

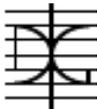
Trabajo de Investigación CST/MIH-18

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS DEL MODELO DE ANDREANSEN Y ANDERSEN MODIFICADO EN LAS CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS Y MECÁNICAS DE HORMIGONES CON FIBRAS.

Por:

Angelica María Uribe Espinosa

Febrero 2018

Autor/ Autor Angelica María Uribe Espinosa		Fecha/ Date Febrero 2018
Titulo/Title Análisis de la influencia de las curvas granulométricas del modelo de Andreansen y Andersen modificado en las características reológicas y mecánicas de hormigones con fibras.		
Directores del trabajo/ Supervisores: Pedro Serna Ros	Código/Code CST/MIH	N de páginas/Pages 105
Departamento/Department: INGENIERA DE LA CONSTRUCCION Y PROYECTOS DE INGENIERA CIVIL		
Universidad/University UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA		 
Palabras clave/Keyword Hormigón, Curvas Granulométricas, Empaquetamiento, Fibras,		
Código Unesco 3305/05 Ciencias tecnológicas / Tecnología de la construcción / Tecnología del Hormigón		

AGRADECIMIENTOS

A mi padre, Víctor Manuel Uribe, su lucha es mi lucha y saldremos vencedores de esta prueba. Mi madre Mary luz espinosa, mis hermanas Margarita y Lorena y mi nuevo corazón Gabriel, a mi esposo soltero Camilo, a todos mis compañeros de viaje que pusieron su granito ayudándome a amasar a desmoldar o a cargar, Y a mí asesor, el Dr. Pedro Serna Ros. quien siempre me dio todo el tiempo que necesite para culminar el trabajo, además de mostrarme la pasión de los materiales, y amar lo que se hace.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO.....	3
INDICE DE TABLAS.....	5
INDICE DE GRAFICOS	7
INDICE DE IMAGENES	9
INDICE DE ECUACIONES.....	10
1 RESUMEN	11
2 INTRODUCCION	12
2.1 Justificación.....	12
2.2 Objetivos	13
2.2.1 Objetivo general	13
2.3 Estructura del documento	14
3 ESTADO DEL ARTE	15
3.1 Introducción al estado del arte.....	15
3.2 El hormigón reforzado con fibras	16
3.2.1 Fibras de Polipropileno.....	19
3.2.2 Fibras Metálicas.....	20
3.2.3 Propiedades Mecánicas de los Hormigones con fibra.	21
3.2.4 Interacción matriz-fibra de los Hormigones con fibra.	23
3.2.5 Dosificación, amasado y puesta en obra de los Hormigones con fibra	23
3.2.6 Evaluación de los Hormigones con fibras.....	25
3.3 Aplicación de los principios estadísticos al control de calidad del hormigón	27
3.3.1 Principios Estadísticos.	27
3.4 Reología	30
3.5 Agregados en el hormigón.....	31
3.5.1 Propiedades físicas	32
3.6 Empaquetamiento	35
3.6.1 Modelos de empaquetamiento.....	36
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGIA	46

4.1	Programa general.....	47
4.2	Metodología.....	50
4.2.1	Materiales utilizados	50
4.2.2	Ajuste y Dosificación.....	55
4.2.3	Fabricación de hormigón.....	64
4.2.4	Ensayos Determinación de propiedades en estado fresco y endurecido	66
5	RESULTADOS Y ANALISIS	69
5.1	Caracterización Hormigón Estado fresco.....	69
5.1.1	Ensayo de consistencia del hormigón en estado fresco por cono de Abrams 69	
5.2	Caracterización Hormigón Estado Endurecido	77
5.2.1	Ensayo de resistencia a la compresión.....	77
5.2.2	Ensayo de resistencia a la Flexo tracción.	84
6	CONCLUSIONES	101
6.1	Hormigón en estado fresco	101
6.2	Hormigón en estado endurecido.....	102
6.3	Conclusión general.....	102
7	FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION	103
8	BIBLIOGRAFIA	104

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Bandas granulométricas de agregado grueso para hormigón estructural del artículo de INVIAS 630 para concreta estructura</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 2 Bandas granulométricas, de la norma UNE EN.</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 3 coeficientes f para el modelo Bolomey.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4 Curvas de Andersen y Andreansen modificadas equivalentes a Boolomey y Fuller</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 5 Resumen Plan De Ensayos.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 6 Amasadas realizadas en la primera etapa.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 7 Amasadas realizadas en segunda etapa.</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 8 Total ensayos realizados.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 9 Principales propiedades de las fibras usadas en el procedimiento experimental ...</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 10 Porcentajes que pasan por el tamiz de la serie UNE EN 933 del árido conjunto disponible en laboratorio.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 11 Porcentaje que pasa, para las curvas teóricas de A&A TM 10mm.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 12 Porcentaje que pasa, para las curvas teóricas de A&A TM 20mm.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 13 Dispersión obtenida para cada uno de los ajustes realizados.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 14 Dosificaciones para el hormigón A f'c 25 MPa TMN 20 mm</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 15 Dosificaciones para el hormigón B f'c 40 Mpa TMN 10 mm</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 1 Resultados Cono De Abrams Hormigón Tipo A, Primera fase</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 2 Resultados Cono De Abrams Hormigón Tipo B, Primera fase</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 3 Resultados Cono de Abrams Hormigón Tipo A, Primera fase.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4 Resultados Cono De Abrams Hormigón Tipo A, Segunda Fase</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 5 Resultados Cono De Abrams Hormigón Tipo B, Primera Fase.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 6 Resultados Cono De Abrams Hormigón Tipo B, Segunda Fase.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 7 Resultados a Compresión hormigón Tipo A con fibras Dramix 65-5D.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 8 Resultados a Compresión hormigón Tipo A con fibras Sika Fiber M38</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 9 Resultados a Compresión hormigón Tipo B con fibras Acero 80/30</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 10 Resultados a Compresión hormigón Tipo A con fibras Dramix 65-5D.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 11 Resultados a Compresión hormigón Tipo A con fibras Sika Fiber M38</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 12 Resultados a Compresión hormigón Tipo A, Segunda Fase.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 13 Resultados a Compresión hormigón Tipo B con fibras Acero 80/30</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 14 Resultados a Compresión hormigón Tipo B Segunda Fase.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 15 Resistencia Limite Hormigón Tipo A con fibras Dramix 65 -5D</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 16 Resistencia Limite Hormigón Tipo A con fibras Sika Fiber M38.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 17 Resistencia Limite Hormigón Tipo B con fibras Acero 80/30.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 18 Resistencia Limite Hormigón Tipo A con fibras Dramix 65 -5D</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 19 Resistencia Limite Hormigón Tipo A con fibras Sika fiber M38</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 20 Resistencia Límite Hormigón Tipo A Segunda Fase</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 21 Resistencia Limite Hormigón Tipo B con fibras Acero 80/30.....</i>	<i>89</i>

<i>Tabla 22 Resistencia Límite Hormigón Tipo B Segunda Fase</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 23 Resistencias Residuales Hormigón Tipo A con fibras Dramix 65 -5D</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 24 Resistencias Residuales Hormigón Tipo A con fibras Sika Fiber M38.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 25 Resistencias Residuales Hormigón Tipo B con fibras Acero 80/30</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 26 Resistencias Residuales Hormigón Tipo A con fibras Dramix 65 -5D</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 27 Resistencias Residuales Hormigón Tipo A con fibras Sika fiber M38</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 28 Resistencias Residuales Hormigón Tipo A Segunda Fase</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 29 Resistencias Residuales Hormigón Tipo B con fibras Acero 80/30</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 30 Resistencias Residuales Hormigón Tipo B Segunda Fase</i>	<i>99</i>

INDICE DE GRAFICOS

<i>Ilustración 1 Curva granulométrica dibujada a partir del modelo de fuller</i>	40
<i>Ilustración 2 Curva granulométrica calculada a partir del modelo matemático de Bolomey</i>	42
<i>Ilustración 3 Comparación modelos A&A, Bolomey y Andersen y Andreanse modificado.</i> ..	45
<i>Ilustración 4 Curva Granulométrica Filler Calizo.</i>	51
<i>Ilustración 5 Curva granulomerica arena la castellana.</i>	52
<i>Ilustración 6 Curva granulometrica gravas 4/7 , 7/12 , 12/20.</i>	52
<i>Ilustración 7 Curvas granulométricas Arenas De Corrección</i>	53
<i>Ilustración 8 Curvas granulométricas A&A TM 10</i>	57
<i>Ilustración 9 Curvas granulométricas experimentales TM 10.</i>	57
<i>Ilustración 10 Curvas granulométricas A&A TM 20</i>	58
<i>Ilustración 11 Curvas granulométricas experimentales TM 20.</i>	59
<i>Ilustración 12 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.45 TIPO A</i>	61
<i>Ilustración 13 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.40 TIPO A</i>	61
<i>Ilustración 14 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.30 TIPO A</i>	61
<i>Ilustración 15 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.35 TIPO A</i>	61
<i>Ilustración 16 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.25 TIPO A</i>	61
<i>Ilustración 17 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.20 TIPO A</i>	61
<i>Ilustración 18 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.45 TIPO B</i>	62
<i>Ilustración 19 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.40 TIPO B</i>	62
<i>Ilustración 20 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.35 TIPO B</i>	62
<i>Ilustración 21 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.30 TIPO B</i>	62
<i>Ilustración 22 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.25 TIPO B</i>	62
<i>Ilustración 23 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.20 TIPO B</i>	62
<i>Ilustración 1 Diagrama De Barras demanda de aditivo Hormigón A con fibras Dramix 65 5D</i>	71
<i>Ilustración 2 Diagrama De Barras demanda de aditivo Hormigón A con fibras Sika Fiber M</i> <i>38</i>	71
<i>Ilustración 3 Diagrama De Barras demanda de aditivo Hormigón B con fibras Dramix 80/30</i>	72
<i>Ilustración 4 Diagrama de Puntos demanda de aditivo Hormigón Tipo A, Primera fase</i>	73
<i>Ilustración 5 Resultados Cono De Abrams Hormigo Tipo A, Segunda Fase</i>	74
<i>Ilustración 6 Diagrama de Puntos demanda de aditivo Hormigón Tipo A, Segunda fase</i> ...	74
<i>Ilustración 7 Diagrama de Puntos demanda de aditivo Hormigón Tipo B, Primera fase</i>	75
<i>Ilustración 8 Resultados Cono De Abrams Hormigo Tipo B, Segunda Fase</i>	76
<i>Ilustración 9 Diagrama de Puntos demanda de aditivo Hormigón Tipo B Primera fase</i>	76
<i>Ilustración 10 Diagrama de Barras Resultados a Compresión Hormigón Tipo A con fibras</i> <i>Dramix 65-5D.</i>	77

<i>Ilustración 11 Diagrama de Barras Resultados a Compresión Hormigón Tipo A con fibras Sika Fiber M38.....</i>	<i>78</i>
<i>Ilustración 12 Diagrama de Barras Resultados a Compresión Hormigón Tipo B con fibras Sika Acero 80/30</i>	<i>79</i>
<i>Ilustración 13 Diagrama de Barras Resultados a Compresión Hormigón Tipo A con fibras Sika Dramix 65-5D.....</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 14 Diagrama de Barras Resultados a Compresión hormigón tipo A, con fibra Sika Fiber M38.....</i>	<i>80</i>
<i>Ilustración 15 Diagrama de Barras Resistencia a Compresión Hormigón Tipo A, Segunda Fase</i>	<i>81</i>
<i>Ilustración 16 Diagrama de Barras Resultados a Compresión hormigón tipo B, con fibra Acero 80/30</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 17 Diagrama de Barras Resultados a Compresión Hormigón Tipo B, Segunda Fase</i>	<i>83</i>
<i>Ilustración 18 Diagrama de Barras Resistencia Limite Hormigón Tipo A con fibras Dramix 65-5D.....</i>	<i>84</i>
<i>Ilustración 19 Diagrama de Barras Resistencia Limite Hormigón Tipo A con fibras Sika Fiber M38.....</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 20 Diagrama de Barras Resistencia Limite Hormigón Tipo B con fibras Sika Acero 80/30</i>	<i>86</i>
<i>Ilustración 21 Diagrama de Barras Resistencia Limite Hormigón Tipo A con fibras Sika Dramix 65-5D</i>	<i>87</i>
<i>Ilustración 22 Diagrama de Barras Resistencia Limite hormigón tipo A, con fibra Sika Fiber M38.....</i>	<i>87</i>
<i>Ilustración 23 Diagrama de Barras Resistencia Limite Hormigón Tipo A, Segunda Fase.....</i>	<i>88</i>
<i>Ilustración 24 Diagrama de Barras Resistencia Limite Hormigón tipo B, con fibra Acero 80/30</i>	<i>89</i>
<i>Ilustración 25 Diagrama de Barras Resistencia Limite Hormigón Tipo B, Segunda Fase.....</i>	<i>90</i>
<i>Ilustración 26 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo A Dramix 65-5D (Primera Fase) Modulo 0,25</i>	<i>91</i>
<i>Ilustración 27 Diagrama de barras resistencias residuales Hormigón Tipo A Dramix 65 (Primera Fase) Modulo 0,30</i>	<i>91</i>
<i>Ilustración 28 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo A Sika Fiber M38 (Primera Fase) Modulo 0,25</i>	<i>92</i>
<i>Ilustración 29 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo A Sika Fiber M38 (Primera Fase) Modulo 0,30</i>	<i>92</i>
<i>Ilustración 30 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo B Acero 80/30 (Primera Fase) Modulo 0,30</i>	<i>93</i>
<i>Ilustración 31 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo B Acero 80/30 (Primera Fase) Modulo 0,35</i>	<i>94</i>

<i>Ilustración 32 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo A Dramix 65-5D (Primera Fase) 60 Kg/m³.....</i>	<i>95</i>
<i>Ilustración 33 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo A Dramix 65-5D (Primera Fase) 30 Kg/m³.....</i>	<i>95</i>
<i>Ilustración 34 Diagrama de Barras Resistencias residuales Tipo A con fibras Sika fiber M38 5 Kg/m³</i>	<i>96</i>
<i>Ilustración 35 Diagrama de Barras Resistencias residuales Sika fiber M38 10 Kg/m</i>	<i>96</i>
<i>Ilustración 36 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo A Segunda Fase</i>	<i>97</i>
<i>Ilustración 37 Diagrama de Barras Resistencias residuales Tipo B con fibras Acero 80/30 50Kg/m³</i>	<i>98</i>
<i>Ilustración 38 Diagrama de Barras Resistencias residuales Tipo B con fibras Acero 80/30 100Kg/m³</i>	<i>99</i>
<i>Ilustración 39 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo B Segunda Fase</i>	<i>99</i>

INDICE DE IMAGENES

<i>Imagen 1 , capazos con material para fabricacion.</i>	<i>50</i>
<i>Imagen 2 Betocarb P1-BE.</i>	<i>51</i>
<i>Imagen 3 Gravas cantera los serranos</i>	<i>52</i>
<i>Imagen 4 Arenas correctoras.</i>	<i>53</i>
<i>Imagen 5 De izquierda a derecha: SIKA FIBER M38, DRAMIX 80/30, DRAMIX 60 5D.....</i>	<i>54</i>
<i>Imagen 6 De arriba abajo DRAMIX 80/30 , DRAMIX 60 5D , SIKAFIBER M38.....</i>	<i>54</i>
<i>Imagen 7 Mezcladora estacionaria DIEM WERKE DZ180V</i>	<i>65</i>
<i>Imagen 8 Cámara de curado No 1 ICITECH</i>	<i>65</i>
<i>Imagen 9 Fabricación de probetas de hormigón.....</i>	<i>65</i>
<i>Imagen 10 Ensayo de asentamiento en el cono de Abrams.....</i>	<i>66</i>
<i>Imagen 11 Molde y horno para refrentado con azufre</i>	<i>66</i>
<i>Imagen 12 Máquina de compresión IBER TEST</i>	<i>67</i>
<i>Imagen 13 Posición deformímetro y entalla en las vigas prismáticas para ensayo de flexo tracción.</i>	<i>67</i>
<i>Imagen 14 Salida de datos, software WINTEST</i>	<i>68</i>
<i>Imagen 15 Montaje ensayo de flexión tracción INSTRON.....</i>	<i>68</i>

INDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1 promedio estadístico</i>	<i>27</i>
<i>Ecuación 2 Variabilidad estadística</i>	<i>28</i>
<i>Ecuación 3 Coeficiente de variación</i>	<i>28</i>
<i>Ecuación 4 Densidad de empaquetamiento</i>	<i>35</i>
<i>Ecuación 5 Modelo fuller</i>	<i>39</i>
<i>Ecuación 6 Modelo de Andreansen y Andersen.....</i>	<i>41</i>
<i>Ecuación 7 modelo de Bolomey.....</i>	<i>42</i>
<i>Ecuación 8 Modelo de Andreansen y Andersen modificado</i>	<i>43</i>
<i>Ecuación 9 Dispersión</i>	<i>59</i>
<i>Ecuación 10 Matriz Solución Ajuste de Áridos.....</i>	<i>60</i>

1 RESUMEN

Este estudio informa los efectos del empaquetamiento de agregados en las propiedades en estado fresco y endurecido de dos tipos de hormigones 40 y 25 MPa con fibras metálicas y de polipropileno, se usó el modelo de Andreansen y Andersen modificado variando su módulo de distribución (q) de 0,20 a 0,45 de 0,05 en 0,05 para determinar la tendencia, los resultados experimentales mostraron que las mejoras en las características mecánicas se presentan para el menor módulo (q) evaluado; respecto a las características en estado fresco se determinó que disminuir el módulo de distribución (q) aumenta la demanda de aditivo en la mezcla.

