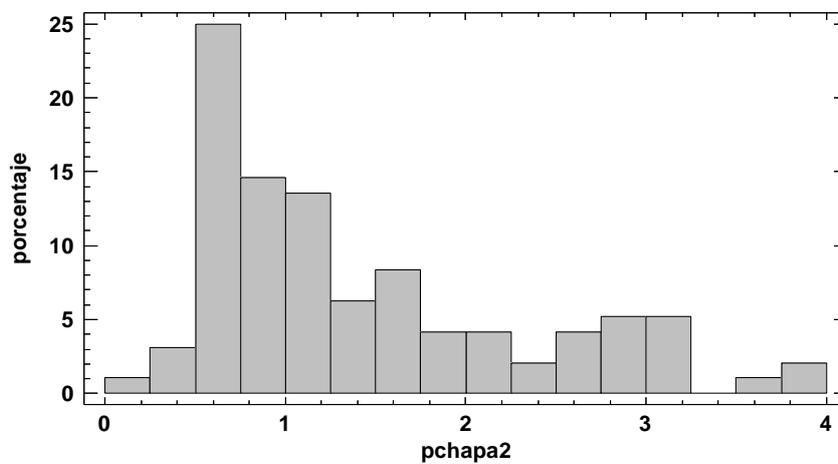


Figura 75: Histograma para la variable penetración en la chapa 2.

### - Penetración en varilla 1 y 2:

La penetración en la varilla es una variable idéntica a la anterior, siendo la única diferencia que en vez de medir la cantidad de soldadura insertada en la chapa de la pieza estampada, se está midiendo la penetración en el elemento incorporable, la varilla.

Recuento	96
Promedio	1,18427
Mediana	1,025
Varianza	0,195254
Desviación Estándar	0,441876
Coefficiente de Variación	37,31%
Mínimo	0,57
Máximo	3,02
Rango	2,45

Tabla 25: Resumen estadístico para la variable penetración en la varilla 1.

Recuento	96
Promedio	1,10631
Mediana	1,04
Varianza	0,159262
Desviación Estándar	0,399077
Coefficiente de Variación	36,07%
Mínimo	0,066
Máximo	2,38
Rango	2,314

Tabla 26: Resumen estadístico para la variable penetración en la varilla 2.

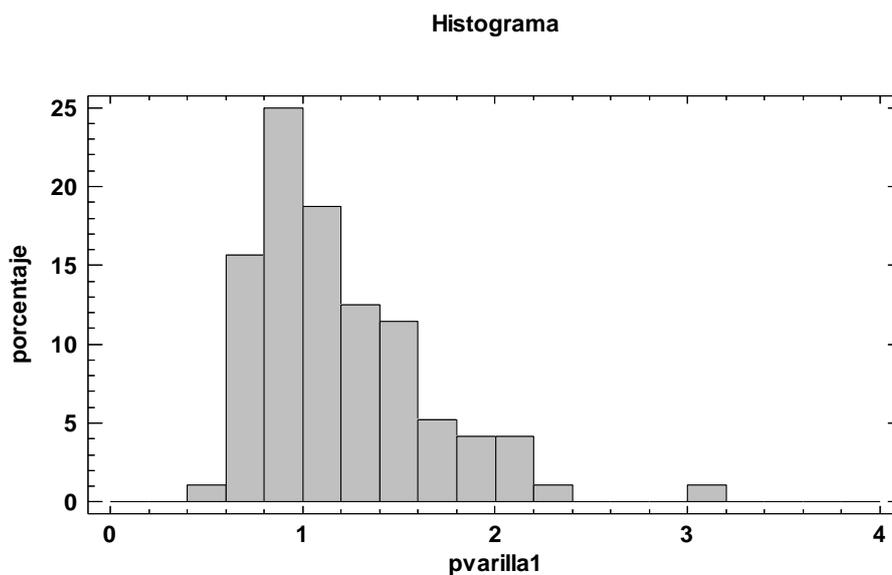


Figura 76: Histograma para la variable penetración en la varilla 1.

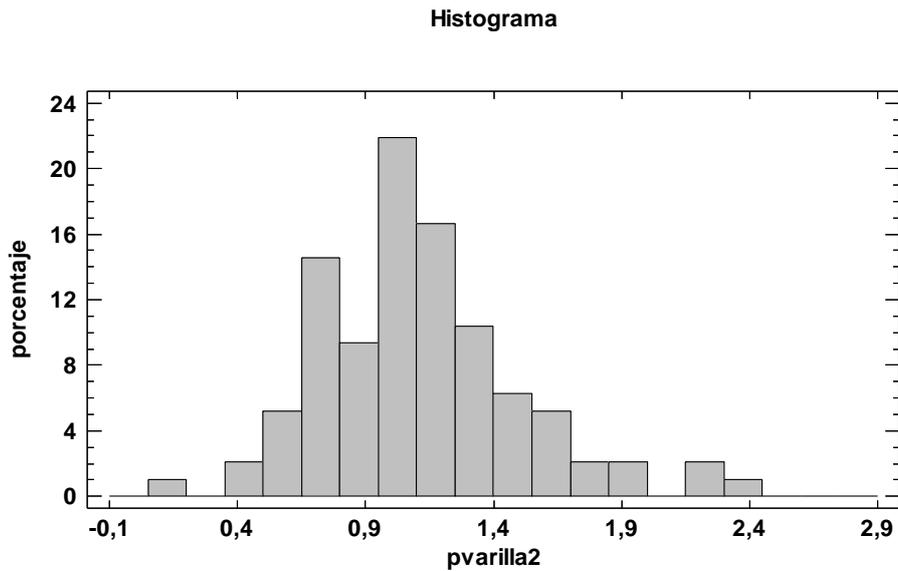


Figura 77: Histograma para la variable penetración en la varilla 2.

A continuación, se muestra una gráfica donde se puede observar el porcentaje de resultados NOK respecto del total de ensayos considerados (96 piezas ensayadas, 6 cavidades x 16 series) dependiendo de cuál haya sido el medible que no cumple con las especificaciones.

Variable	Cantidad de ensayos NOK	Porcentaje de NOK
Total	17	18%
P chapa 1	12	13%
P chapa 2	7	7%
P varilla 1	1	1%
P varilla 2	2	2%

Tabla 27: Porcentaje de ensayos NOK por variable.