Para cumplir los objetivos propuestos, luego de definir el modelo apropiado para el estudio se ajustaron los áridos disponibles en el laboratorio para cada una de las curvas teóricas correspondientes a los diferentes módulos de distribución elegidos, con las curvas experimentales obtenidas se fabricaron todas las amasadas y se evaluaron en estado fresco con el ensayo de cono según la norma UNE EN 12350-2, y en estado endurecido según la norma UNE EN 12350 para la resistencia a compresión y con una adaptación de la norma UNE EN 14651 para la resistencia a flexo tracción, el proceso descrito anteriormente se realizó en dos fases: En la primera fase se realizaron las dosificaciones variando el contenido y tipo de fibra, y para la segunda fase se fijó un contenido y un tipo de fibra variando únicamente el módulo (q).

2 INTRODUCCION

2.1 Justificación

El hormigón es el material mayormente utilizado en la industria de la construcción y probablemente seguirá siéndolo, esto debido a sus prestaciones mecánicas, su facilidad para dar forma, la disponibilidad de sus componentes en la mayor parte del mundo y que su fabricación es un proceso poco complejo, sin embargo el hormigón tradicional siempre ha tenido el defecto de no poder resistir mecánicamente los esfuerzos de tracción con la misma magnitud que los esfuerzos a compresión, ($F_t = 10\% f'_c$ para hormigones convencionales), esta característica ha llevado a la utilización del hormigón armado, como un material compuesto que tiene características mecánicas a tracción y compresión óptimas, sin embargo armar el hormigón no es la única manera de mejorar sus propiedades mecánicas a tracción, además en ciertos elementos donde no se conoce la distribución de esfuerzos, la posición del acero puede ser incierta, entre otras dificultades también se encuentra la debilidad de las barras de acero frente a la durabilidad, para estos casos la solución propuesta es adicionar fibras de refuerzo (FRC) al hormigón estas pueden tener diferentes materiales y propiedades geométricas, las fibras se distribuyen aleatoriamente durante el amasado con el propósito de brindar al hormigón una capacidad residual y una rotura más dúctil en su estado fisurado.

En los últimos años, el interés por el empaquetado de las partículas ha aumentado en las diferentes áreas de la ingeniería, entre ellas la ingeniería del hormigón este interés puede ser explicado por el hecho que los hormigones que se fabrican diariamente contienen partículas de diferentes formas y tamaños. Estas partículas deberán organizarse de tal manera que modifiquen positivamente las características de los hormigones tanto en estado fresco como en estado endurecido este comportamiento depende parcialmente de las propiedades de las partes que lo componen y de las interacciones entre ellas /P. Stroeven y M. Stroeven-1999/.

En los dos párrafos anteriores se ha descrito el interés actual de los temas que se investigaron en el siguiente estudio, los hormigones con fibras y el concepto de empaquetamiento en sus propiedades reológicas y mecánicas.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

El principal objetivo de este trabajo Final de Master consiste en evaluar y analizar cambios en las propiedades reológicas y mecánicas de hormigones con fibras en función de la modificación del módulo de distribución (q) en el modelo de empaquetamiento de Andreansen y Andersen.

2.2.1.1 Objetivos específicos

Estos objetivos se han establecido producto de la necesidad de cumplir el objetivo general.

- ❖ Obtener a partir de los áridos disponibles en el laboratorio el mejor ajuste respecto a las curvas teóricas planteadas.
- ❖ Realizar las dosificaciones de hormigón adecuadas para cada una de las curvas planteadas, eligiendo el tipo y la cuantía de fibras convenientes para lograr el objetivo.
- ❖ Análisis del comportamiento de los hormigones dosificados bajo los siguientes parámetros.
 - Evaluación en estado fresco a partir del ensayo UNE EN 12350.
 - Evaluación de las propiedades del hormigón endurecido a los 28 días de edad con la determinación de:
 - Resistencia a la flexión adaptación del método UNE EN -14651.
 - Resistencia a la compresión UNE EN-12350.
- ❖ Relacionar los resultados obtenidos de los ensayos planteados con la variación del módulo (q) de distribución en el modelo de Andreansen y Andersen.

2.3 Estructura del documento

- Capítulo I: Contiene la introducción del presente trabajo dividida en dos numerales los cuales son la Justificación y los Objetivos.
- Capítulo II: Corresponde al estado del arte, se incluyen en los temas principales las propiedades de las fibras, propiedades mecánicas y reológicas del hormigón con fibras, y el concepto de empaquetamiento., siendo estos los temas principales, pero con sub contenidos de estos mismos.
- Capítulo III: Se explica la campaña experimental realizada para llevar a cabo los objetivos propuestos, condiciones, procedimientos y ensayos.
- Capítulo IV: Se muestran resumidos y conceptualizados los resultados obtenidos en la fase experimental, mediante las figuras y tablas correspondientes.
- Capítulo V: Se presentan las conclusiones fruto del análisis de datos, experiencias recogidas en la fase experimental, y contextualización con el estado del arte.

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 Introducción al estado del arte

En la práctica profesional es común que la mejora de las propiedades del hormigón en estado endurecido y fresco se centre en la modificación de componentes como el cemento , las adiciones y los aditivos, sin embargo parece que en la mayoría de los casos se ignora el mayor componente del hormigón que son los áridos conformando en algunos casos hasta el 80%, de la matriz total, No solo la mala elección de la fuente ,de la forma , o de sus características mecánicas si no la proporción y cantidad de sus tamaños puede producir efectos perjudiciales en el hormigón como los que se enumeran a continuación:

- Segregación por la presencia en exceso de agregados gruesos.
- Sangrado de agua alrededor de los agregados con tamaños mayores y en la superficie.
- Asentamiento de los agregados y separación de la pasta.
- Demanda excesiva de aditivos químicos.
- Mayor uso de cemento.
- Insuficiente entrada de aire para la distribución de vacíos en el hormigón.
- Porosidad excesiva en el hormigón endurecido.
- Disminución de la vida útil.
- Aumento de costes.

Para evitar estas condiciones indeseables, es necesario evaluar las proporciones de los diferentes materiales, así como la los rangos de calidad, tipos y tamaños de agregados , es por esto que el estado del arte fundamenta la importancia de los agregados finos y gruesos en las mezclas de hormigón , explicando el embalaje teórico de las partículas y un conjunto de modelos que describen curvas granulométricas para la optimización de mezclas de hormigón , estos modelos tienen un estudio amplio para la acomodación de áridos en la estructura de hormigón teniendo en cuenta su tamaño , y con esto obtener una mezcla con mejores propiedades a la que no se ha dosificado pensando en un modelo adecuado , la experiencia al estudiar esto es que al ponerse en práctica los modelos antes mencionados se mejora la trabajabilidad, permeabilidad , durabilidad, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión, entre otras características del hormigón.

pero además de presentar estos modelos se realizó una introducción al hormigón que atañe a nuestro estudio: El hormigón con fibras, el estado del arte contiene una introducción sobre el concepto de fibras y sus modificaciones en las propiedades del hormigón fresco y endurecido, su forma de adherencia, como se dosifica y los conceptos que son importantes conocer para analizar y concluir el estudio.

3.2 El hormigón reforzado con fibras

“El hormigón reforzado con fibras (HRF) es aquel que incluye en su matriz fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa, cuyo fin es mejorar algunas prestaciones, ya sea en estado fresco, primeras edades o en estado endurecido” [1] (EHE-08).

El hormigón presenta su mayor debilidad en su comportamiento mecánico frente a esfuerzos a tracción, por lo que el empleo de fibras para mejorar la isotropía del material no es algo desconocido, de hecho se conoce que desde 1540 A.D.C en Caldea en los adoquines realizados en barro y endurecidos con el calor del sol se empleaban fibras de paja, en algunas comunidades también se utiliza el pelaje de diferentes animales para luego ser mezclado con yeso ,el fibro cemento también hizo su aparición en 1900 a cargo de Ludwig Hatschej consistía en una pasta de cemento a la que se le añadían trazas de asbesto en fibras, normalmente en proporciones medias del 15% esto para aumentar la resistencia a flexo tracción de esta pasta de 2 a 4 veces y realizar con ello elementos que no tendrían problemas de fisuración y tendrían una alta resistencia, esto se realizó hasta que se descubrió el daño a la salud que producía el asbesto , por lo que su uso fue prohibido en distintos países, pero aquí la inclusión de fibras no iba a parar fue entonces en 1935 cuando se producen las primeras fibras de nylon y se populariza el interés por las fibras sintéticas ya que estas copiaban las fibras naturales y eran más baratas, aunque su primera aplicación correspondía a los tejidos al pasar del tiempo estas fibras empezaron a usarse para mejorar diferentes elementos de construcción, hasta la utilización masificada y extendida que se da en la actualidad dada a las diferentes ventajas que estas confieren al hormigón y que serán explicadas a continuación.

Las fibras que se emplean en el hormigón convencionalmente se vierten de manera aleatoria por lo no se orientan en ninguna dirección en partoular, este hecho añade al hormigón características mecánicas en todas las direcciones y además una homogeneidad en sus distribuciones de esfuerzos frente al hormigón sin fibras.

La efectividad de la acción reforzante y la eficacia en la transmisión de tensiones depende de muchos factores, pero, especialmente, de la naturaleza y el tipo de fibra empleado, las fibras actualmente empleadas pueden ser minerales, orgánicas y metálicas, la Figura 1 resume la clasificación de las fibras según la Norma EHE

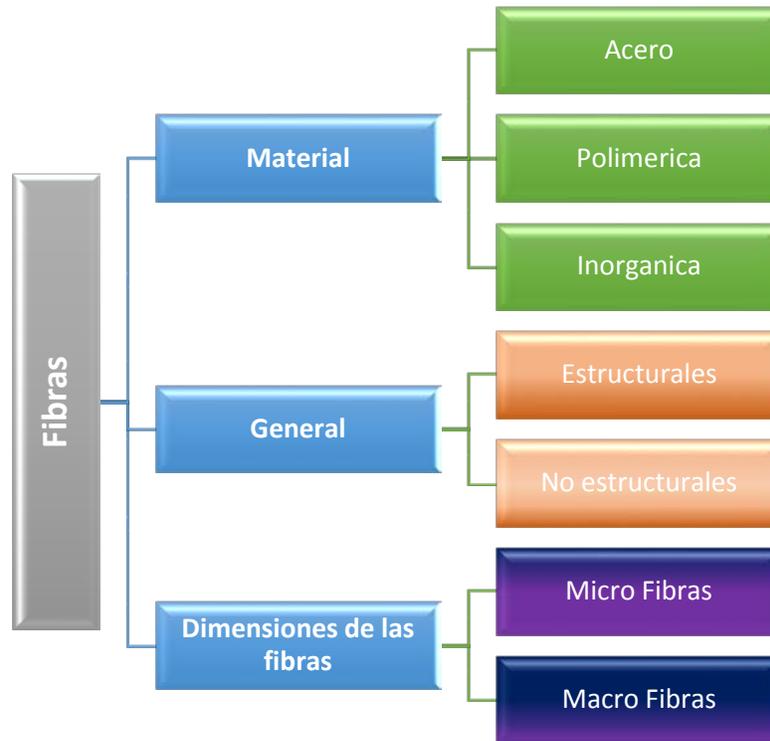


Figura 1 tipos de fibras y clasificación (anejo 14 EHE 08)

La geometría de las fibras también tiene un peso importante en el comportamiento del hormigón. Existen fibras lisas, dobladas, laminadas, trefiladas etc., en la Figura 2 se muestran las geometrías más usadas en el momento

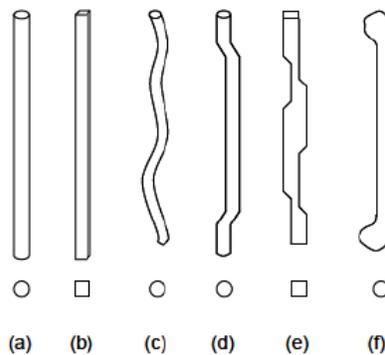


Figura 2 Formas de las fibras de acero: a) sección circular, b) sección rectangular, c) sección ondulada, d) extremos conformados, e) de extractos fundidos y f) extremos ensanchados (Hammant, 1978)

Además de los anteriores aspectos se ha establecido un parámetro numérico denominado esbeltez, que es la relación que existe entre la longitud de la fibra y su diámetro equivalente, es decir, el diámetro del círculo cuya sección es equivalente a la superficie de la fibra. Los aspectos normales oscilan entre 30 y 150, este valor dependerá del material de la fibra, de las solicitaciones del hormigón, y del tamaño del árido, de este valor depende en gran

medida la ductilidad y la tenacidad del hormigón reforzado con fibras. en la Figura 3 puede apreciarse la relación entre la esbeltez y la energía absorbida.

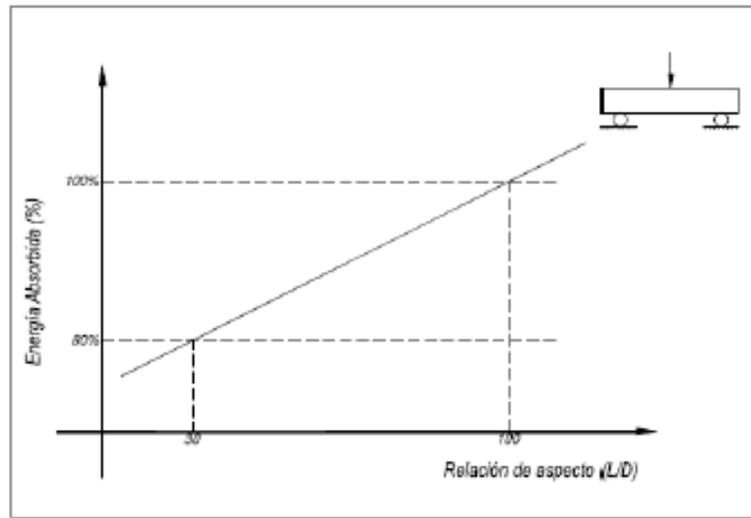


Figura 3 Relación entre esbeltez de fibras y energía absorbida /Maccaferri 2005/

Normalmente, la longitud de la fibra se recomienda que sea como mínimo 2 veces el tamaño del árido mayor. Es normal el empleo de longitudes de 2.5 a 3 veces el tamaño máximo de árido. Además, el diámetro de las tuberías de bombeo exige que la longitud de la fibra sea inferior a 2/3 del diámetro del tubo, sin embargo, la longitud de la fibra debe ser suficiente para dar una adherencia necesaria a la matriz y evitar arrancamientos.

En este estudio se utilizaron fibras de acero y fibras poliméricas, en ambos casos las fibras utilizadas fueron macro fibras, las fibras poliméricas son no estructurales y las fibras de acero son fibras estructurales de alto rendimiento, la geometría de las fibras poliméricas corresponde al numeral (a) mostrado en la Figura 2 y la de las fibras de acero corresponden a la mostrada en numeral (d).

3.2.1 Fibras de Polipropileno

Como se estableció en la introducción a este capítulo la industria de la construcción ya desde 1990 tenía interés en el uso de fibras poliméricas, como una alternativa al refuerzo de acero en las estructuras de hormigón, debido a la escasez y el alto precio que presentaba el acero en la época, partiendo de esto podemos decir que el hormigón con fibras sintéticas, posee numerosas ventajas respecto a otras fibras de diferentes materiales, como las siguientes:

- Son ligeras
- Mejoran la resistencia al impacto.
- Presentan una baja conductividad,
- No se corroen por lo que pueden exponerse a ambientes agresivos.
- Excelente protección contra la fisuración por retracción plástica.
- Aumentan la tenacidad del hormigón, proporcionando mejoras posteriores en la resistencia
- Mejoran la resistencia residual post fisuración.

La clasificación de las fibras sintéticas se puede resumir en el siguiente listado esquemático.

- Según su composición química
- Poliolefinas o polialquenos: Se obtienen de la polimerización de olefina (alqueolos)
- Poliamidas: Se obtienen de enlaces de Amida.

Según Su tamaño

- MACRO (de poliolefinas)
- MICRO (de polipropileno, grupo de las poliolefinas).

Sin embargo, las fibras poliméricas a pesar de poseer grandes ventajas también presentan debilidades, como las que se enumeran a continuación:

- Su modulo elástico es mucho menor que las fibras de acero, la cual conduce a una mayor desviación y ancho de la fisura.
- Son sensibles a la luz solar, se debe cuidar su almacenamiento y exposición.
- Poca adherencia a la matriz.
- Sensibilidad a las altas temperaturas.

A pesar de las siguientes desventajas este tipo de fibra es cada vez más usada en elementos constructivos, pero todavía representa un reto para sus comercializadores posicionarla por encima de las que se componen de otros materiales.

3.2.2 Fibras Metálicas

Las fibras de acero son elementos de corta longitud y pequeña sección que se adicionan al hormigón durante el amasado para mejorar ciertas propiedades que el hormigón tradicional no posee/José Hop 2000/.

Las fibras metálicas, pero más concretamente las de acero, son actualmente las más usadas en la industria esto es porque son las más eficaces, gracias a las propiedades mecánicas que el acero posee, un módulo de elasticidad diez veces superior al del hormigón, una buena adherencia a la pasta, alto alargamiento de rotura y facilidad la mezclar., La matriz fibra de los hormigones con fibras de acero posee una resistencia a tracción y un módulo mucho mayor que el hormigón tradicional, de hecho, la adherencia matriz fibra es mucho mejor que la de los hormigones tradicionales reforzados con barras de acero.

Las fibras de acero deben ser conformes con la norma UNE 83500-1.

Según su proceso de fabricación, la EHE-08 [1] las clasifica en:

- Trefiladas (Tipo I) (El más común)
- Cortadas en láminas (Tipo II)
- Extraídas por raspado en caliente (Virutas de acero) (Tipo III)
- Fundición Tipo IV

Sección

- Circular constante
- Rectangulares constante
- Variable

Otros aspectos que pueden clasificar

- Inoxidable o no
- Sueltas o en paquetes
- Rectas o con conformaciones.

Otros aspectos a mencionar: su forma influye en la adherencia, la longitud se define según su uso y procedimiento de vertido en obra, por ejemplo, en bombeo se debe encontrar un tamaño para que el hormigón pueda fluir a través de la manguera.

3.2.3 Propiedades Mecánicas de los Hormigones con fibra.

Los cambios de un hormigón sin fibras frente a uno que las contenga son diversos, los hormigones con fibras, presentan mayor deformación, de esta manera tienen un comportamiento post fisura, que mejora su resistencia a la tracción y ayudan a que no se propaguen las fisuras; en la Figura 4, se ve como se modifica el diagrama carga deformación de tres vigas, frente a esfuerzos a flexión respecto a su contenido de fibras.

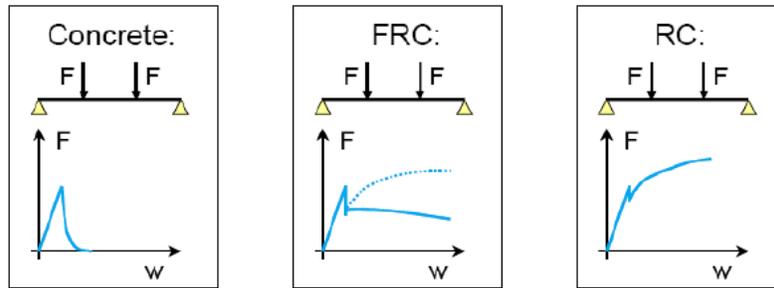


Figura 4 comparación curvas esfuerzo a tensión vigas biapoyadas / Maccaferri 2005/

Otros de los cambios que presenta el hormigón con fibras es el cambio en el estado no lineal, dado que el hormigón pasa de ser un material frágil a un material dúctil., las fibras influyen además en la disminución de fisuras; y aumentando la capacidad de mantener deformaciones sostenidas bajo esfuerzos sin llegar al colapso (aumento de la tenacidad). Esto convierte al HRF en un material muy adecuado frente a acciones dinámicas y frente a situaciones que requieran un alto control de la fisuración

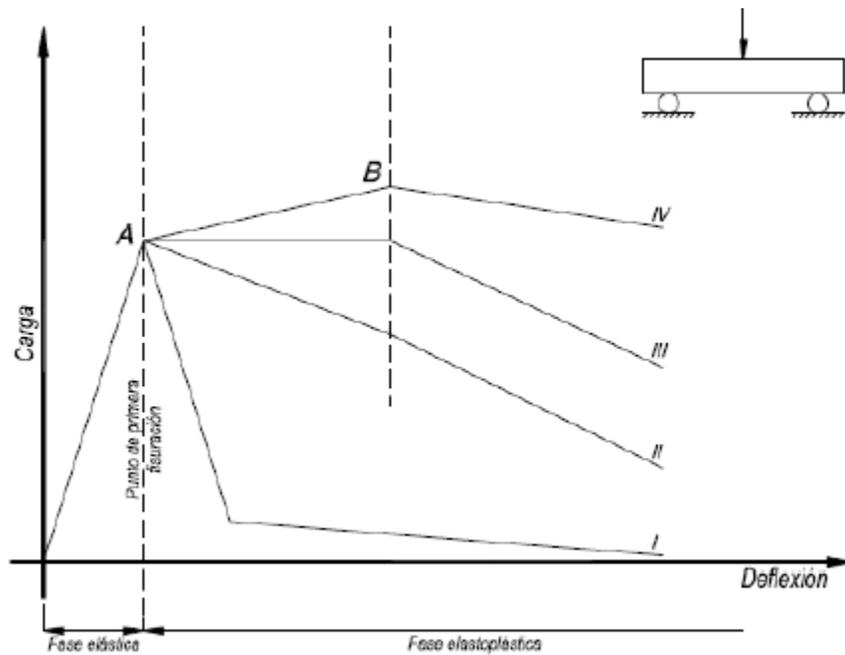


Figura 5 Carga vs Deflexión de hormigones sin refuerzo y hormigones reforzados Maccaferri 2005/

Para entender cómo trabajan las fibras como refuerzo del hormigón se examina atentamente la curva tensión deformación del hormigón tradicional frente a la de hormigones con fibras en la Figura 5, se ve que todos los hormigones se comportan de una manera que es más o menos lineal hasta llegar al punto que corresponde a la aparición de la primera fisura, hasta este momento el hormigón con fibras y el hormigón tradicional no presentan ninguna diferencia significativa, pero si se sigue observando luego de presentarse este punto la curva se mueve a un punto más elevado llamado (última tensión de rotura), como se ve en la Figura 5, un hormigón tradicional después de alcanzar su última tensión de rotura, falla y termina su vida útil, pero el hormigón que incluye fibras alarga su vida útil empezando a ejercer por parte de las fibras un efecto de “cocido” en las fisuras.

Continuando con el análisis de la Figura 5 no solo es importante fijarse en la curva de carga vs deformación sino que también es importante atender el área debajo de la curva, ya que esta área es el índice de tenacidad del hormigón, el índice de tenacidad es una medida de la capacidad de absorción de energía del hormigón de fibras o mejor explicado básicamente es la energía requerida para flectar una probeta que puede tener una sección normalizada hasta alcanzar una deformación que es también normalizada. El índice de tenacidad de hormigones con volúmenes de fibras comprendidos entre el 1 y 2 % oscila entre 12 y 45, suele ser diez veces superior al del hormigón convencional.

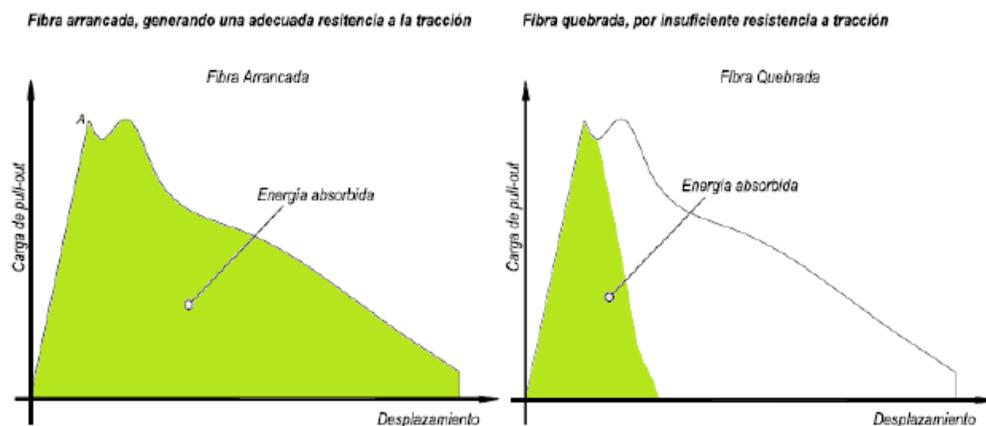


Figura 6 Influencia de la resistencia a tracción de las fibras sobre la energía absorbida /Maccaferri,2005/.

En el momento en que se inicia la fisuración en la zona traccionada de una viga de ensayo es cuando comienzan a trabajar las fibras y continúan haciéndolo hasta que rompen por tracción o deslizan por pérdida de adherencia.

Las fibras en el hormigón se posicionan aleatoriamente, y debido a esto pueden actuar como “ganchos” que enlazan dos partes de hormigón que estén siendo separadas por una acción producida, este efecto de cocido lo que hace en el fondo es seguir transmitiendo los

esfuerzos a lo largo del elemento. Sin embargo, la ventaja que presenta la aleatoriedad de la colocación de fibras puede ser en algunos casos una desventaja dado que, si se conoce que el elemento trabaja en una dirección específica, gran parte de las fibras no estarán trabajando por encontrarse repartidas en diferentes direcciones.

No solo la abertura de fisura o el quiebre de la fisura puede agotar la fibra, fenómenos como la pérdida de adherencia debida a la menor longitud de las fibras, también disminuyen el efecto de la fibra en el hormigón, sin embargo, los fabricantes de fibras ya han mejorado esto creando anclajes en sus productos.

3.2.4 Interacción matriz-fibra de los Hormigones con fibra.

En el numeral anterior se ha entendido que el comportamiento de las fibras después de la fisuración corresponde directamente a la adherencia de estas a la pasta, es decir a la interacción matriz fibra, estas se encargaran de transmitir los esfuerzos, cerrar las fisuras, y retrasar la falla total del elemento convirtiéndolo así en un material dúctil que como lo habíamos dicho requerirá mayor energía para ser deformado.

Para lograr que la interacción entre la fibra y la matriz sea la correcta hay un parámetro clave, y esa es la esbeltez de las fibras utilizadas, se ha leído que las modificaciones en esbeltez en la fibra elegida , pueden aumentar la resistencia al arrancamiento que es un parámetro clave para aumentar la adherencia, se demostró que tres fibras de esbeltez 100, obtuvieron una resistencia al arrancamiento un 50% mayor a la obtenida por una única fibra de esbeltez 75 y de volumen equivalente a las anterior /Giaccio, Giovambattista, & Zerbino, 1986/.

Se concluye de este numeral es que a pesar de que la interacción entre la pasta y las fibras, dependan de diferentes factores, el factor más determinante para esta adherencia es la esbeltez de la fibra, y su forma.

3.2.5 Dosificación, amasado y puesta en obra de los Hormigones con fibra

El hormigón reforzado con fibras de acero está formado generalmente por agua, un conglomerante hidráulico, áridos finos y gruesos , de ser necesario también aditivo, y por supuesto fibras discontinuas, estas últimas trabajan como una inclusión de área superficial diferente a los áridos que requiere al igual ser cubierta de pasta , esta es la razón por la que se reduce la docilidad en los hormigones con fibras , es por esto que se deben realizar todas las correcciones necesarias en las dosificaciones , para que la colocación de fibras sea efectiva y estén quedan completamente embebidas en la mezcla , lograr esto obliga a que

la proporción de agregados finos y gruesos sea la adecuada, diferentes estudios muestran que la proporción de finos se debe aumentar frente a la que se usa en un hormigón convencional aunque esto al final dependerá del aspecto y del volumen de fibras empleado a continuación se enumerara los principales parámetros a tener en cuenta para la fabricación del hormigón con fibras.

Método de adición de las fibras al hormigón:

Independientemente de la cuantía o el tipo de fibra es necesario que el método de adición de fibras al hormigón tenga como resultado una distribución uniforme de las mismas en la mezcla, esto para eliminar los peligros en cuanto a la formación de erizos, riesgos de segregación, y fragmentos del elemento sin fibras que no trabajen entre otros problemas,

Elección de fibras:

El aspecto, porcentaje, tamaño, y la esbeltez de las fibras deben ser elegidos según la necesidad de la obra el tamaño máximo del árido a usar su, granulometría, relación agua-cemento y sistema de colocación en obra.

Elección de los áridos:

la experiencia he investigaciones realizadas recomiendan aumentar el contenido de áridos finos para dosificar hormigones de fibras, esto con el fin de reducir el riesgo de segregación, aumentar la cohesión y facilitar la movilidad de las fibras a través de la matriz del hormigón

La (Japan Society of Civil Engineers) plantea un valor óptimo de tamaño máximo de áridos debe ser aproximadamente a la mitad de la longitud de la fibra /JSCE, 1984/.