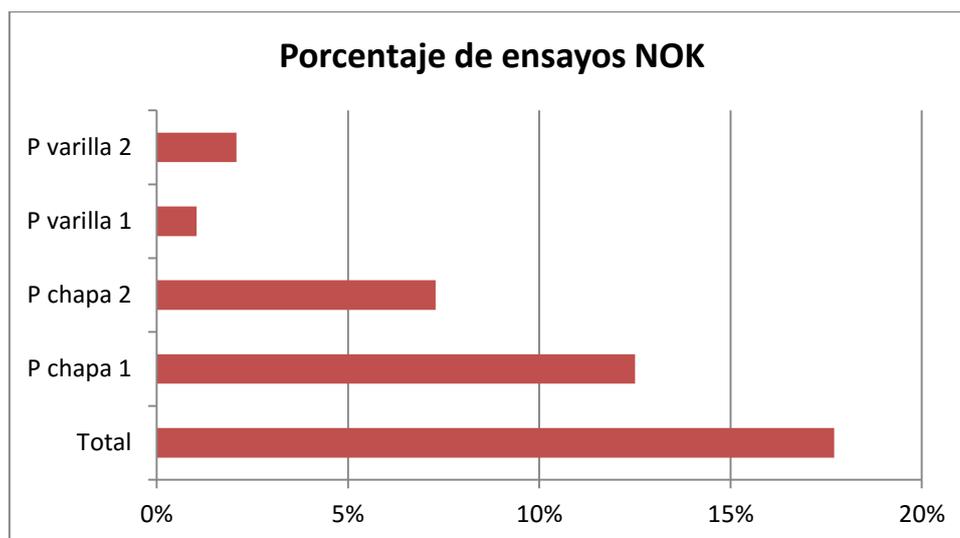


Figura 78: Gráfica representativa del porcentaje de ensayos NOK por variable.

Con esta información se extrae que la penetración más crítica es respecto a la chapa 1, registrándose un 13% de ensayos NOK debido a esta variable, es decir, del total de ensayos NOK alrededor del 70% (12/17) es debido a que no se cumple la penetración en la chapa. Y sólo sobre el 10% (2/17) debido a la penetración en la varilla.

En teoría la existencia de esta diferencia es debida principalmente a que la chapa de la pieza estampada está conformada por acero con recubrimiento de zinc, mientras que la varilla no.

- **Gap:**

Se trata de una variable cuantitativa, la cual debe estar entre 0 (valor mínimo, es decir, no existe gap) o 1 mm (valor máximo permisible según la norma de cliente). Este medible representa la distancia entre el punto inferior de la varilla y el punto de chapa más cercano, depende en gran parte de cómo se posicione y apoye la pieza antes de soldar en la huella.

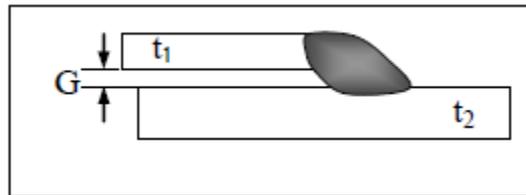


Figura 79: Ejemplo de medición del gap. Fotografía extraída de la especificación general de Ford sobre soldadura MAG ESBM5A-1B310-AA.

Recuento	96
Promedio	0,576771
Mediana	0,57
Varianza	0,0342958
Desviación Estándar	0,185191
Coefficiente de Variación	32,10%
Mínimo	0,19
Máximo	0,98
Rango	0,79

Tabla 28: Resumen estadístico para la variable gap

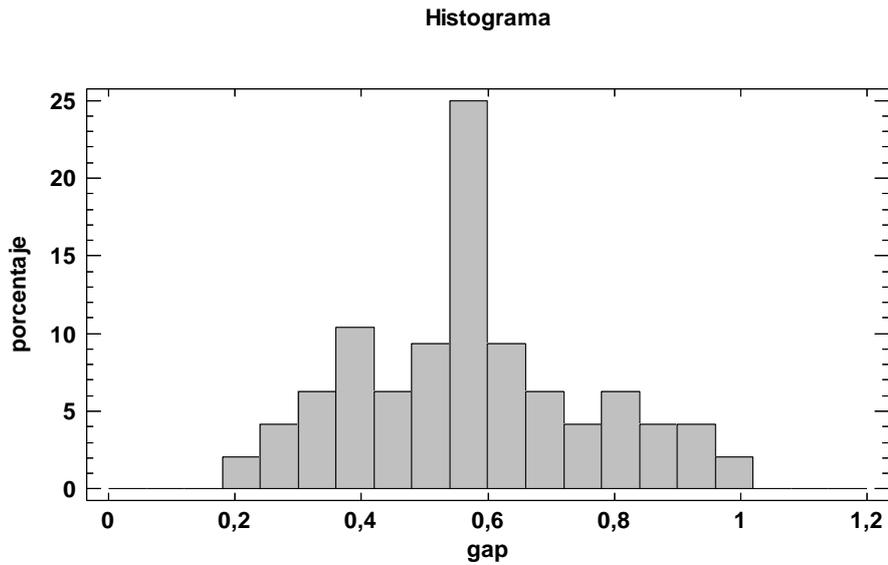


Figura 80: Histograma para la variable gap.

- **Resultado:**

Se trata de una variable de tipo cualitativo, pudiendo tomar sólo dos valores: OK o NOK. El resultado será NOK en el momento en que una sola de las variables asociadas a esa pieza este fuera de sus límites establecidos.

Número de observaciones: 96

Número de valores distintos: 2

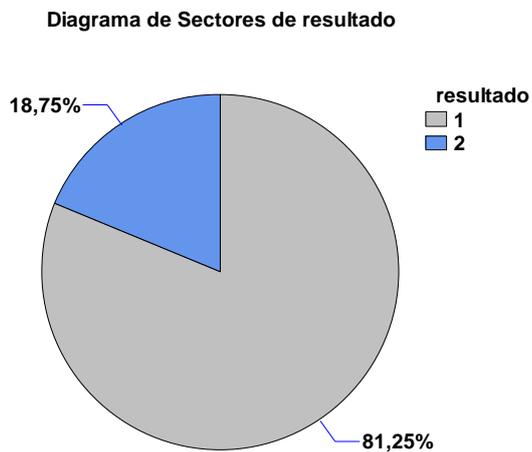


Figura 81: Diagrama de sectores para la variable resultado.

## 5.5. ANÁLISIS CON SOFTWARE.

### 5.5.1. Matriz de correlaciones.

La correlación indica la fuerza y el sentido de una relación lineal entre dos variables estadísticas. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra: si tenemos dos variables (A y B) existe correlación si al disminuir los valores de A lo hacen también los de B y viceversa.

Los coeficientes de correlación miden la fuerza de la relación lineal entre dos columnas en una escala de  $-1$  a  $+1$ . Cuanto mayor sea el valor absoluto de la correlación, más fuerte es la relación lineal entre las dos variables. STATGRAPHICS presenta los coeficientes de correlación como una matriz.

Para cada par de variables, la tabla muestra:

1.  $r_{ij}$ , el coeficiente de correlación de momento del producto Pearson estimado entre la variable fila  $i$  y la variable columna  $j$ . La fórmula empleada para la obtención de coeficiente de correlación producto-momento de Pearsons es la siguiente:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

*Ecuación 8: Fórmula para la obtención del índice de correlación entre dos variables*

Siendo:

$X_i$ , cada uno de los valores de la muestra que toma la variable  $x$ .

$Y_i$ , cada uno de los valores de la muestra que toma la variable  $y$ .

$\bar{X}$ , la media de los valores de la muestra de la variable  $x$ .

$\bar{Y}$ , la media de los valores de la muestra de la variable  $y$ .

Destacar que el signo de dicho coeficiente marca si la relación es de carácter directo o inverso. El primer caso significa que un aumento de la variable  $X$  provoca un aumento de la variable  $Y$ , mientras que si la relación es inversa un aumento en la variable  $X$  ocasiona una disminución de la variable  $Y$ .