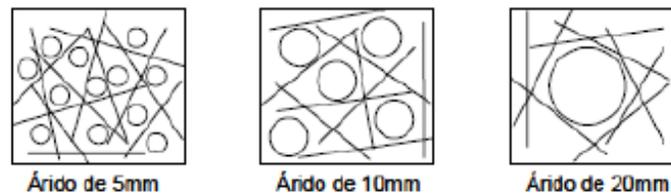


Figura 7 Efectos del tamaño de árido en la distribución de las fibras (Hannant, 1987)

Se recomienda que el tamaño máximo de los áridos no supere:

- $2/3$ de la longitud máxima de la fibra.
- $1/5$ del lado del elemento
- $3/4$ de la distancia libre entre la barra de armado

Amasado del hormigón:

Se ha comprobado que los hormigones son difíciles de trabajar cuando la cantidad de fibras de acero sobrepasa el 2 % en volumen absoluto de pasta, para la correcta distribución de las fibras y la hidratación total de cemento es conveniente que el amasado sea el correcto y tenga la energía y el tiempo mínimo para unificar todos los componentes y repartir uniformemente las fibras en toda la mezcla.

El amasado puede realizarse en una central hormigonera o también en un frente de obra, si se realiza en una central hormigonera solo bastara con añadir las fibras a la mezcla y amasar el conjunto durante un minuto y medio aproximadamente, si el amasado se realiza en un frente de obra las fibras serán las ultimas en ser añadidas y se mantendrá girando la hormigonera a todo velocidad durante un minuto y medio o hasta cerciorase que todo el cemento ha sido hidratado, que no se presenta acumulación de paquetes de fibras y que al observar el hormigón en cualquier punto este contenga fibras, este procedimiento puede repetirse si luego de la primera mezcla se ha tenido que añadir aditivo.

3.2.6 Evaluación de los Hormigones con fibras

Es importante en este punto anotar que todas las propiedades que son mencionadas anteriormente deben ser confirmadas y contraladas en los hormigones, para nuestro caso hemos evaluado la resistencia a flexo tracción, con la adaptación del método, UNE EN 14651 como será explicado en la metodología, además de esta propiedad se ha medido la resistencia a la compresión según UNE EN 12350-1:2009 y su comportamiento en estado fresco con el método de cono de Abrams UNE EN 12350-1:2009

3.2.6.1 Resistencia a tracción y capacidad y deformación

Una de las propiedades más importantes de medir, calificar y evaluar en los hormigones con fibras, es la resistencia a tracción del hormigón, dado que es esta característica en la que se fundamenta la adición de fibras al hormigón, el ensayo que se utilizara como ensayo para estudio y evaluación mide también la deformación en el tiempo en la una probeta que ha sido normalizada, como se puede ver en la Figura 8.

En modo de síntesis el ensayo que se ha elegido mide la resistencia a la flexión sometiendo una probeta entallada a mitad de su longitud total a un momento flector hasta que falle o su abertura sea lo suficientemente grande para considerarse dañada. el ensayo propuesto simula una viga con una sección definida pero que deberá cumplir la siguiente ley, una luz como mínimo 3 veces el espesor, finalmente el resultado que arroja este ensayo es el módulo de rotura que se mide en fuerza / área, en la Figura 8 se tiene un esquema del montaje y de valores de deformación para los que debe medirse la carga.

Cabe anotar que los ensayos a flexión suelen ser muy sensibles a la preparación manipulación y procedimientos de curado de las probetas esto se puede deber al peso de las vigas y si dificultad al ser manipulados y transportadas, la variación en las formaletas para fabricación de las muestras, la mala toma de medidas o la irregularidad de los prismas usados en general las características geométricas son muy importantes dado que el cálculo del esfuerzo requiere estas mediciones.

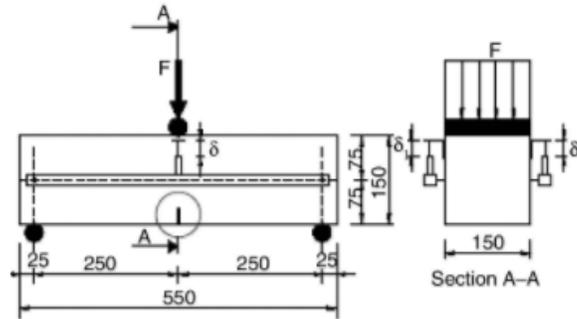


Figura 8 Montaje general ensayo de viga en tres puntos. EN 14651:2005

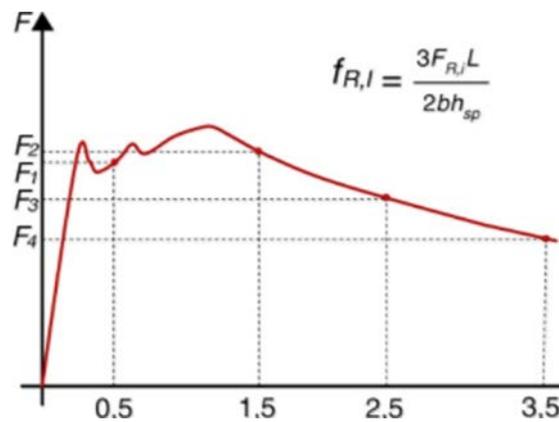


Figura 9 Curva de esfuerzo vs deformación para medir la resistencia a flexión EN 14651:2005

3.2.6.2 Resistencia a compresión

La investigación actual ha concluido que la inclusión de fibras no afecta la resistencia a la compresión del hormigón, y que de hecho en algunos casos esta podría verse reducida, sin embargo, se evaluó el hormigón con este parámetro debido a que el principal objetivo no es estudiar la adición de las fibras si no el conjunto de empaquetamiento que realiza junto a los áridos, además de eso la resistencia a compresión brinda otra información importante, como si la mezcla es o no homogénea, si se fabrican bien las amasadas y si estas han cumplido el mínimo de resistencia especificada.

La resistencia a la compresión es el método más extendido en el mundo para ordenar y aceptar el hormigón, de los ensayos de hormigón mayormente difundidos ha sido el de la aplicación de carga en un cilindro de medidas normalizadas, este cilindro debe ser fabricado cuidadosamente, como se ha explicado en el apartado de metodología dado que el método consiste en calcular el esfuerzo a partir de la aplicación de carga en el área total del cilindro, por lo que se debe garantizar el contacto total de la carga con la cara del cilindro, para garantizar esto el cilindro suele refrentarse con mortero de azufre, y nivelarse con neopreno.

3.3 Aplicación de los principios estadísticos al control de calidad del hormigón

3.3.1 Principios Estadísticos.

3.3.1.1 Consideraciones generales

En total hemos se presentaron más de 300 datos, esto no habría sido posible sin la herramienta que representa la estadística, para este estudio se han usado las herramientas básicas dado que a pesar que teníamos más de 300 datos la estadística se ha realizado individualmente y ha correspondido a cada una de las cinco muestras que hemos ensayado por amasada, en el estado endurecido del hormigón

Es importante aclarar que la estadística es una herramienta útil para organizar y comparar nuestros datos, pero esta herramienta no podrá tomar decisiones ni concluir, este trabajo estará a cargo del investigador que con sus criterio y experiencias que en el desarrollo del programa experimental ha obtenido

3.3.1.1.1 Parámetros estadísticos

Los dos parámetros estadísticos básicos que hemos utilizado, han sido los siguientes:

3.3.1.1.1.1 Promedio

Como tendencia central del valor de los ensayos se utiliza la media aritmética del conjunto de los resultados involucrados.

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^n x_i}{n}$$

Ecuación 1 promedio estadístico

3.3.1.1.1.2 Variabilidad

La desviación estándar o desviación típica, s , es definida como el índice de dispersión de la muestra obtenida, y se define con la siguiente ecuación, esta ecuación se ha usado para calcular la desviación estándar que ha sido el parámetro guía en nuestro TFM

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n x_i^2 - \frac{(\sum_1^n x_i)^2}{n}}{n - 1}}$$

Ecuación 2 Variabilidad estadística

En algunos fenómenos la variabilidad tiene cierta dependencia de la magnitud medida, para ello es más adecuado como índice de variación, el uso del coeficiente de variación en lugar de la desviación estándar, calculada seguir la ecuación siguiente.

$$v = \frac{s}{x} \cdot 100 (\%)$$

Ecuación 3 Coeficiente de variación

3.3.1.2 Dispersión

La dosificación de fibras se conoce como el factor principal cuando se analizan las variaciones dentro de una mezcla. Cuanto mayor sea la dosis utilizada, menor será la variación observada. Esto es fácilmente comprensible cuando se considera el hecho de que las altas dosis permiten una mezcla estadísticamente más uniforme con una variación de distribución de fibras reducida (más fibras cruzan la sección si la dosificación es más alta) / B. Parmentier 2008/.

La geometría, y en particular la profundidad de las muestras, es otro parámetro importante. Por un lado, la reducción de la longitud de la fibra ensayada aumenta la dispersión de los resultados, especialmente a bajas dosis debido al pequeño número de fibras que cruzan la grieta.

Por otro lado, la mejor orientación de las fibras (el llamado "efecto de pared", perpendicular a la profundidad) aumenta el rendimiento general del elemento. Según diferentes estudios sobre hormigón reforzado con fibra, se han observado coeficientes de variación entre 10 y 30% para pruebas de flexión dentro de una mezcla para una muestra con entalla (EN 14651 / RILEM). Y un coeficiente de variación superior al 20% / B. Parmentier 2008/.

3.3.1.3 Principales fuentes de variación de los ensayos

Respecto a una muestra tomada para cualquier ensayo normalizado.

- Toma inadecuada de la muestra que haga que se obtenga como tal una parte segregada de la mezcla que no corresponda a la calidad real del producto.
- Remezclado inadecuado de la muestra y toma para la confección de las probetas de ensayo por partes no homogéneas de esa muestra segregada por la propia operación de muestreo.
- Moldes de calidad deficiente; desgastados, deformados o hechos de materiales no apropiados o que pierdan por las juntas agua o pasta.
- Técnicas inadecuadas de llenado y compactación de los moldes en las que no se cumplen estrictamente los requisitos normativos, incluidas las características de la barra compactadora.
- Alteración del material de las probetas por inadecuado traslado prematuro de las mismas que pueden sufrir golpeteo o vibración por el transporte
- Conservación de las probetas antes de ser desmoldadas, en ambientes de temperaturas extremas, alejadas de las exigidas por las normas. Si los moldes están tapados las temperaturas altas producen un aceleramiento del desarrollo de resistencias y si por el contrario están destapados se produce una desecación que da resistencias iniciales altas (24horas) pero que disminuye la calidad del hormigón a la edad normativa de 28 días.
- Conservación de las probetas en algunos lapsos de tiempo entre el desmoldado y el ensayo en ambientes apropiados, principalmente en cuanto a temperatura; como sucede cuando hay retardos en el transporte de las probetas al laboratorio o cuando el ambiente de curado en este lugar no es apropiado.
- Desecación excesiva de las probetas por escalas del ambiente húmedo de conservación mucho tiempo antes del ensayo, o por mantenerlas durante este lapso en un ambiente desecante.
- Capas de refrentado excesivamente gruesas y/o mal colocadas.
- Mala ejecución del ensayo en sí mismo por mal centrado de la probeta en la prensa de ensayo, aplicación de la carga a velocidad inconveniente, a golpes de carga por mal manejo de las prensas manuales o deficiencia de las mismas.
- Prensas mal calibradas que pueden marcar cargas diferentes de las que están aplicando en realidad

Respecto a el ensayo UNE EN 14651-/Brite-Euram 2001/

- dosis de fibras;
- geometría de los especímenes probados (profundidad);
- método de prueba y parámetro observado;
- agregado y tamaño de fibra.

3.4 Reología

Como se verá en el capítulo de análisis de resultados las características del hormigón en estado fresco se han medido y analizado al igual que las características en estado endurecido, por lo que en este apartado se mencionan algunos de estudios que se han realizado sobre los cambios en las propiedades en estado fresco del hormigón respecto a su modelo de empaquetamiento.

La trabajabilidad del hormigón se relaciona con la movilidad o docilidad del mismo, y se define como la facilidad con que el hormigón puede ser colocado compactado y terminado con los medios disponibles en obra /Edgardo Souza-2008/.

La distribución del tamaño de partícula del agregado afecta significativamente las características frescas esto es porque la densidad de empaquetamiento puede afectar el área superficial específica del esqueleto granular que debe recubrirse con pasta de cemento.

Un aumento del área superficial granular puede dar como resultado una reducción en el espesor de la película de pasta que rodea las partículas sólidas, lo que conduce a una menor trabajabilidad o una mayor demanda de agua mezcla. En la literatura actual se acepta que con el incremento del tamaño máximo se reduce el requerimiento de agua para una consistencia determinada. No obstante, se recomienda limitar el tamaño máximo a 37,5mm para no afectar la trabajabilidad /Edgardo Souza-2008/.

El contenido de material que pasa por el tamiz de 300 μm de abertura (Nº 50) se debe ubicar en un entorno que garantice una mezcla cohesiva. Un exceso producirá incrementos en la demanda de agua y riesgo de fisuración; en tanto que en defecto conduce a problemas de segregación y de terminación. La mayoría de las especificaciones indican para el agregado fino un pasante en peso seco del agregado total del 10% al 30% /IRAM 1997/,/S.H. Kosmatka 2004/, si se emplea aire intencionalmente incorporado se puede reducir este valor a 5%.

El estudio de yahya ghasemi en 2007, concluyo que el uso de una combinación de áridos finos y gruesos con una alta densidad de empaquetamiento respecto a una de empaquetamiento medio redujo la demanda de la de agua en un 40% y también informo

que el aumento en la densidad de empaquetamiento de agregados combinados resultó en un aumento en el asentamiento.

En conclusión la distribución, el tamaño y la composición de las partículas sólidas, modifica las características reológicas del hormigón, el estudio ha concluido que al modificar el modelo de empaquetamiento estamos también modificando el área superficial que necesita ser cubierta con pasta , además de esto los tamaños pueden influir en otros fenómenos, el estudio también concluye que los hormigones con partículas grandes del mismo tamaño pueden presentar un alto riesgo de segregación, por lo que es importante tener en cuenta estos conceptos al analizar resultados en fresco, pero también en hormigón endurecido dado que un hormigón que presente dificultad en vibrar o que haya sido segregado no desarrollara su características convenientemente.

3.5 Agregados en el hormigón

“Comprender el papel de los agregados en el hormigón es fundamental para la producción un buen hormigón ya que los agregados tienen su mayor influencia en el rendimiento del hormigón fresco y endurecido”

(Alexander y Mindess, 2010).

El hormigón está constituido en su mayor parte por áridos estos se hacen presentes en (70 u 80) % de la matriz total , esto nos da un indicio de su función en el hormigón junto con los demás componentes como lo son el cemento , el agua libre, el aire naturalmente atrapado o los aditivos necesarios:, al estar en mayor proporción en la mezcla debemos saber y vigilar sus propiedades , es por esto que en este capítulo se presentara un estado del estudio de los agregados naturales, revisando los temas importantes como su origen , su clasificación, sus propiedades físicas y su comportamiento como un conjunto de ellos.

La terminología general nos dicta que los áridos o agregados son materiales presentes en el hormigón de forma granular, este material es inerte y puede ser de origen natural o artificial, es este material el que se une por medio de un conglomerante que usualmente es de activación hidráulica, estos y la pasta que se forme del conglomerante conforma el compacto conocido como hormigón.

Los áridos en el hormigón deberán tener condiciones mínimas para hacer parte del mismo, lo primero es que deberán tener una resistencia propia suficiente y no deberán interferir en las propiedades y características del hormigón de forma negativa, además de esto la superficie de este material deberá tener una suficiente adherencia a la pasta de cemento, los áridos del hormigón deberán ser inertes dado que no se puede desarrollar ninguna reacción con los demás constituyentes distinta a la de adherencia, los áridos se dividen en finos y gruesos, en el caso de los áridos finos se pueden considerar que aquellos cuya

fracción más fina presenta actividad en el desarrollo de la resistencia mecánica característica serán considerados y tratados como adiciones, estas podrían ser escorias de alto horno, sílice activo, humo de sílice, micro sílice entre otras muchas que se encuentra hoy presentes en el mercado.