2.  $n_{ij}$ , se muestra entre paréntesis el número de pares de datos utilizados para calcular cada coeficiente.

3.  $P_{ij}$ , el tercer número en cada bloque de la tabla es un valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P por debajo de 0,05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%.

El p-valor nos proporciona el grado de credibilidad de la hipótesis nula: si el valor de  $p$  fuese "muy pequeño" (inferior a 0,001), significaría que la ocurrencia de la hipótesis nula es prácticamente improbable (en base a las observaciones obtenidas).

Por tanto la descartaríamos; si el valor de  $p$  oscilase entre 0,05 y 0,001 significaría que hay fuertes evidencias en contra de la hipótesis nula, por lo que la rechazaríamos.

Finalmente, si el valor de p es “grande” (superior a 0,05), no habría motivos suficientes como para descartar la hipótesis nula, por lo que la tomaríamos como cierta.

### Criterio de decisión:

Descartaremos H0 (hipótesis nula) si p-valor  $\leq \alpha$  (normalmente  $\alpha = 0,05$ ).

En caso contrario aceptaremos H0 (p-valor  $> \alpha$ ).

Para este caso la hipótesis nula planteada en cada una de las relaciones entre variables es:

Hipótesis nula (H0):

No existe correlación entre los conjuntos de muestras de las variables X e Y.

Hipótesis alternativa (H1):

Sí que existe correlación entre los conjuntos de muestras de las variables X e Y.

Correlación

(Tamaño de Muestra)

Valor-P

	espesor1	espesor2	altura1	altura2	pchapa1	pchapa2	pvarilla1	pvarilla2	gap
espesor1		0,0987	-0,0625	-0,1514	0,0267	0,0162	0,1280	0,0416	0,0205
		(96)	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)
		0,3385	0,5451	0,1408	0,7964	0,8759	0,2141	0,6874	0,8427
espesor2	0,0987		0,0206	0,1209	0,1088	0,1316	0,0529	0,0016	0,0876
	(96)		(96)	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)
	0,3385		0,8420	0,2405	0,2914	0,2013	0,6088	0,9878	0,3961
altura1	-0,0625	0,0206		0,0994	-0,1022	0,0305	-0,1962	0,3161	-0,3273
	(96)	(96)		(96)	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)
	0,5451	0,8420		0,3351	0,3220	0,7680	0,0554	<b>0,0017</b>	<b>0,0011</b>
altura2	-0,1514	0,1209	0,0994		-0,1173	-0,3610	-0,0966	-0,0882	-0,0718
	(96)	(96)	(96)		(96)	(96)	(96)	(96)	(96)
	0,1408	0,2405	0,3351		0,2551	<b>0,0003</b>	0,3489	0,3927	0,4868
pchapa1	0,0267	0,1088	-0,1022	-0,1173		0,5165	-0,2537	-0,1721	0,2348
	(96)	(96)	(96)	(96)		(96)	(96)	(96)	(96)
	0,7964	0,2914	0,3220	0,2551		<b>0,0000</b>	<b>0,0126</b>	0,0935	<b>0,0213</b>
pchapa2	0,0162	0,1316	0,0305	-0,3610	0,5165		-0,1295	-0,1102	0,0921
	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)		(96)	(96)	(96)
	0,8759	0,2013	0,7680	<b>0,0003</b>	<b>0,0000</b>		0,2084	0,2853	0,3721
pvarilla1	0,1280	0,0529	-0,1962	-0,0966	-0,2537	-0,1295		0,2793	0,1356
	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)		(96)	(96)
	0,2141	0,6088	0,0554	0,3489	<b>0,0126</b>	0,2084		<b>0,0059</b>	0,1877
pvarilla2	0,0416	0,0016	0,3161	-0,0882	-0,1721	-0,1102	0,2793		0,1690
	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)		(96)
	0,6874	0,9878	<b>0,0017</b>	0,3927	0,0935	0,2853	<b>0,0059</b>		0,0997
gap	0,0205	0,0876	-0,3273	-0,0718	0,2348	0,0921	0,1356	0,1690	
	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)	(96)	
	0,8427	0,3961	<b>0,0011</b>	0,4868	<b>0,0213</b>	0,3721	0,1877	0,0997	

Tabla 29: Matriz de correlación entre todas las variables consideradas en el estudio

Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0,05:

- altura1 y pvarilla2
- altura1 y gap
- altura2 y pchapa2
- pchapa1 y pchapa2
- pchapa1 y pvarilla1
- pchapa1 y gap
- pvarilla1 y pvarilla2

La siguiente tabla muestra las relaciones que han resultado significativas ordenadas de mayor a menor nivel de correlación:

VARIABLES	CORRELACIÓN	SENTIDO
pchapa1 y pchapa2	0,5165	Directo
altura2 y pchapa2	-0,3610	Inverso
altura1 y gap	-0,3273	Inverso
altura1 y pvarilla2	0,3161	Directo
pvarilla1 y pvarilla2	0,2793	Directo
pchapa1 y pvarilla1	-0,2537	Inverso
pchapa1 y gap	0,2348	Directo

*Tabla 30: Resumen de las correlaciones significativas*

### 5.5.2. Modelos de predicción.

El objetivo de este apartado es obtener modelos o ecuaciones que permitan calcular el valor de una variable sin llegar a medirla, solamente conociendo el valor de la variable relacionada. Para ello es necesario el uso de procedimientos basados en la regresión polinomial.

Esta técnica está diseñada para construir un modelo estadístico que describa el impacto de un solo factor cuantitativo X en una variable dependiente Y, ajustando los datos a un modelo polinomial que involucra a X y potencias de X.

A continuación, se va a determinar para cada una de las relaciones que se han determinado como significativas en el apartado anterior un modelo de predicción. Se ha decidido ajustar las correlaciones entre cada pareja de variables mediante una ecuación polinomial de segundo grado, ya que por una parte este tipo de regresión dota de bastante flexibilidad al modelo debido a que se ajustan varios parámetros con tal de conseguir la máxima exactitud. Mientras que por otra parte no aumenta la dificultad del cálculo en exceso, lo cual beneficia a la hora del coste y tiempo de cálculo.

A partir de los datos recopilados y estructurados, se realiza el cálculo de la regresión polinomial con StatGraphics obteniéndose la siguiente información de salida:

- **Variables y modelo:** identificación de las variables de entrada y el modelo que se ajustó. Se ajusta un modelo cuadrático de la forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2$$

*Ecuación 9: Modelo genérico de un modelo de predicción entre dos variables aleatorias*

Siendo los distintos  $\beta$  los valores de los coeficientes.

- **Coefficientes:** los coeficientes estimados, errores estándar, estadístico t de Student, y valor P. Las estimaciones de los coeficientes del modelo se pueden usar para escribir la ecuación ajustada.

El estadístico t prueba la hipótesis nula de que el parámetro del modelo correspondiente es igual a 0, contra la hipótesis alternativa de que no es igual a 0. Valores de P pequeños (menor de 0.05 al trabajar con un nivel de significancia del 5%) indican que un coeficiente del modelo es significativamente diferente de 0. De particular interés cuando se ajusta un polinomio es el valor de P para el término de mayor orden. Si este término no es significativo, entonces el modelo puede simplificarse razonablemente disminuyendo el orden del polinomio.

- **Análisis de Varianza:** descomposición de la variabilidad de la variable dependiente Y en una suma de cuadrados del modelo y una suma de cuadrados residual o del error. De particular interés es la prueba de la F de Snedecor y su valor de P asociado, que prueban la significancia estadística del modelo ajustado. Un Valor de P pequeño (menor de 0.05 al trabajar con un nivel de significancia del 5%) indica que existe una relación significativa de la forma especificada entre X e Y.

- **Estadísticas:** estadísticas de resumen para el modelo ajustado, incluyendo:

**R-cuadrada:** representa el porcentaje de la variabilidad en Y que ha sido explicado por el modelo de regresión ajustado, que va de 0% a 100%.

**R-cuadrada ajustada:** se trata del estadístico R-cuadrada ajustado para el número de coeficientes en el modelo. Este valor se usa frecuentemente para comparar modelos con diferente número de coeficientes.

**Error Estándar del estadístico:** La desviación estándar estimada de los residuos (las desviaciones alrededor del modelo). Este valor se usa para crear límites de predicción para nuevas observaciones.

Por último, como ayuda para visualizar todo lo anterior se extrae la gráfica del modelo ajustado. La gráfica incluye:

- **La línea de mejor ajuste** o de la ecuación de predicción. Ésta es la ecuación que se usa para predecir valores de la variable dependiente Y dados valores de la variable independiente X (línea de color azul).

- **Intervalos de confianza** para la respuesta media en X. Estos son los límites interiores y describen con qué grado de precisión se ha estimado la localización de la línea dada la muestra de datos disponible. Conforme aumenta el tamaño n de la muestra, estos límites se harán más estrechos, y se debe advertir también que el ancho de los límites varía en función de X (líneas de color rojo).

- **Límites de predicción** para nuevas observaciones. Estos son los límites exteriores y describen la precisión con la que se puede predecir dónde estaría una nueva observación (líneas de color rosa).

## Regresión Polinomial: altura1 y pvarilla2

Variable dependiente: altura1  
Variable independiente: pvarilla2  
Orden del polinomio = 2

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	2,21531	0,242263	9,14422	0,0000
pvarilla2	1,12602	0,393897	2,85867	0,0053
pvarilla2 <sup>2</sup>	-0,319243	0,150936	-2,11509	<b>0,0371</b>

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,16834	2	1,08417	7,65	<b>0,0008</b>
Residual	13,1823	93	0,141745		
Total (Corr.)	15,3506	95			

Tabla 31: Coeficientes del modelo de predicción de grado 2 entre las variables altura1 y pvarilla2

R-cuadrada = 14,1254 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 12,2787 por ciento

Error estándar del est. = 0,37649

Para determinar si el orden del polinomio es apropiado, hay que ver que el valor-P en el término de mayor orden es igual a 0,037096. Puesto que es menor de 0,05, el término de mayor orden es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95%. Por lo tanto, este modelo de predicción es representativo de la correlación.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{altura1} = 2,21531 + 1,12602 \cdot \text{pvarilla2} - 0,319243 \cdot \text{pvarilla2}^2$$

Ecuación 10: Modelo de predicción entre las variables altura1 y pvarilla2

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica el 14,1254% de la variabilidad en altura1. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 12,2787%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,37649.

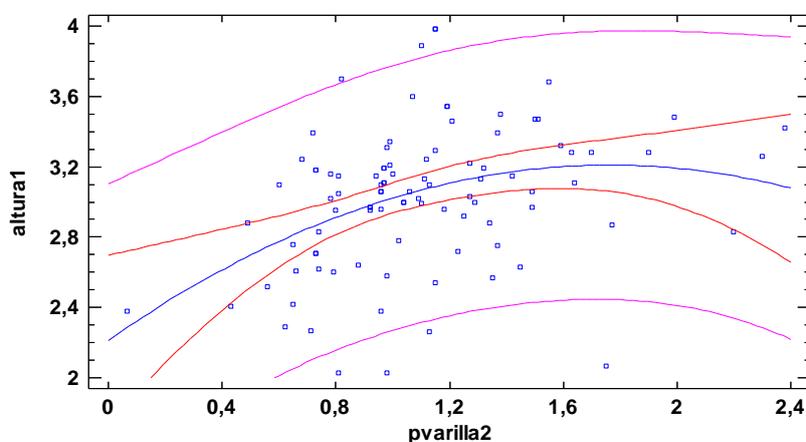


Figura 82: Gráfica del modelo ajustado de grado 2 entre las variables altura1 y pvarilla2

## Regresión Polinomial: altura1 y gap

Variable dependiente: altura1

Variable independiente: gap

Orden del polinomio = 2

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	2,66803	0,324963	8,21024	0,0000
gap	2,07167	1,11542	1,8573	0,0664
gap^2	-2,29923	0,906044	-2,53766	<b>0,0128</b>

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,53168	2	1,26584	9,18	<b>0,0002</b>
Residual	12,8189	93	0,137838		
Total (Corr.)	15,3506	95			

Tabla 32: Coeficientes del modelo de predicción de grado 2 entre las variables altura1 y gap

R-cuadrada = 16,4924 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 14,6965 por ciento

Error estándar del est. = 0,371265

Para determinar si el orden del polinomio es apropiado, hay que ver que el valor-P en el término de mayor orden es igual a 0,0128232. Puesto que es menor de 0,05, el término de mayor orden es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95%. Por lo tanto, este modelo de predicción es representativo de la correlación.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{altura1} = 2,66803 + 2,07167 \cdot \text{gap} - 2,29923 \cdot \text{gap}^2$$

Ecuación 11: Modelo de predicción entre las variables altura1 y gap

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica el 16,4924% de la variabilidad en altura1. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 14,6965%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,371265.

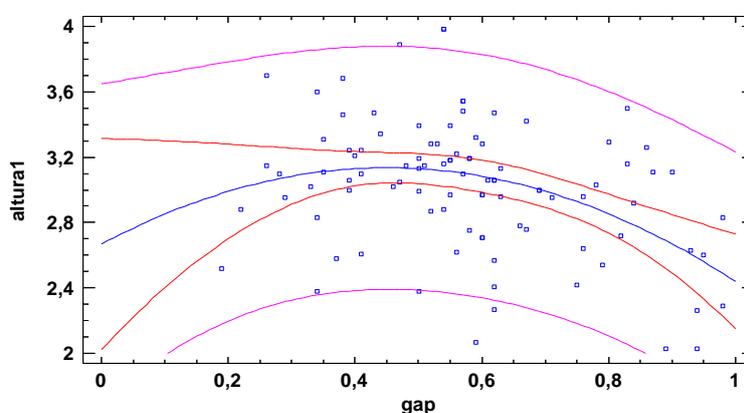


Figura 83: Gráfica del modelo ajustado de grado 2 entre las variables altura1 y gap