3.5.1 Propiedades físicas

3.5.1.1 Granulometría

La distribución en función del tamaño que tienen las partículas presentes en el conjunto de áridos es llamada granulometría, y se determina mediante un análisis granulométrico, el método para determinar esto consiste en hacer pasar la muestra de áridos a través de mallas con diferentes tamaños, que también son llamados tamices, el resultado será la medida en porcentaje de los pesos retenidos en dichas mallas, y con estos constituirá la curva granulométrica.

3.5.1.2 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico básicamente es la acción de separar una muestra de partículas heterogéneas de tamaños formando fracciones de igual tamaño, en el ámbito de la ingeniería civil se suele separar primero en dos grandes grupos de áridos: arenas y gravas y a cada uno de estos grupos se le realiza la separación anteriormente nombrada, esta separación se hace pasando el material a través de una serie de tamices que tienen aberturas características, el tamaño y forma de estas aberturas se ajustará a la norma del país que corresponda, además del tipo de material y la función que este cumplirá.

Sin embargo, todas las normas de granulometría guardan estos conceptos, lo primero es que la serie general de tamices se basa en que la abertura de un tamiz deberá guardar la misma relación entre el siguiente o el anterior.

En Colombia la serie de tamices que se emplea para agregados de hormigón según la norma INVIAS 630 2014, se ha establecido con una relación 1:2, la cual fue establecida por primera vez por Abrams en el juego de tamices americano, a continuación, el paralelo de tamices admitidos para la UNE y para INVE 640

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA (% PASA)						
Normal	Alterno	AG-1	AG-2	AG-3	AG-4	AG-5	AG-6	AG-7
63 mm	2,5 "	-	-	-	-	100	-	100
50 mm	2 "	-	-	-	100	95-100	100	95-100
37.5mm	1 1/2 "	-	-	100	95-100	-	90-100	35-70
25.0mm	1 "	-	100	95-100	-	35-70	20-55	0-15
19.0mm	3/4 "	100	95-100	-	35-70	-	0-15	-
12.5mm	1/2 "	90-100	-	25-60	-	10-30	-	0-5
9.5 mm	3/8 "	40-70	20-55	-	10-30	-	0-5	-
4.75mm	No.4	0-15	0-10	0-10	0-5	0-5	-	-
2.36mm	No.8	0-5	0-5	0-5	-	-	-	-

Tabla 1 Bandas granulométricas de agregado grueso para hormigón estructural del artículo de INVIAS 630 para concreto estructura

España usa los tamices referidos en la UNE EN 7050 , estos tamices han sido los usados para la realización de esta investigación.

Serie de tamices para hormigón		
Norma UNE 7050 Abertura (mm)	Norma ASTM C33-85	
	Nº	Abertura (mm)
80,00	3 in	76,2
40,00	1 1/2 in.	38,1
20,00	3/4 in.	19,0
10,00	3/8 in.	9,5
5,00	4	4,75
2,50	8	2,36
1,25	16	1,18
0,63	30	0,600
0,31	50	0,300
0,16	100	0,150
0,08	200	0,075

Tabla 2 Bandas granulométricas, de la norma UNE EN.

3.5.1.2.1 Factores que se derivan del análisis granulométrico

No solo se determina la distribución de tamaños en la muestra de agregado, sino que también se construye un gráfico que permite conocer en primera estancia si la muestra obtenida corresponde a agregado fino o agregado grueso, así como detectar exceso de un tamaño en particular, discontinuidades entre otras. , de este análisis también se derivan algunos factores que aparte de los mencionados, conocer su valor permite describir mejor la naturaleza de la muestra que estamos gradando, a continuación estas se describirán:

3.5.1.2.1.1 Módulo de finura

El módulo de finura es un factor empírico que permite estimar que tan fino o grueso es un material. Está definido como la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie “estándar” que cumplen la relación 1:2, desde el tamiz de 149 μ m (No. 100) de abertura 0,150 mm en adelante, hasta el tamaño máximo presente en la muestra.

Sin embargo, al analizar este valor se debe tener en cuenta que el mismo valor de módulo de finura, puede representar un número infinito de distribuciones granulométricas, por lo que se utilizara este parámetro como único para interpretar una curva.

3.5.1.2.1.2 Tamaño máximo

El tamaño máximo del agregado también se deriva del análisis granulométrico y se define como el tamaño de la abertura del mayor tamiz que permite el paso del 100% del material., este parámetro es importante para la elección de los áridos puesto que puede verse limitado por diferentes razones, tales como separación de las barras en el hormigón, tamaño de las fibras, tamaño del elemento, resistencia requerida entre otros.

3.5.1.2.1.3 Tamaño máximo nominal

El último parámetro que se menciona también deriva del análisis granulométrico y es el tamaño que se encuentra en un porcentaje del (85 a 100) % que pasa por el tamiz de mayor tamaño que se ha usado para hacer las curvas granulométricas.

El tamaño máximo nominal es el promedio de las partículas más grandes que hay dentro de la muestra, la utilidad que diferencia a este parámetro del anterior es que define mejor el tamaño máximo presente dentro de la masa del agregado, es por esta razón que la práctica común el valor del tamaño máximo nominal sea el que se usa para nombrar la fracción granulométrica determinando.

3.6 Empaquetamiento

“El estudio del empaquetamiento de las partículas se puede definir como el problema de seleccionar el tamaño y dosificación adecuados de los materiales particulados, de modo que los grandes vacíos sean rellenados por partículas más pequeñas, cuyos vacíos serán rellenados a su vez con partículas aún más pequeñas, y así sucesivamente”

(Oliveira, 2000).

En 1892, Féret publicó el primer tratado sobre el empaquetamiento de las partículas en el hormigón, en el que presentaba la posibilidad de seleccionar los tipos adecuados de agregados y la relación entre la porosidad y la resistencia a la compresión del material endurecido cuando se somete al proceso normal de curado en húmedo /De Larrard et al., 1994; Ai Qin et al., 1997; Ai Qin, 1999/. Desde entonces, se han propuesto algunos modelos de empaquetamiento de las partículas como herramientas para calcular la densidad de empaquetamiento de las partículas y, de ese modo, optimizar los áridos presentes en la matriz del hormigón., ya en 1960 en Escandinavia se desarrollaba una investigación muy importante sobre la durabilidad del hormigón en ambientes marinos, este trabajo fue realizado en la asociación de cemento portlant EE.UU, de esta investigación se obtuvieron relaciones analíticas para la estimación de los vacíos en el hormigón y su relación con los tamaños de los áridos del mismo , este trabajo continuo con el Comité 211 de ACI que empezó a proponer en sus publicaciones las proporciones del árido para el hormigón armado y en masa.

La disposición aleatoria de un sistema de partículas dispersas en un contenedor se define como la densidad de empaquetamiento y representa la fracción de volumen del contenedor que es ocupado por los sólidos. Las densidades de embalaje siempre están relacionadas con los porcentajes de volumen de los componentes esta expresión se puede ver a continuación.

$$\varphi: \frac{v_o}{v}$$

Ecuación 4 Densidad de empaquetamiento

v = volumen real ocupado por el sólido

Vo = volumen específico del sólido (peso dividido por densidad específico)

El estudio del empaquetado de partículas puede ser definido como el problema de la correcta selección de la proporción y del tamaño adecuado de los materiales particulados, de forma que los vacíos mayores sean llenados por partículas menores, cuyos vacíos serán nuevamente rellenados con partículas aún menores y así sucesivamente Oliveira,2000.

3.6.1 Modelos de empaquetamiento

Como se ha introducido en el numeral anterior el factor de empaque de un conjunto granular se define en Ecuación 4 por lo tanto, el objetivo de los modelos introducidos será el de obtener de una forma racional las proporciones de las mezclas de las distintas fracciones del conjunto granular conduzcan al máximo peso por unidad de volumen, o en otras palabras que contengan el mínimo de vacíos.

En este punto se sabe que los modelos de empaquetamiento de partículas se basan en el concepto de que los vacíos entre partículas más grandes se llenaran con partículas más pequeñas, lo que reduciría el volumen de huecos o aumentaría la densidad de empaquetamiento. Los modelos de empaquetado de partículas dan una base para diseños de mezcla no solo para hormigón tradicional sino también para hormigones especiales como como hormigones con fibras y hormigones de alta resistencia, a continuación, explicaremos brevemente los modelos de empaquetamiento más importantes, esto para tener una noción de lo que es y lo que significa y porque se eligió el modelo de Andersen & Andreassen modificado como centro de nuestro estudio.



Figura 10 Línea del tiempo modelos de empaquetamiento más importantes en la ingeniería del Hormigón.

Los estudios teóricos y experimentales relacionados con el empaquetado de partículas resultaron de dos enfoques básicos: una discreta, que considera las partículas individualmente (modelo de Furnas) y otra continua, que trata las partículas como distribuciones continuas (modelo de Andreassen),

3.6.1.1 Modelos discretos

Un marco conceptual para comprender el empaquetamiento de partículas gruesas muy grandes con partículas finas muy pequeñas fue propuesto por /Furnas en 1928/ Para sistemas que comienzan con partículas 100% finas, Furnas razonó que la adición de partículas gruesas aumenta la densidad de empaquetamiento porque el espacio ocupado por las partículas finas y el volumen de poro asociado se reemplaza por partículas gruesas totalmente densas. La relación entre la densidad de empaquetadura de finos, la densidad de empaquetadura gruesa y la densidad de empaquetadura compuesta puede derivarse de un volumen simple equilibrar.

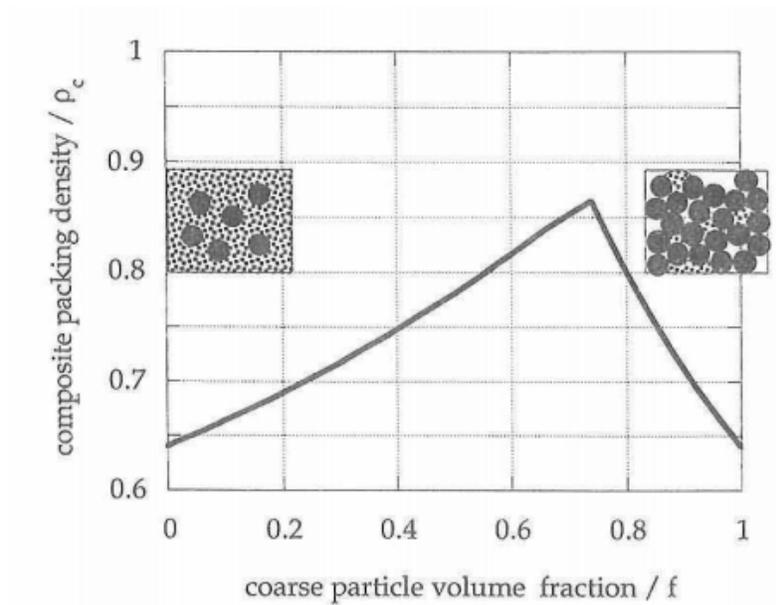


Figura 11 Modelo ideal de empaquetamiento de furnas Mitsyo Nakagawa 1994

A partir de lo anterior el supuesto fundamental del enfoque discreto es que cada clase de partícula se encuentra empaquetada en su densidad máxima en el volumen disponible / Feret 1892/ El modelo discreto se clasifica como (i) binario (ii) Ternario y (iii) modelo de mezcla Multimodal.

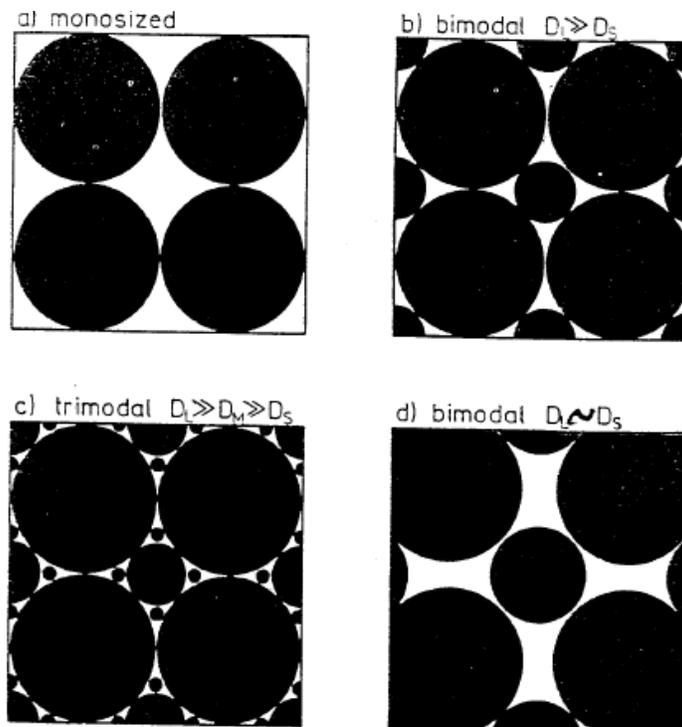


Figura 12 representación gráfica de modelos discretos de empaquetamiento

3.6.1.1.1 Modelo de mezcla bimodal

La investigación básica de la teoría de empaquetamiento fue iniciada por Furnas su teoría se creó para las partículas en forma de esfera y se basó en el supuesto de que las partículas pequeñas llenan las cavidades entre las grandes partículas sin alterar el empaquetamiento de las mismas. Furnas considera el empaquetamiento ideal de una mezcla de dos materiales.

Dependiendo de la fracción de volumen de agregado fino y grueso, estos dos casos pueden ser considerados:

- i. La fracción de volumen de partículas pequeñas es grande ($Y_1 \gg Y_2$). Este caso se llama " grano fino dominante".
- ii. La fracción de volumen de partículas gruesas es grande ($Y_2 \gg Y_1$). Este caso se llama " grano grueso dominante".

Estos dos casos sólo son posible cuando $d_1 \ll d_2$ (d_1 y d_2 siendo el diámetro de partículas), la densidad de empaquetamiento de las mezclas binarias también dependerá de la relación de diámetros d_1/d_2 . Cuando el diámetro $d_1 \approx d_2$, se pueden producir efectos de interacción, tales como, El efecto de pared y el efecto de aflojamiento, el efecto pared: sucede cuando quedan espacios vacíos alrededor de una partícula gruesa. y el efecto de aflojamiento es cuando una partícula fina es demasiado grande para encajar en los espacios entre los agregados gruesos (d_2 aprox. d_1).

3.6.1.1.2 Modelos de mezcla trimodal

Toufar extendió el modelo de mezcla binaria para calcular la densidad de empaquetamiento. /Andersen 1991, Santhanam 2003/.

El concepto fundamental del modelo Toufar es que las partículas más pequeñas (relaciones de diámetro $> 0,22$) son realmente demasiado grandes para ser situadas dentro de los intersticios entre las partículas más grandes. El resultado es una matriz de empaque que puede ser considerada como una mezcla de áreas empaquetadas que consisten principalmente en partículas grandes y áreas que consisten principalmente de partículas más pequeñas con partículas más grandes distribuidas discretamente a lo largo de la matriz de partículas más pequeñas.

Para un sistema de múltiples componentes, se supone que cualquiera de los dos componentes forma mezclas binarias. Entonces, la densidad de empaquetamiento de la mezcla de múltiples componentes total se calcula mediante la suma de la contribución de todas las mezclas binarias.