## Regresión Polinomial: altura2 y pchapa2

Variable dependiente: altura2

Variable independiente: pchapa2

Orden del polinomio = 2

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	3,37473	0,135413	24,9218	0,0000
pchapa2	-0,539264	0,178833	-3,01547	0,0033
pchapa2 <sup>2</sup>	0,10182	0,0460523	2,21096	0,0295

### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,49195	2	1,24598	9,78	0,0001
Residual	11,849	93	0,127408		
Total (Corr.)	14,3409	95			

Tabla 33: Coeficientes del modelo de predicción de grado 2 entre las variables altura y pchapa2

R-cuadrada = 17,3765 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 15,5997 por ciento

Error estándar del est. = 0,356943

Para determinar si el orden del polinomio es apropiado, hay que ver que el valor-P en el término de mayor orden es igual a 0,0294902. Puesto que menor de 0,05, el término de mayor orden es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95%. Por lo tanto, este modelo de predicción es representativo de la correlación.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{altura2} = 3,37473 - 0,539264 \cdot \text{pchapa2} + 0,10182 \cdot \text{pchapa2}^2$$

Ecuación 12: Modelo de predicción entre las variables altura2 y pchapa2

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica el 17,3765% de la variabilidad en altura2. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 15,5997%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,356943.

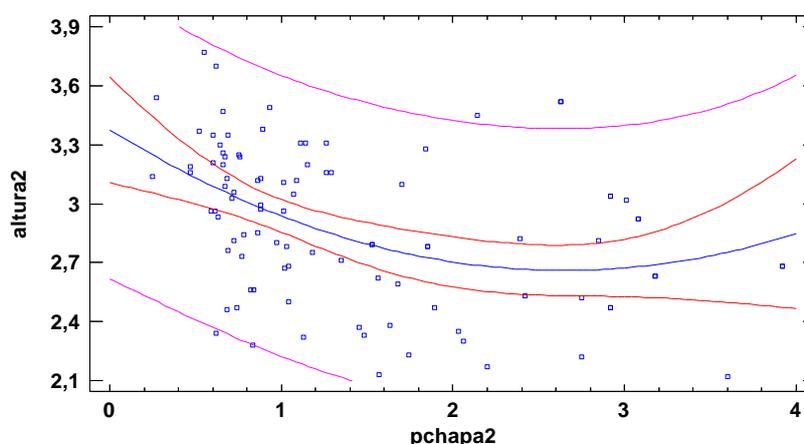


Figura 84: Gráfica del modelo ajustado de grado 2 entre las variables altura2 y pchapa2

## Regresión Polinomial: pchapa1 y pchapa2

Variable dependiente: pchapa1  
Variable independiente: pchapa2  
Orden del polinomio = 2

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	1,01257	0,305532	3,31411	0,0013
pchapa2	-0,0435719	0,403499	-0,107985	0,9142
pchapa2 <sup>2</sup>	0,152574	0,103908	1,46836	0,1454

Tabla 34: Coeficientes del modelo de predicción de grado 2 entre las variables pchapa1 y pchapa2

En este caso se observa que el orden del polinomio no es el más adecuado, debido a que el valor-P en el término de mayor orden es igual a 0,145381, siendo mayor de 0,05, lo que quiere decir que ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95% o mayor. Consecuentemente, se debe considerar reducir en 1 el orden del modelo.

Variable dependiente: pchapa1  
Variable independiente: pchapa2  
Orden del polinomio = 1

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	0,624582	0,154344	4,04668	0,0001
pchapa2	0,533743	0,0912707	5,84791	0,0000

### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	22,4543	1	22,4543	34,20	0,0000
Residual	61,7201	94	0,656596		
Total (Corr.)	84,1743	95			

Tabla 35: Coeficientes del modelo de predicción de grado 1 entre las variables pchapa1 y pchapa2

R-cuadrada = 26,6759 por ciento  
R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 25,8959 por ciento  
Error estándar del est. = 0,810306

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{pchapa1} = 0,624582 + 0,533743 * \text{pchapa2}$$

Ecuación 13: Modelo de predicción entre las variables pchapa1 y pchapa2

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica el 26,6759% de la variabilidad en pchapa1. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 25,8959%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,810306.

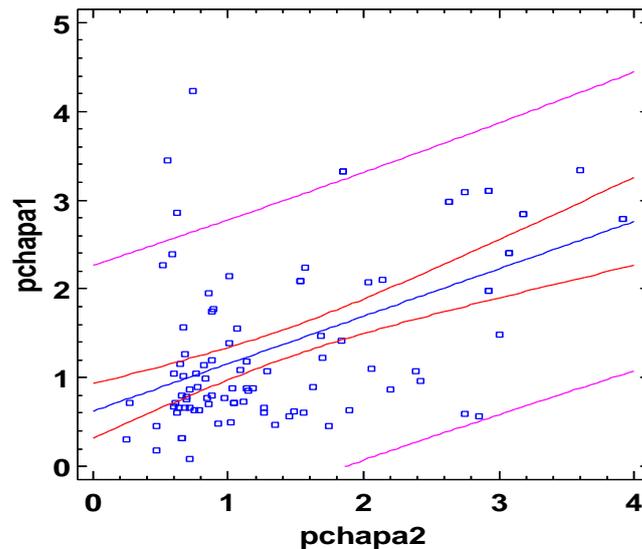


Figura 85: Gráfica del modelo ajustado de grado 1 entre las variables pchapa1 y pchapa2

### Regresión Polinomial: pchapa1 y pvarilla1

Variable dependiente: pchapa1  
Variable independiente: pvarilla1  
Orden del polinomio = 2

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	2,90256	0,650275	4,46359	0,0000
pvarilla1	-1,90611	0,94842	-2,00977	0,0474
pvarilla1 <sup>2</sup>	0,464653	0,314566	1,47712	<b>0,1430</b>

Tabla 36: Coeficientes del modelo de predicción de grado 2 entre las variables pchapa1 y pvarilla1

En este caso se observa que el orden del polinomio no es el más adecuado, debido a que el valor-P en el término de mayor orden es igual a 0,143021, siendo mayor de 0,05, lo que quiere decir que ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95% o mayor. Consecuentemente, se debe considerar reducir en 1 el orden del modelo.

Variable dependiente: pchapa1  
Variable independiente: pvarilla1  
Orden del polinomio = 1

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	2,02659	0,268473	7,5486	0,0000
pvarilla1	-0,540355	0,212531	-2,54248	<b>0,0126</b>

#### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	5,41605	1	5,41605	6,46	<b>0,0126</b>
Residual	78,7583	94	0,837854		
Total (Corr.)	84,1743	95			

Tabla 37: Coeficientes del modelo de predicción de grado 1 entre las variables pchapa1 y pvarilla1

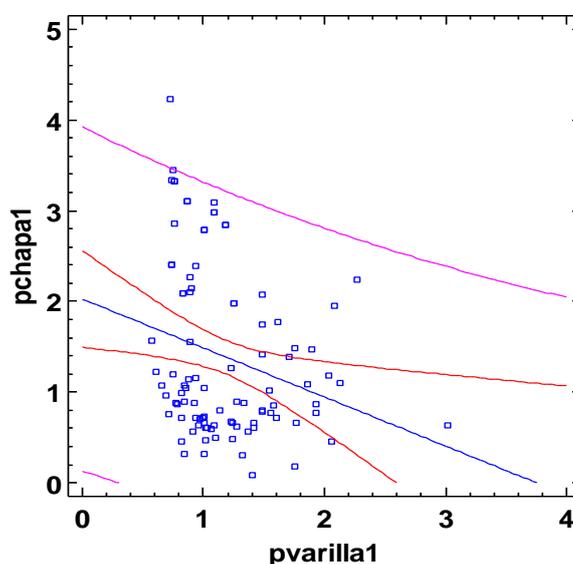
R-cuadrada = 6,43433 por ciento  
 R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 5,43895 por ciento  
 Error estándar del est. = 0,915344

La ecuación del modelo ajustado es:

$$pchapa1 = 2,02659 - 0,540355 * pvarilla1$$

*Ecuación 14: Modelo de predicción entre las variables pchapa1 y pvarilla1*

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica el 6,43433% de la variabilidad en pchapa1. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 5,43895%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,915344.



*Figura 86: Gráfica del modelo ajustado de grado 1 entre las variables pchapa1 y pvarilla1*

### Regresión Polinomial: pchapa1 y gap

Variable dependiente: pchapa1

Variable independiente: gap

Orden del polinomio = 2

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	-0,170849	0,803543	-0,21262	0,8321
gap	4,3683	2,75813	1,58379	0,1166
gap^2	-2,62406	2,24039	-1,17125	0,2445

*Tabla 38: Coeficientes del modelo de predicción de grado 2 entre las variables pchapa1 y gap*

En este caso se observa que el orden del polinomio no es el más adecuado, debido a que el valor-P en el término de mayor orden es igual a 0,24449, siendo mayor de 0,05, lo que quiere decir que ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95% o mayor. Consecuentemente, se debe considerar reducir en 1 el orden del modelo.

Variable dependiente: pchapa1  
Variable independiente: gap  
Orden del polinomio = 1

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	0,698445	0,308555	2,2636	0,0259
gap	1,19323	0,509606	2,34148	<b>0,0213</b>

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4,63889	1	4,63889	5,48	<b>0,0213</b>
Residual	79,5354	94	0,846122		
Total (Corr.)	84,1743	95			

Tabla 39: Coeficientes del modelo de predicción de grado 1 entre las variables pchapa1 y gap

R-cuadrada = 5,51105 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 4,50584 por ciento

Error estándar del est. = 0,919849

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{pchapa1} = 0,698445 + 1,19323 * \text{gap}$$

Ecuación 15: Modelo de predicción entre las variables pchapa1 y gap

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica el 5,51105% de la variabilidad en pchapa1. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 4,50584%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,919849.

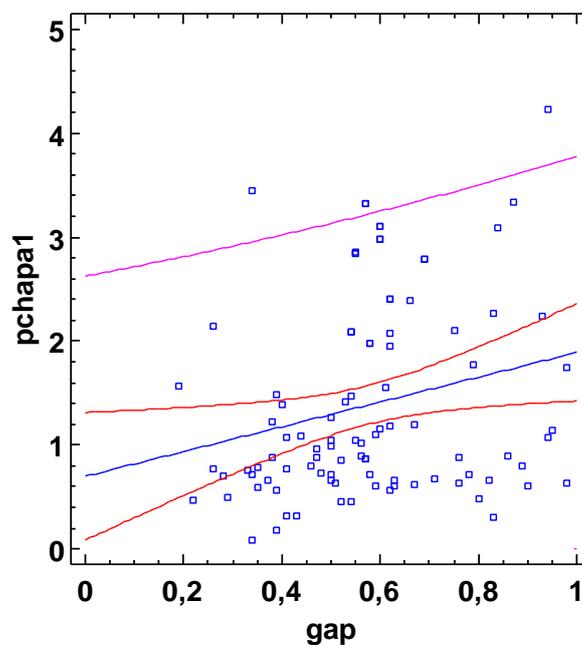


Figura 87: Gráfica del modelo ajustado de grado 1 entre las variables pchapa1 y gap

## Regresión Polinomial: pvarilla1 y pvarilla2

Variable dependiente: pvarilla1  
Variable independiente: pvarilla2  
Orden del polinomio = 2

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	0,953072	0,275638	3,45769	0,0008
pvarilla2	0,111267	0,448161	0,248274	0,8045
pvarilla2 <sup>2</sup>	0,0782484	0,171729	0,45565	0,6497

Tabla 40: Coeficientes del modelo de predicción de grado 2 entre las variables pvarilla1 y pvarilla2

En este caso se observa que el orden del polinomio no es el más adecuado, debido a que el valor-P en el término de mayor orden es igual a 0,649704, siendo mayor de 0,05, lo que quiere decir que ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95% o mayor. Consecuentemente, se debe considerar reducir en 1 el orden del modelo.

Variable dependiente: pvarilla1  
Variable independiente: pvarilla2  
Orden del polinomio = 1

Parámetro	Estimado	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	0,842188	0,128893	6,53402	0,0000
pvarilla2	0,30921	0,10966	2,81972	0,0059

### Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1,44659	1	1,44659	7,95	0,0059
Residual	17,1026	94	0,181942		
Total (Corr.)	18,5491	95			

Tabla 41: Coeficientes del modelo de predicción de grado 1 entre las variables pvarilla1 y pvarilla2

R-cuadrada = 7,79868 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 6,81782 por ciento

Error estándar del est. = 0,426547

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{pvarilla1} = 0,842188 + 0,30921 * \text{pvarilla2}$$

Ecuación 16 Modelo de predicción entre las variables pvarilla1 y pvarilla2

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 7,79868% de la variabilidad en pvarilla1. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 6,81782%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,426547.

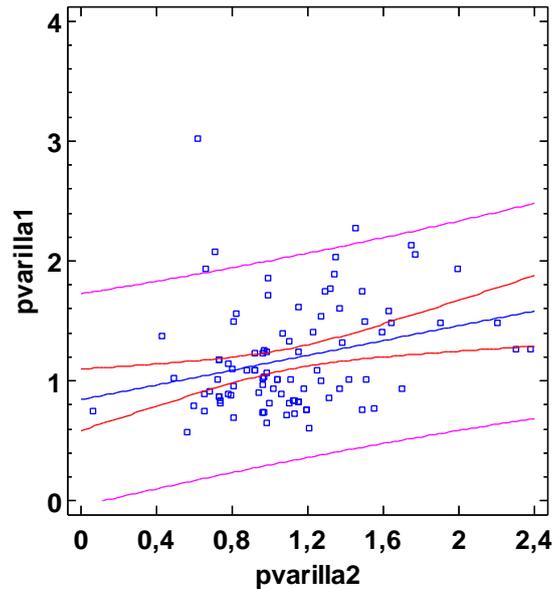


Figura 88: Gráfica del modelo ajustado de grado 1 entre las variables pvarilla1 y pvarilla2