3.6.1.2 Modelos continuos

Como se mencionó, la idea de componer una curva ideal de distribución de tamaños de partícula, para los agregados fue introducida por primera vez por Fuller y Thompson (1907). El concepto detrás de la curva ideal de distribución de tamaños radica en reducir el contenido vacío de los agregados empaquetados, ya que, a un contenido constante de agua, las mezclas con mayor densidad de empaquetamiento tendrán mejores características mecánicas y reológicas.

El enfoque de modelo continuo supone que todos los tamaños posibles están presentes en el sistema de distribución de partículas sus primeros autores fueron Féret y Fuller quienes comprobaron que una distribución continua de las partículas era óptima para los sistemas de empaquetamiento de los áridos en el hormigón, a continuación, describiremos este modelo y los demás que tienen su uso más extendido en la industria de la construcción.

3.6.1.2.1 Fuller y Thompson (1907)

Como ya se ha mencionado en los apartados anteriores , la idea de componer una curva ideal de distribución del tamaño de partículas, para los agregados fue introducida por primera vez por Fuller y Thompson en 1907, la curva de Fuller varía desde 250 um hasta el tamaño máximo, en el momento que Fuller y Thompson desarrollaron esta teoría los hormigones de nueva generación aún no habían sido desarrollados por lo que esta curva es comúnmente utilizada para mezclas hechas con agregados triturados que se cuentan con tamaños máximos de 8 a16 mm, ya que para tamaños menores este modelo no resulta adecuado.

El trabajo publicado por Fuller y Thompson (The Laws of Proportioning concrete) en los Estados Unidos de América, hacia el año de 1907, en el cual se concluye la necesidad de obtener curvas de densidad máxima para la aplicación de hormigón con el fin de minimizar huecos en la matriz granular y ahorrar en el uso de cemento, dio por fruto la Ecuación 5.

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Ecuación 5 Modelo fuller

En donde

P: porcentaje de material que pasa por el tamiz de abertura d

D: tamaño maximo del agregado.

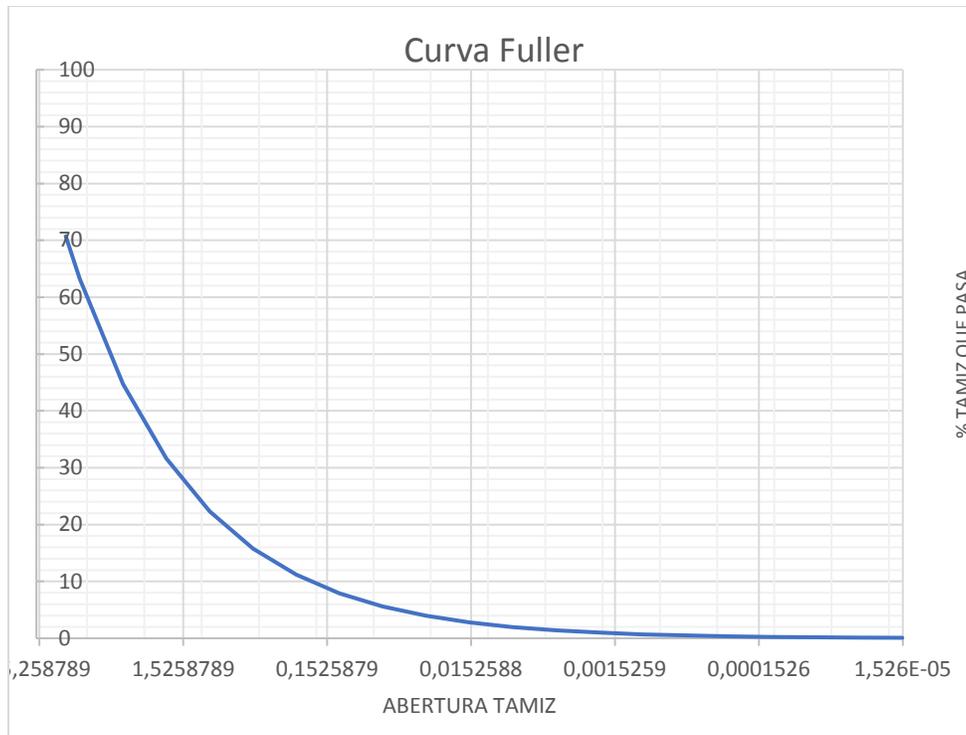


Ilustración 1 Curva granulométrica dibujada a partir del modelo de Fuller

3.6.1.2.2 Andreansen & Andersen (1930).

Los investigadores Andreansen y Andersen basándose en la teoría que las partículas pequeñas llenan los vacíos de partículas un poco más grandes para que luego otras partículas más pequeñas llenen los vacíos que las últimas han dejado y así sucesivamente hasta que el tamaño de partículas llegue a 0, dedujeron que este contenido de vacíos presentes en la matriz dependería únicamente del valor de su módulo de distribución (q) propuesto como modificación a la curva de Fuller, y sería independiente del valor del tamaño máximo usado, de tal manera que se plantearon que entre más pequeño sea el valor del módulo (q) menor sería el contenido de vacíos y que en el otro extremo cuando (q) se aproximara a infinito la matriz tendría un tamaño único, creciendo de esta manera el contenido de vacíos, concluyeron finalmente que lograr una matriz con un alta densidad se reduciría a ajustar la curva con un tamaño q mínimo.

/A. castro 2016/ reprodujo los modelos con una serie de módulos de distribución (q) dados y luego a estos sistemas se les calculaba sus masas unitarias, para este estudio se utilizó el modelo matemático definido por Andreansen y Andersen que se ve en la siguiente ecuación.

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^q$$

Ecuación 6 Modelo de Andreansen y Andersen

El exponente se varió sucesivamente de 0,1 en 0,1 desde 0,1 hasta 1, y se llevaron a cabo los ensayos anteriormente explicados; En la Figura 13, en esta ilustración también se aprecia la curva anteriormente nombrada Fuller y Thompson que es básicamente el mismo modelo propuesto por Andersen y andreansen, pero con un exponente q:0,5.

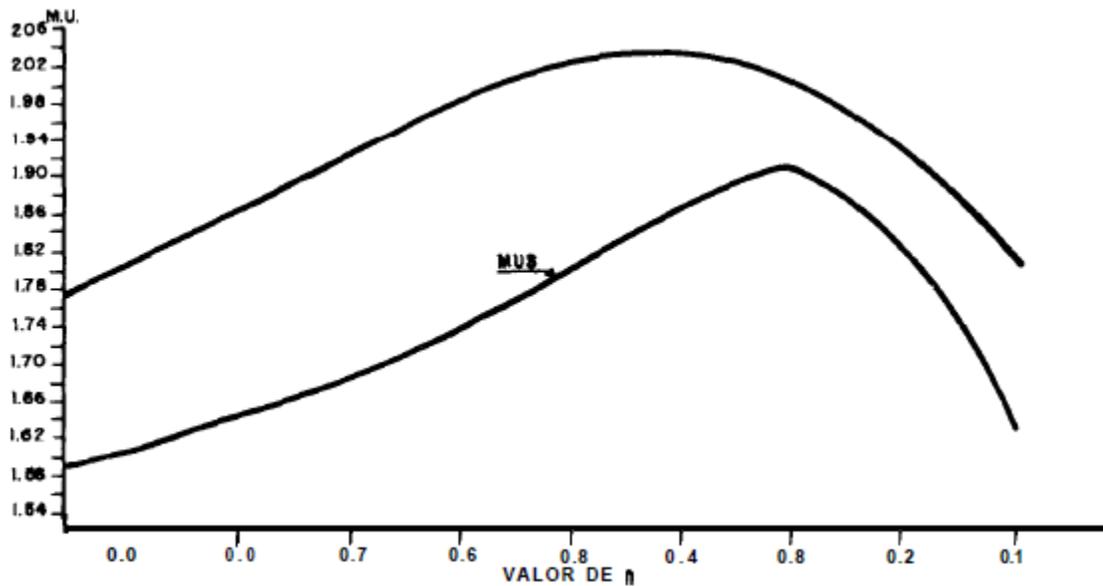


Figura 13 tomada del capítulo 4 del libro tecnología del hormigón y mortero de Diego Sánchez de Guzmán

Como se observa en la Figura 13 la densidad de la matriz no ha aumentado indefinidamente a medida que se ha disminuido el exponente como lo planteaban Andreansen & Andersen por el contrario vemos que después de que la curva llega al $q:0,35$, la densidad de empaquetado ha caído, de este estudio se concluyó que el punto de máxima compacidad en la matriz se presenta cuando hay un equilibrio entre todas las partículas, este equilibrio se obtiene cuando el espacio dejado por las partículas de mayor tamaño es ocupado por otras más pequeñas, pero no indefinidamente hasta 0 si no hasta que la naturaleza del sistema encuentre su mayor densidad.

3.6.1.2.3 Bolomey (1947)

Después de la publicación de la teoría de Fuller y al ver que esta solo aplicaba para ciertos tipos de hormigones , se han desarrollado muchas curvas ideales de gradación hasta nuestros días , sin embargo la más vigente y extendida alrededor de mundo , ha sido la modificación que en 1947 propuso Bolomey , esta modificación contemplaba un mayor contenido de finos dentro de la masa total del agregado , la diferencia de esta curva frente a su antecesora era la de mejorar la manejabilidad he incluir más curvas en este que pudieran modificarse frente a la consistencia deseada, la modificación de la ecuación de Bolomey se desarrolló de manera analítica y dio como resultado la siguiente expresión.

$$p = f + (100 - f) \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^{0,5}$$

Ecuación 7 modelo de Bolomey

donde f es una constante empírica que indica el grado de trabajabilidad de una mezcla de hormigón para una consistencia y una forma de las partículas determinada. Estos valores de f se presentan en la siguiente tabla.

CONSISTENCIA	RODADO	MACHACADO
SECO-PLASTICA	10	12
BLANDA	11	13
FLUIDA	12	14

Tabla 3 coeficientes f para el modelo Bolomey

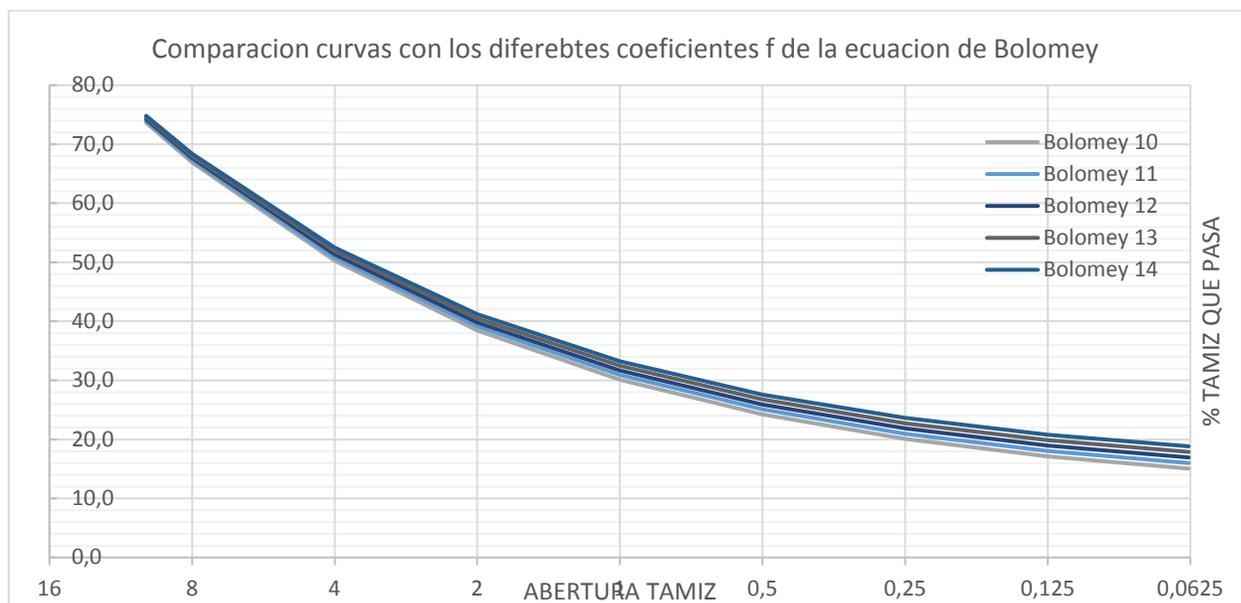


Ilustración 2 Curva granulométrica calculada a partir del modelo matemático de Bolomey

3.6.1.2.4 el modelo Andreansen modificado (1994):

Dinger & Funk realizaron un reanálisis del modelo original de, Andreansen el cual supone que las partículas más pequeñas serían infinitesimalmente pequeñas hasta llegar a cero, pero como sabemos las partículas no son infinitamente pequeñas, y en menor medida cuando estamos hablando del hormigón, a pesar que tenemos partículas muy pequeñas ($D_{mín} = 1 \text{ mm}$, $D_{mín} = 10 \text{ mm}$ y $D_{mín} = 100 \text{ mm}$ A. P. Silva/2004) estos tamaños nunca alcanzarán a ser cero como el modelo original lo planteaba , siguiendo esta premisa Dinger y Funk reconocieron que las mejores partículas en materiales reales son finitas en tamaño y modificaron la Ecuación Andreansen considerando el tamaño de partícula mínimo en la distribución, tal y como se explica en la siguiente ecuación:

$$P(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q}$$

Ecuación 8 Modelo de Andreansen y Andersen modificado

Debe mencionarse que el módulo de distribución (q), en la ecuación modificada de Andreansen puede variarse dependiendo de los diversos requisitos de trabajabilidad. Si el exponente aumenta, significa un aumento del agregado grueso, y si disminuye, aumenta la cantidad de los materiales finos. El valor del exponente, (q), da la indicación de la fracción más fina que podría tener lugar en la mezcla. La demanda de agua y la capacidad de formación de vacíos de la mezcla se controla por el volumen finos, este exponente da una base razonable para la elección de la cantidad de agentes de modificación de la reología y superplastificante que se añaden a la mezcla.

Debe mencionarse que el valor del módulo (q) se decide comúnmente en base a la experiencia del proyectista y el tipo de hormigón que se va proyectar, después de hacer un resumen de los estudios actuales, se observa que ninguno de estos se ha realizado sobre hormigón con fibras.

Este estudio considera importante el análisis del hormigón con fibras respecto a los modelos debido a que las son parte de la conformación de la matriz de árido y deberán también ser acomodados de manera óptima de acuerdo a un modelo de empaquetamiento.

3.6.1.3 Conclusiones curvas

El diseño de la distribución del tamaño de las partículas es fundamental ya que promueve el empaquetamiento y, junto con el conglomerante, define las propiedades reológicas del material durante el proceso de mezclado, durante su estado fresco y endurecido.

Recientemente se ha redescubierto el concepto de alta densidad de empaquetamiento como el parámetro clave para obtener materiales con mejor comportamiento mecánico y mayor durabilidad.

Teniendo la anterior premisa, los investigadores nombrados han propuesto granulometrías ideales, es importante resaltar que la curva ideal no existe si no a nivel teórico, y su dificultad de reproducir en la práctica hace que no se tenga una especificación técnica si no que esta se acomode en una franja porcentual.

Se eligió la curva Andreansen y Andersen modificada, esta es la última curva ampliamente utilizada que se ha modificado a partir de la de Fuller y Thompson, se consideró que de las curvas estudiadas esta es la más conveniente para nuestro objetivo.

En la siguiente tabla se ha establecido un módulo de distribución (q), equivalente para cada una de las curvas nombradas, esto con el fin de hacer una comparación general de los modelos y mostrar que la ecuación de Andreansen y Andersen modificada, ofrece un gran espectro de comparación, y puede reproducir las demás.

Abertura a mm	Fuller	A&A Fuller	Bolomey 10	A&A q 0,40	Bolomey y 11	A&A q: 0,39	Bolomey y 12	A&A q: 0,38	Bolomey y 13	A&A q: 0,37	Bolomey y 14	A&A q: 0,36
		0,50	10,00	0,40	11,00	0,39	12,00	0,38	13,00	0,37	14,00	0,36
125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	100,0%	100,0%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	89,4%	89,4%	90,5	91,5	90,6	91,7	90,7	91,9	90,8	92,1	90,9	92,2
14	83,7%	83,7%	85,3	86,8	85,5	87,1	85,6	87,4	85,8	87,6	86,0	87,9
12,5	79,1%	79,1%	81,2	83,0	81,4	83,3	81,6	83,7	81,8	84,0	82,0	84,4
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	70,7%	70,7%	73,6	75,9	73,9	76,4	74,2	76,9	74,5	77,4	74,8	77,8
8	63,2%	63,3%	66,9	69,5	67,3	70,1	67,7	70,6	68,0	71,2	68,4	71,8
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	44,7%	44,7%	50,2	52,8	50,8	53,5	51,4	54,3	51,9	55,1	52,5	55,8
2	31,6%	31,6%	38,5	40,0	39,1	40,9	39,8	41,7	40,5	42,6	41,2	43,4
1	22,4%	22,4%	30,1	30,4	30,9	31,2	31,7	32,1	32,5	32,9	33,2	33,8
0,5	15,8%	15,8%	24,2	23,1	25,1	23,8	25,9	24,6	26,8	25,4	27,6	26,2
0,25	11,2%	11,2%	20,1	17,5	21,0	18,2	21,8	18,9	22,7	19,6	23,6	20,4
0,125	7,9%	7,9%	17,1	13,2	18,0	13,9	19,0	14,5	19,9	15,2	20,8	15,8
0,063	5,6%	5,6%	15,1	10,1	16,0	10,6	16,9	11,2	17,9	11,7	18,8	12,3
Error	0,011%		3,065%		3,313%		3,552%		3,780%		4,000%	

Tabla 4 Curvas de Andersen y Andreansen modificadas equivalentes a Boolomey y Fuller

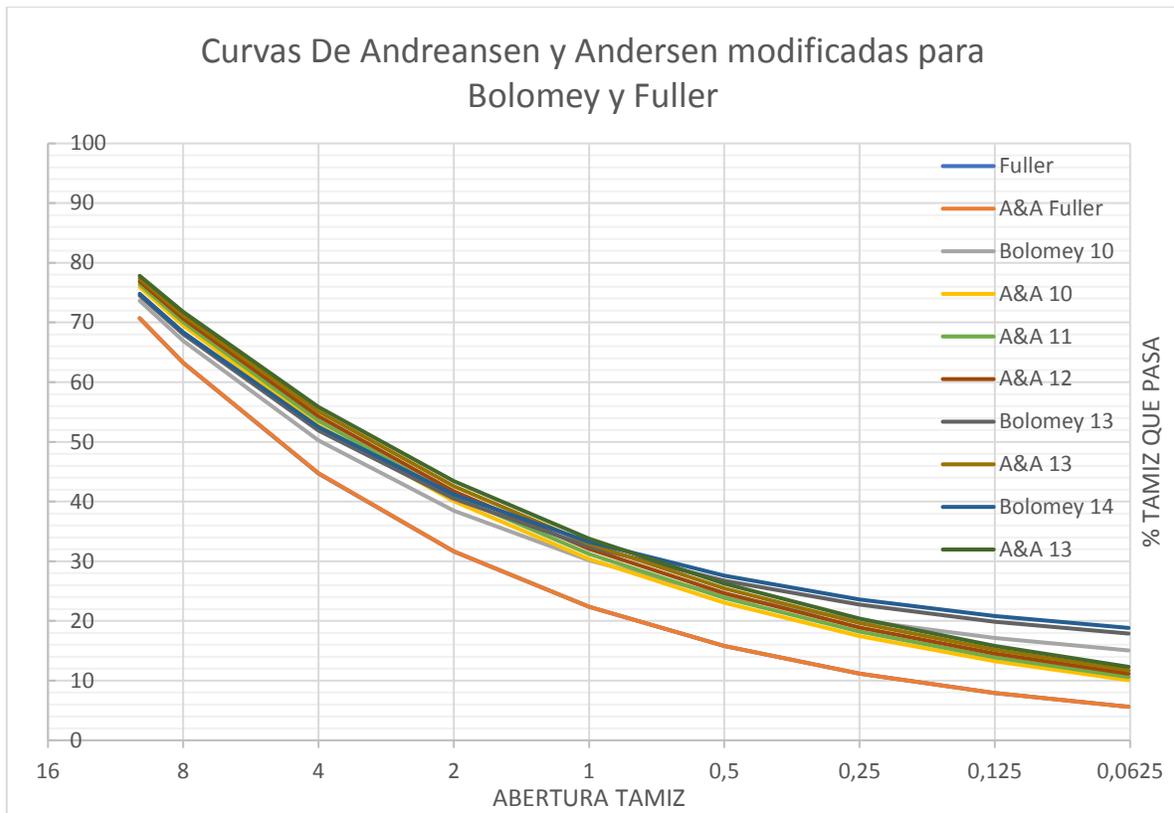


Ilustración 3 Comparación modelos A&A, Bolomey y Andersen y Andreanse modificado.

De la Tabla 4 y la Ilustración 3 anterior también se observa que el menor módulo de distribución (q) equivalente que hemos obtenido es (q) 0.35 , en el estudio actual se han evaluado módulos (q) desde 0.25 dado a las necesidades de avanzar en las dosificaciones de hormigones actuales y aumentar las prestaciones de los mismos. .

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGIA

De acuerdo con lo estudiado, se puede decir que la forma como se acomodan los áridos en el hormigón influye significativamente en sus características en estado fresco y endurecido por lo que es importante plantear un programa experimental que nos permita la medición correcta de las características de nuestro interés.

Para el estudio se eligieron hormigones convencionales, uno típico del trabajo en obra de 25 MPa y un TMN de 20 mm, y el segundo un hormigón típico de prefabricación con una resistencia especificada de 45 MPa y un TMN de 10 mm, estos dos tipos de hormigones cubren un 90% de la industria actual de hormigones, por lo que su elección nos pareció conveniente, además de acercar el estudio al ámbito profesional y aplicado de la industria de hormigones con fibra.

Las fibras usadas también corresponden a fibras altamente usadas en el mercado mundial y de las dos casas más grandes de fabricación SIKA y DRAMIX, su tamaño fue elegido según la recomendación de la Sociedad japonesa de hormigones, que recomienda que la longitud de la fibra deberá ser al menos dos veces el TMN del árido, se eligieron dos materiales diferentes con el interés de ampliar el estudio y conocer los dos comportamientos.

En este estudio se evaluaron las características en dos tipos de hormigones con fibra, se prestará especial atención al efecto de la variación del módulo de distribución (q) sobre las características mecánicas y reológicas de dos hormigones propuestos; Estas propiedades serán la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión para el hormigón en estado endurecido, y el ensayo de asentamiento con cono de Abrams para el hormigón en estado fresco, el hormigón tiene diversas propiedades para medir sin embargo se miden estas características porque son las dos más difundidas para la evaluación y aceptación de hormigones con fibras.

El ensayo de compresión se midió en cilindros de hormigón según la norma UNE-EN 1235, esta es la norma más difundida en Europa para la evaluación de esta propiedad, en el caso de la resistencia a flexión por ergonomía y versatilidad se ha decidido realizar el ensayo a flexión fundamentado en la UNE-EN 14651, pero disminuyendo las dimensiones de las vigas, adaptación que permitirá que las probetas sean más sencillas de fabricar, transportar y ensayar.

Finalmente, el hormigón fresco se evaluó en base en la UNE-EN-1235, los dos hormigones objeto de estudio, son hormigones convencionales por lo que la medida de su asentamiento se debe realizar con el cono de Abrams.

Los parámetros a analizar y comparar que obtendremos después de los ensayos propuestos, será el asentamiento medido en cm, la resistencia a la compresión medida en MPa y la

resistencia límite y resistencias residuales también medidas en MPa, de cada una de las dosificaciones propuestas, estos parámetros nos permitirán evaluar y concluir el estudio.

4.1 Programa general

En este capítulo se expone todo el programa experimental llevado a cabo para cumplir los objetivos propuestos descritos en el primer capítulo, para esto se realizó un planteamiento en dos etapas, la primera de ellas para tener un conocimiento general del comportamiento del hormigón con fibras según los siguientes parámetros de variación:

- Resistencias f_c y TMN : El primer hormigón a fabricar será llamado A y es de 25 MPa un hormigón típico de obra con un tamaño máximo nominal de 20mm, el segundo que será llamado B un hormigón típico para prefabricación de 40 MPa con un tamaño máximo de 10 mm.
- Curvas Granulométricas: como se explicó en puntos anteriores se eligió el modelo modificado de Andreassen y Andersen para el cual hemos variado su módulo de distribución con los siguientes tres valores 0.30, $q:0.35$ $q:0.25$ para el hormigón A y $q:0.30$, $q:0.35$, $q:0.40$ para el hormigón B, para calcular cada una de las curvas teóricas hemos asumido el D_{min} : como $100\mu m$ según recomendación A. P. Silva/2004
- Tipos de Fibra: Para el hormigón A se planteó fibra de Acero 60mm 5D, Sintéticas SIKA M38 y Acero 65/30, para el hormigón B, fibras de Acero 65/40 y Acero 80/30
- Contenidos de fibra: Las fibras de Acero 65/40, Acero 80/30, e Híbrido tendrán un testigo 0Kg/m³, 50 y 100 Kg/ m³ de fibras para el hormigón B, Para el hormigón A las fibras de acero 60 mm 5D y Acero 65/40 tendrán un testigo 0Kg/m³ y 30 y 60 kg/m³ finalmente las fibras sintéticas tendrán como las demás un testigo 0 Kg/m³ y 5 y 10 kg/m³.

El trabajo se ha realizado en dos etapas con la intención de tener primero un acercamiento general al hormigón con fibras y sus propiedades, además de poder a través de este estudio general determinar patrones y realizar más adelante la correcta elección del hormigón al cual se le ampliara su estudio.

Las amasadas realizadas en esta primera etapa, se encuentran resumidas en la etapa. Tabla 6

Para la segunda etapa se eligió un tipo de fibra y una dosificación fija y sobre ellas ampliar el espectro en las curvas granulométricas pasando de tres a seis, para cada una de ellas se variara el exponente q cada 0.05 desde 0.20 hasta 0.45, se han elegido para el hormigón B las fibras DRAMIX 80/30 en una dosificación de 50 kg/m³ y para el hormigón A las fibras

SIKA M 38 en una dosificación de 10 kg/m³, las amasadas realizadas en esta etapa se encuentran resumidas en la tabla 7

Para estas amasadas se ha seguido el plan de ensayos, resumido en la Tabla 5.

ESTADO	PROBETAS	No De Probetas	ENSAYOS
Hormigón Fresco 55 litros	Asentamiento en Cono	1 por amasada	UNE EN 12350-2 Ensayo de asentamiento en cono de Abrams
Hormigón Endurecido	Probetas Prismáticas 28 días	5 por amasada	UNE EN 14651 Resistencias a la tracción por flexión
	Probetas Cilíndricas 28 días	3 por amasada	UNE EN 12350- Resistencia a la compresión.
Rendimiento:		3 amasados día/ 2 días semana	

Tabla 5 Resumen Plan De Ensayos.

AMASADAS REALIZADAS				
No De Mezcla	TMN	Q A & A	Tipo de Fibra	Kg/m ³ Fibra
1	20	0,25	Acero 60mm 5D	30
2	20	0,25	Sintética PP	5
3	20	0,25	Sintética PP	10
4	20	0,25	-	T
5	20	0,25	Acero 60mm 5D	60
6	10	0,30	-	T
7	10	0,30	Acero 80/30	50
8	10	0,30	Acero 80/30	100
9	20	0,30	-	T
10	20	0,30	Acero 60mm 5D	50
11	20	0,30	Acero 60mm 5D	100
12	20	0,30	Acero 60mm 5D	30
13	20	0,30	Sintética PP	5
14	20	0,30	Sintética PP	10
15	10	0,35	-	T
16	10	0,35	Acero 80/30	50
17	10	0,35	Acero 80/30	100
18	10	0,40	-	T
19	10	0,40	Acero 80/30	100

Tabla 6 Amasadas realizadas en la primera etapa.

AMASADAS REALIZADAS				
No De Mezcla	TMN	Q A & A	Tipo de Fibra	Kg/m3 Fibra
20	20	0,20	Sintética PP	10
21	20	0,25	Sintética PP	10
22	20	0,30	Sintética PP	10
23	20	0,35	Sintética PP	10
24	20	0,40	Sintética PP	10
25	20	0,45	Sintética PP	10
26	10	0,20	Acero 80/30	50
27	10	0,25	Acero 80/30	50
28	10	0,30	Acero 80/30	50
29	10	0,35	Acero 80/30	50
30	10	0,40	Acero 80/30	50
31	10	0,45	Acero 80/30	50
32	10	0,40	Acero 80/30	50
33	10	0,35	Acero 80/30	50
34	10	0,30	Acero 80/30	50

Tabla 7 Amasadas realizadas en segunda etapa.

ESTADO	PROBETAS	No De Probetas	Total, Primera etapa	Total, Segunda Etapa	ENSAYOS
Hormigón Fresco 55 litros	Asentamiento en Cono	1 por amasada	19	15	UNE EN 12350-2
Hormigón Endurecido	Probetas Prismáticas 28 días	5 por amasada	95	75	UNE EN 14651
	Probetas Cilíndricas 28 días	3 por amasada	57	45	UNE EN 12350-
Total, Ensayos			306		

Tabla 8 Total ensayos realizados

4.2 Metodología

4.2.1 Materiales utilizados



Imagen 1 , capazos con material para fabricacion.

4.2.1.1 Cemento

Para la fabricación del hormigón de 25 MPa de TMN 20 mm se utilizó el cemento CEM I/ 42.5 R de la empresa Lafarge en sacos de 3 Toneladas, el cemento cumple con las especificaciones UNE 197-1:2000 Y RC-08

Para la fabricación del hormigón de 40 MPa de TMN 10 mm se utilizó el cemento CEM I/ 52.5 R de la empresa Lafarge en sacos de 3 Toneladas, el cemento cumple con las especificaciones UNE 197-1:2011 Y RC-08

4.2.1.2 Agua

El agua empleada para las amasadas ha sido tomada de las fuentes directas del laboratorio de materiales de construcción de la UPV, según regulación del agua potable en Valencia esta, cumple con los parámetros establecidos en el artículo 27 de la EHE-08

4.2.1.3 Filler calizo

Para disminuir el error entre las curvas teóricas y las experimentales, especialmente aquellas que tienen un mayor contenido de finos, se incorporó un polvo de mármol denominado comercialmente Betocarb P1-BE, que fue suministrado por la planta de

L'Alborç (Tarragona) de la empresa Omya. Este material se caracteriza por su blancura y por tener una granulometría uniforme, con un tamaño máximo de partícula de 100 μm . La curva granulométrica puede verse en la Ilustración 4



Imagen 2 Betocarb P1-BE.