## 5.6. Conclusiones.

Tras el estudio realizado sobre las correlaciones existentes entre las 9 variables cuantitativas se extraen una serie de conclusiones:

- Los porcentajes de correlación entre las variables (R-Cuadrada) son en general bajos, siendo el mayor de ellos de 26,6759%, correspondiente a la relación entre la variable penetración en la chapa 1 y penetración en la chapa 2. Esto significa que el porcentaje restante 73,3241% ( $100 - 26,6759$ ) es debido a otro tipo de variables que no se han tenido en cuenta. Por lo tanto, no se puede predecir con la exactitud necesaria una variable en función de su variable dependiente.
- La información que sí que va a resultar valiosa a la hora de modificar los parámetros del robot de soldadura es el sentido en que una variable se ve afectada dependiendo de cómo varía su variable dependiente. Por ejemplo, conociendo la ecuación de predicción entre la penetración en chapa 1 y la penetración en chapa 2:

$$pchapa1 = 0,624582 + 0,533743 * pchapa2$$

Ecuación 17: Modelo de predicción entre las variables pchapa1 y pchapa2

Se observa como si aumenta pchapa2 aumentará pchapa1, es decir, se ven afectadas en el mismo sentido ante un cambio.

- Este análisis ha servido para conocer más en profundidad el comportamiento de cada uno de los medibles que se requieren cumplir en la soldadura MAG, llegando a resumir en una serie de ecuaciones y gráficas la gran cantidad de datos que al inicio se tenían y que aparentemente no aportaban ninguna valor añadido adicional.



## 6. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Pau Miró. (2005). *Técnicas Estadísticas para el control y la mejora de la calidad en el sector Textil: aplicación en la manta y la napa*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.
- [2] Primitivo Reyes. (2006). *PPAP: Proceso de aprobación para la producción de partes. Sección 2 – Requerimientos del PPAP*. 4ª edición. Universidad Iberoamericana.
- [3] G.E.P. Box, W.G. Hunter y J.S. Hunter. (1989). *Estadística para experimentadores*. Barcelona: Ed. Reverté.
- [4] Humberto Gutiérrez y Román de la Vara. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México D.F.: Ed. McGraw-Hill.
- [5] Carmen Bataner y Carmen Díaz. (2008). *Análisis de datos con Statgraphics*. Granada: Ed. La Gioconda.
- [6] J.F.Hair, R.E. Anderson, R.L.Tatham. (1999). *Análisis multivariante de datos*. Ed. Pearson Prentice-Hall. 5ª Edición.
- [7] T.C. Oshima and F. McCarty. (2000). *Factorial Analysis of Variance and Statistically Significant Interactions: What's the next step?*. Georgia State University.
- [8] Francisco J.Tejedor. (2003). *Aplicaciones diversas del análisis de la varianza (ANOVA)*. Madrid: Ed. La Muralla.
- [9] Institut Tècnic Català de la Soldadura. Artículo: *Soldadura aplicada a la Automoción*. Consultado el 4 de Febrero del 2017. Disponible en:  
<http://www.itcsoldadura.org/es/detalle/programas/96/soldadura-aplicada-a-la-automocion>
- [10] Arturo Ruiz-Falcó. (2006). *Fundamentos estadísticos del control estadístico de procesos*. Universidad Pontificia de Comillas Madrid.
- [11] Salvador Naya. (2004). *Índices robustos de calidad. Cómo medir la capacidad de un proceso*. Departamento de Matemáticas (Área de Estadística e Investigación Operativa). Universidad de A Coruña.
- [12] Noemí Ferreri y Marta Quaglino. (2011). *Propiedades distribucionales de índices de capacidad de procesos bajo distribuciones no normales*. Decimosextas Jornadas "Investigaciones en la Facultad" de Ciencias Económicas y Estadística.
- [13] Pablo Martin (2008). *Metodología para el diseño de experimentos (DOE) en la industria*. Servicio de publicaciones de la Universidad de Navarra. Disponible en:  
[dadun.unav.edu/bitstream/10171/20532/1/Martin%20Tanco.pdf](http://dadun.unav.edu/bitstream/10171/20532/1/Martin%20Tanco.pdf)
- [14] Augusto Pereira. (2009). *Análisis predictivo de datos mediante técnicas de regresión estadística*. Proyecto Fin de Máster en Ingeniería Informática para la Industria. Universidad Complutense de Madrid.

[15] Luis Alberto Esquivel. (2009). *Proceso de soldadura por el método de resistencia para la manufactura de chasis en la industria automotriz. Proyecto Fin de Máster en Ingeniería mecánica. Instituto Politécnico Nacional de México.*

[16] Mónica Martínez y Manuel Marí. (2007). *El papel probabilístico normal. Departamento de estadística e investigación operativa aplicadas y calidad. Universidad Politécnica de Valencia.*

[17] Juan Carlos García Díaz. (2016-2017). *Apuntes asignatura "Ingeniería de Calidad". Máster de Ingeniería Industrial, especialidad en Organización y Gestión Industrial. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia.*

[18] *Manual de usuario Statgraphics Centurion XVI. Statpoint Technologies, INC. Disponible en: [www.statgraphics.net/wp-content/uploads/.../Centurion-XVI-Manual-Principal.pdf](http://www.statgraphics.net/wp-content/uploads/.../Centurion-XVI-Manual-Principal.pdf)*

Trabajo Final de Máster en Ingeniería Industrial

# PRESUPUESTO

---

**ANÁLISIS Y MEJORA CONTINUA DE LA CALIDAD DE PROCESOS  
DE SOLDADURA MEDIANTE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS EN UN  
PROVEEDOR DEL SECTOR DE LA AUTOMOCIÓN**

Iván Blay Solano



# ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

---

1. PRESUPUESTO PARCIAL DE MANO DE OBRA.....	1
2. PRESUPUESTO PARCIAL DE AMORTIZACIÓN DE EQUIPOS.....	2
3. PRESUPUESTO PARCIAL DE RECURSOS MATERIALES. ....	2
4. PRESUPUESTO TOTAL.....	3



## 1. PRESUPUESTO PARCIAL DE MANO DE OBRA.

En este apartado se calcula el coste inherente de todo el personal que se ha visto implicado en el proyecto, ya sea en su totalidad o tan solo en una parte de él. A continuación se va a listar y especificar cuál ha sido la función de cada uno de los implicados.

- Ingeniero de calidad (mano de obra indirecta):

Se trata del autor del TFM, y se ha encargado de: organizar y coordinar todos los experimentos y ensayos llevados a cabo, recopilar la información necesaria para poder mejorar la calidad de los procesos de soldadura en la empresa, realizar el análisis posterior con el software estadístico y la extracción de conclusiones finales.

- Ingeniero industrial (mano de obra indirecta):

Se trata del tutor del TFM, y sus funciones han sido: guiar al alumno en el desarrollo del proyecto, realizar un análisis crítico del proyecto y dar soporte al alumno en la utilización de las herramientas estadísticas, todo ello basándose en su experiencia en el mundo de la ingeniería de la calidad.

- Ingeniero de procesos (mano de obra indirecta):

Su principal función ha sido de apoyo a la hora de determinar qué parámetros modificar y a que niveles situarlos, basándose en su conocimiento previo en el campo de la soldadura, es decir, en las máquinas de soldadura y en piezas anteriores de características similares.

- Inspector de calidad (mano de obra directa):

Sus tareas han sido básicamente realizar los ensayos pertinentes en cada caso: rotura por tracción de tuercas, rotura por par de tuercas y metalografía de cordones de soldadura, lo cual incluye corte de piezas más análisis con el Welding Expert.

- Jefe de equipo de montaje (mano de obra directa):

Sus tareas han consistido en modificar los parámetros tras recibir las indicaciones por parte del ingeniero de procesos y realizar los cambios de útiles necesarios dependiendo de la pieza que se necesitaba soldar.

- Operario de soldadura:

Sus principales tareas son colocar las piezas de semi-acabado en el útil de soldadura, presionar los mandos de marcha de la máquina de soldadura durante el tiempo requerido y una vez soldada la pieza retirarla del útil y pasarla por la rampa poka-yoke, la cual guía la pieza hasta el contenedor de acabado.

Para calcular la cantidad de horas de implicación del inspector de calidad se ha multiplicado el número de ensayos realizados por su duración. Y en el caso del jefe de equipo de montaje análogamente se ha multiplicado el número de variaciones realizadas por el tiempo de cambio.

Se utilizan los salarios como base para calcular el coste de mano de obra.

Concepto	Precio unitario (€/hora)	Cantidad (horas)	Total (€)
Ingeniero de calidad	15	300	4.500
Ingeniero industrial	30	30	900
Ingeniero de procesos	15	12	180
Inspector de calidad	12	16	192
Jefe de equipo de montaje	12	4	48
Operario de soldadura	10	2	20
<b>TOTAL (€)</b>			<b>5.840</b>

## 2. PRESUPUESTO PARCIAL DE AMORTIZACIÓN DE EQUIPOS.

En este presupuesto se incluye el coste de la amortización de los equipos o programas utilizados durante la realización del proyecto. A continuación se va a detallar cuál ha sido la utilidad de cada uno de los equipos empleados.

- Licencia Welding Expert:

Software necesario para la realización de los ensayos metalográficos, con el cual se obtienen los reportes donde se detalla el análisis de la soldadura MAG.

- Licencia StatGraphics:

Software empleado para el análisis estadístico de los distintos problemas abordados en el TFM: ANOVA de un diseño de experimentos y análisis multi-variable.

- Microscopio:

Sistema óptico de captura de imagen digital con óptica invertida que tiene por objetivo mejorar los ajustes de luz complicados a la hora de tomar imágenes de superficies metálicas.

- Máquina de soldadura:

Máquina de tipo estático, destinada a la soldadura de tuercas por protuberancias, su potencia es de 250 kVA. Los parámetros son modificados a través de un PLC ligado a la máquina.

- Robot de soldadura:

Robot asignado a la soldadura de tipo MAG, todos los parámetros y las coordenadas de localización de la unión que se va a soldar se programan mediante una unidad CNC.

- Máquina de tracción:

Máquina universal de ensayos tracción-compresión, la cual va ligada a un PC que registra el esfuerzo realizado y el valor hasta la rotura.

- Tronzadora:

Máquina empleada para realizar los cortes transversales sobre los cordones de soldadura, una vez separados estos de la pieza en sí.

Concepto	Precio unitario (€/ud.)	Cantidad (ud.)	Periodo de amortización (años)	Periodo de utilización (años)	Total (€)
Licencia Welding Expert	1.200	1	2	0,4	240
Licencia StatGraphics	6.000	1	3	0,2	400
Microscopio	8.000	1	10	0,4	320
Máquina estática	90.000	1	10	0,01	90
Robot de soldadura	210.000	1	10	0,03	630
Máquina de tracción	40.000	1	10	0,01	40
Tronzadora	3.000	1	10	0,4	120
<b>TOTAL (€)</b>					<b>1.840</b>

### 3. PRESUPUESTO PARCIAL DE RECURSOS MATERIALES.

Por último se calcula un presupuesto parcial con los bienes materiales utilizados. Aquí se incluyen principalmente los materiales empleados en los ensayos.

- Piezas ensayadas:

Se contabilizan las piezas acabadas, es decir, con la tuerca o el material de aporte ya soldados. El precio considerado por pieza es el de venta a cliente menos el precio al cual se vende dicha pieza ensayada como chatarra.

- Tornillos para ensayos:

A la hora de realizar el ensayo a tracción de una tuerca, se debe roscar un tornillo en su interior el cual será presionado por la máquina, ya que es la forma habitual de aplicar el esfuerzo de tracción directamente sobre la tuerca.

- Útil de ensayos:

Para ensayar la resistencia a tracción de las tuercas en la máquina universal de ensayos se requiere un útil en el cual apoyar la pieza de forma que se pueda cerrar la puerta de la máquina mientras se lleva a cabo la rotura y de esta forma evitar accidentes. Dicho útil es específico para cada pieza según su geometría.

- Discos de radial:

Se utilizan para cortar y separar el cordón de soldadura de la pieza en sí.

- Líquido para ataque químico:

Sirve para atacar el trozo de metal con el fin de ayudar a distinguir los distintos materiales que forman la muestra. El líquido específico que se utiliza se llama nital, compuesto por ácido nítrico y alcohol.

- Resina para almacenaje:

La muestra cortada se incluye en resina para su mejor tratamiento posterior y almacenado.

Concepto	Precio unitario (€/ud.)	Cantidad (ud.)	Total (€)
Piezas ensayadas tipo I	1	16	16
piezas ensayadas tipo II	2	96	192
Útil de ensayos	25	1	25
Discos de radial	5	3	15
Líquido ataque químico	8	1	8
Resina almacenaje	0,5	96	48
<b>TOTAL (€)</b>			<b>304</b>

## 4. PRESUPUESTO TOTAL.

El presupuesto total se calcula a partir del presupuesto de ejecución material, que consta de la suma de los presupuestos parciales.

Una vez se obtiene el presupuesto de ejecución material, se le suman los gastos generales, estimados en un 12%, y el beneficio industrial, estimado en un 6%, y con esto se calcula el presupuesto total de ejecución.

Finalmente se le suma el IVA, 21%, y así se habrá calculado el presupuesto base de licitación.

CONCEPTO	COSTE (€)
Presupuesto parcial de mano de obra	5.840,00
Presupuesto parcial de amortización de equipos	1.840,00
Presupuesto parcial de recursos materiales	304,00
<b>PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL</b>	<b>7.984,00</b>
Gastos Generales (12%)	958,08
Beneficio Industrial (6%)	479,04
<b>PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCIÓN</b>	<b>9.421,12</b>
IVA (21%)	1.978,44
<b>PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN</b>	<b>11.399,56</b>

Asciende el presupuesto base de licitación a la expresada cantidad de:

ONCE MIL TRESCIENTOS NOVENTA Y NUEVE EUROS CON CINCUENTA Y SEIS CÉNTIMOS.