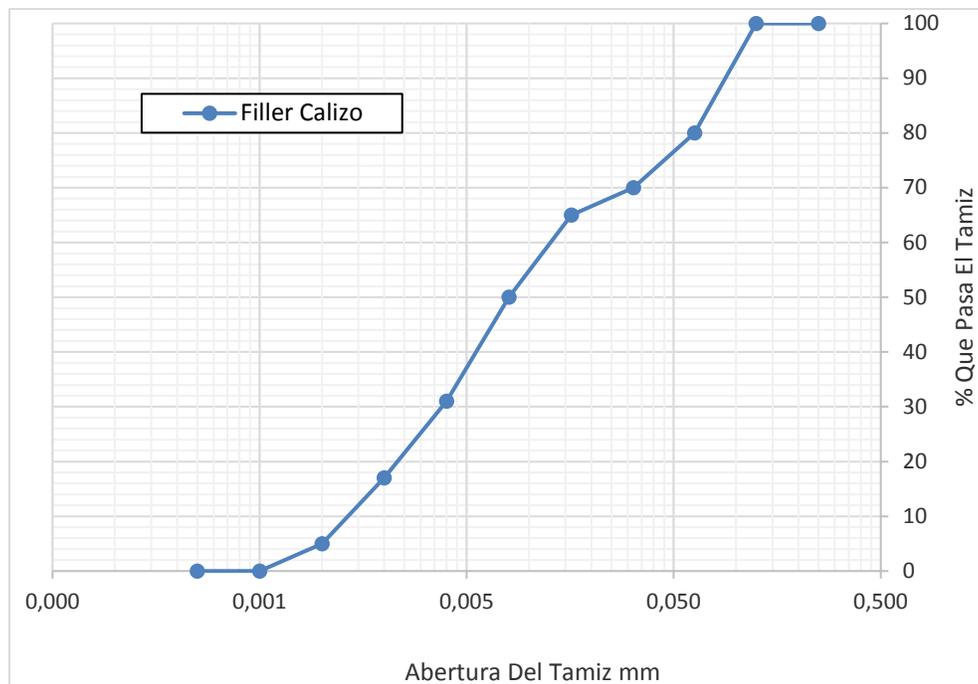


Ilustración 4 Curva Granulométrica Filler Calizo.

4.2.1.4 Áridos

Los áridos son de origen calizo de machaqueo con tamaños en rangos de 0,063 a 4 mm en el caso de las arenas y de 20 a 4 mm en el de las gravas, estos áridos provienen de la cantera los serranos.

De acuerdo a la norma UNE-EN 993-1:2012, se procedió a realizar el ensayo de granulometría de los áridos obteniendo la curva granulométrica. Incluida en las gráficas 3 y 4



Imagen 3 Gravas cantera los serranos

4.2.1.5 Arena gruesa la castellana

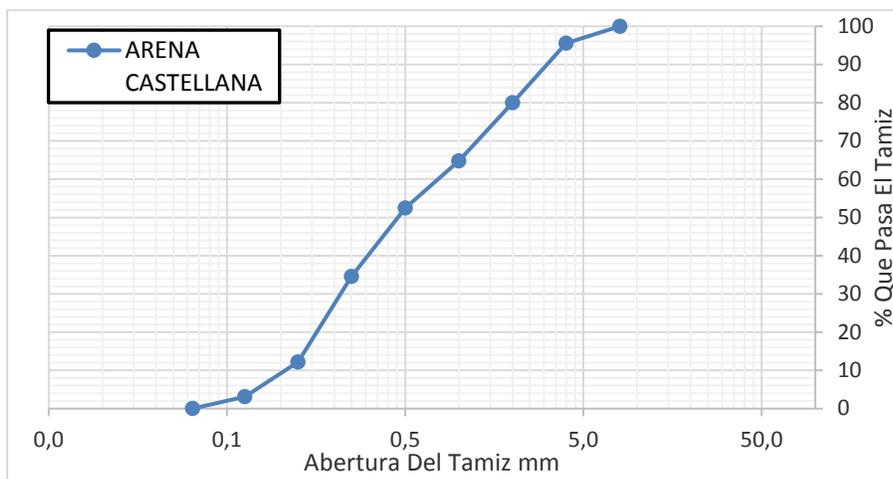


Ilustración 5 Curva granulomerica arena la castellana.

4.2.1.6 Gravas

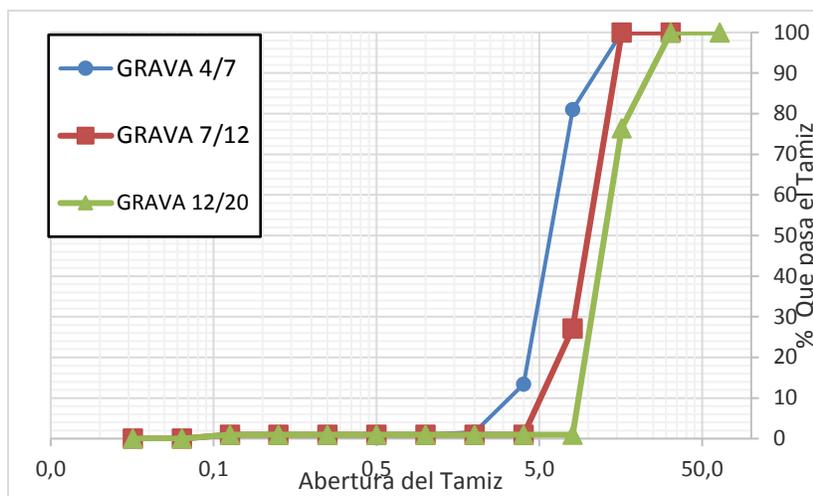


Ilustración 6

granulometrica gravas 4/7 , 7/12 , 12/20

Curva

4.2.1.7 Arenas Correctoras

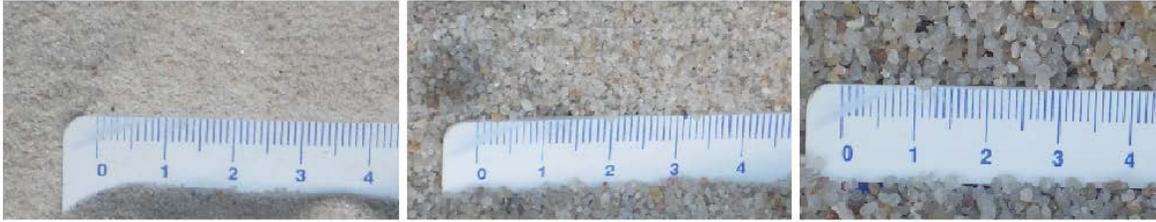


Imagen 4 Arenas correctoras.

Las arenas correctoras fueron suministradas por Sílices Carrión Martínez y se almacenan en bolsas plásticas de 20kg para conservarlas secas., al igual que a las gravas y arena la castellana se les realizo el ensayo UNE-EN 993-1:2012 sus curvas granulométricas se pueden ver en la *Ilustración 7*

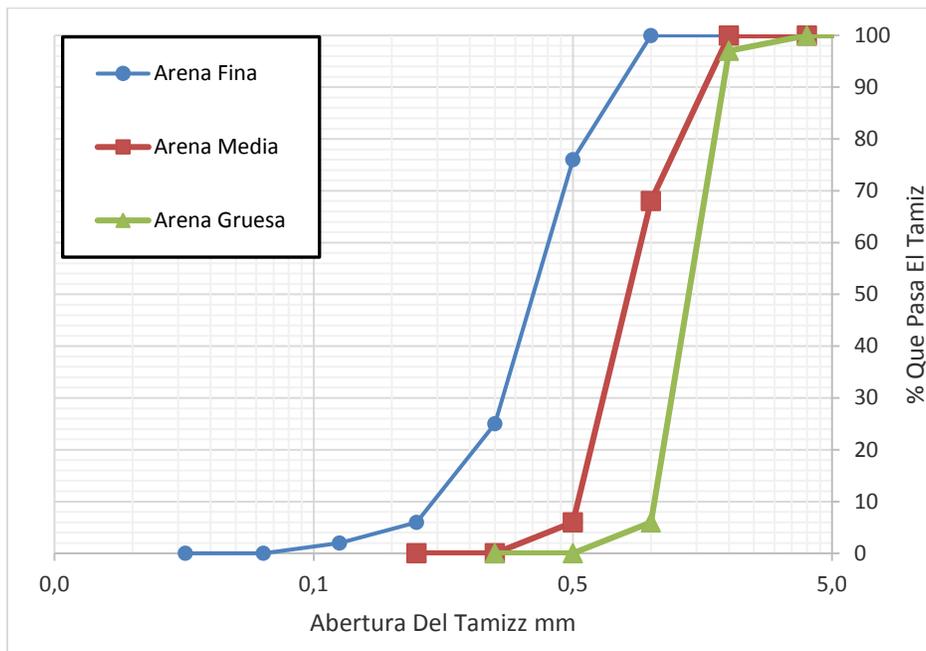


Ilustración 7 Curvas granulométricas Arenas De Corrección

4.2.1.8 Aditivo

Como se ha dicho en el marco teórico la incorporación de fibras y finos hace que se reduzca la trabajabilidad del hormigón, debido al aumento de la demanda de agua, para alcanzar la trabajabilidad deseada se incorporó el superplastificante de alto rendimiento Sika ViscoCrete-5720, su hoja de dato de productos se encuentra en los anejos.

4.2.1.9 Fibras

En las fibras como se habló en el planteamiento del trabajo y estado del arte, buscábamos hacer un hormigón típico de producción actual, en esta línea de desarrollo se eligieron fibras de las más comunes en el mercado actual, con dos de las casas de producción más populares en el mundo de fibras para hormigón, SIKA Y DRAMIX. En la Imagen 5 e Imagen 6 se describen estas.

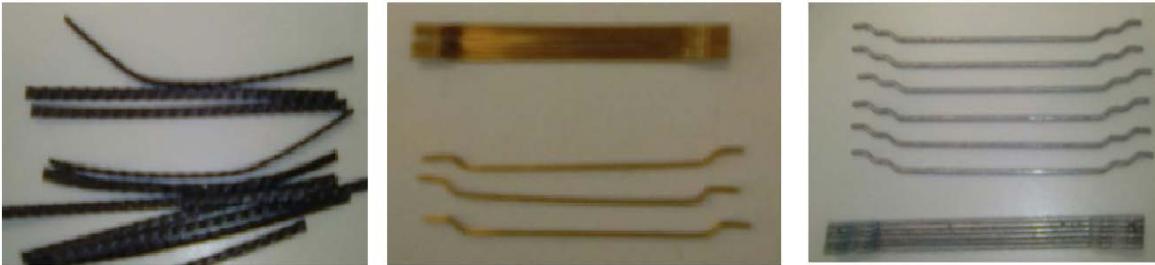


Imagen 5 De izquierda a derecha: SIKA FIBER M38, DRAMIX 80/30, DRAMIX 60 5D.

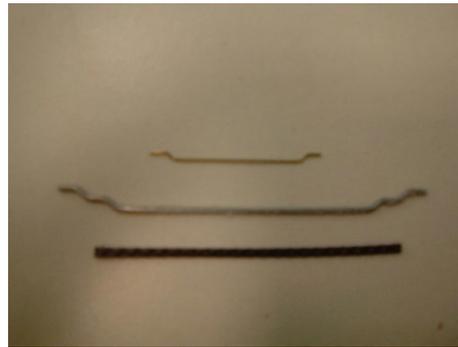


Imagen 6 De arriba abajo DRAMIX 80/30 , DRAMIX 60 5D , SIKAFIBER M38

	SIKA FIBER M48	DRAMIX 80/30	DRAMIX 65 5D
Tipo	Macro Polimérica	Macro Metálica	Macro Metálica
Longitud (mm)	48	30	65
Diámetro (mm)	0,74	0,38	0,9
Esbeltez	65	80	65
Densidad (Kg/m3)	910	7850	7850
Forma	Rizada	Con ganchos	Con ganchos

Tabla 9 Principales propiedades de las fibras usadas en el procedimiento experimental

4.2.2 Ajuste y Dosificación

4.2.2.1 Áridos disponibles

Para hacer la dosificación de hormigón sigue el proceso de dejar fija la relación agua cemento y el contenido del mismo, esto para enfocar en la composición granulométrica y las proporciones en la mezcla del mismo, así que de acuerdo a la Norma UNE-EN 933-1:2012, se procedió a realizar el ensayo de granulometría de los áridos dispuestos en laboratorio, obteniendo la curva granulométrica cada uno de ellos, los porcentajes se muestran en la Tabla 10.

Tamiz de la serie UNE	12./20	07./12	4./7	Arena G. Cast	Arena Gruesa	Arena Media	Arena Fina	Filler calizo	Humo de Sílice
64	100	100	100	100	100	100	100	100	100
32	100	100	100	100	100	100	100	100	100
16	76,4	100	100	100	100	100	100	100	100
8	1	27,1	81	100	100	100	100	100	100
4	1	1	13,4	95,6	100	100	100	100	100
2	1	1	1,6	80	97	100	100	100	100
1	1	1	1	64,8	6	68	100	100	100
0,5	1	1	1	52,5	0	6	76	100	100
0,25	1	1	1	34,6	0	0	25	100	100
0,125	1	1	1	12,2	0	0	6	100	100
0,063	1	1	1	3,1	0	0	2	80	100
0,032	0	0	0	0	0	0	0	70	100
0,016	0	0	0	0	0	0	0	65	100
0,008	0	0	0	0	0	0	0	50	100
0,004	0	0	0	0	0	0	0	31	100
0,002	0	0	0	0	0	0	0	17	100
0,001	0	0	0	0	0	0	0	5	100
0,0005	0	0	0	0	0	0	0	0	90
0,00025	0	0	0	0	0	0	0	0	60
0,000125	0	0	0	0	0	0	0	0	30
0,000063	0	0	0	0	0	0	0	0	5

Tabla 10 Porcentajes que pasan por el tamiz de la serie UNE EN 933 del árido conjunto disponible en laboratorio

4.2.2.2 Curva teórica

Para realizar el ajuste, Se cálculo la curva teórica para cada uno de los exponentes propuestos anteriormente, para esto como ya se ha explicado se toma la formula del modelo de Andreansen & Andersen modificado, se calculan cada uno de los valores correspondientes y se grafican, tal y como se puede ver en la Tabla 11 y Tabla 12 , Ilustración 8 y Ilustración 10.

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \right)$$

Ecuación 9 Modelo de Andersen y Andreansen Modificado.

D: Abertura en mm del tamiz por el que pasa el porcentaje de árido.

D_{min}: Diámetro mínimo de partículas presentas en la matriz 1E – 10

D_{max} Tamaño máximo del árido

q: exponente que modifica la curva granulometrica

Abertura mm	A&A 0.20	A&A 0.25	A&A 0.30	A&A 0.35	A&A 0.40	A&A 0.45
16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
8	95,5	93,5	92,5	91,5	90,4	94,5
4	82,8	75,9	72,5	69,3	66,2	79,3
2	71,8	61,6	56,9	52,5	48,5	66,5
1	62,1	49,9	44,6	39,8	35,5	55,8
0,5	53,8	40,5	34,9	30,1	26,0	46,8
0,25	46,5	32,8	27,4	22,8	19,0	39,2
0,125	40,1	26,6	21,4	17,3	13,9	32,8
0,063	34,7	21,6	16,8	13,1	10,2	27,4
0,032	29,9	17,5	13,3	10,0	7,5	23,0
0,016	25,7	14,2	10,4	7,6	5,5	19,2
0,008	22,1	11,4	8,1	5,7	4,0	16,0
0,004	18,9	9,2	6,3	4,3	2,9	13,3
0,002	16,1	7,4	4,9	3,3	2,1	11,0
0,001	13,7	5,9	3,8	2,5	1,6	9,1
0,0005	11,6	4,7	3,0	1,8	1,1	7,5
0,00025	9,7	3,8	2,3	1,4	0,8	6,1
0,000125	8,1	3,0	1,8	1,0	0,6	5,0
0,000063	6,8	2,4	1,4	0,8	0,4	4,1

Tabla 11 Porcentaje que pasa, para las curvas teóricas de A&A TM 10mm

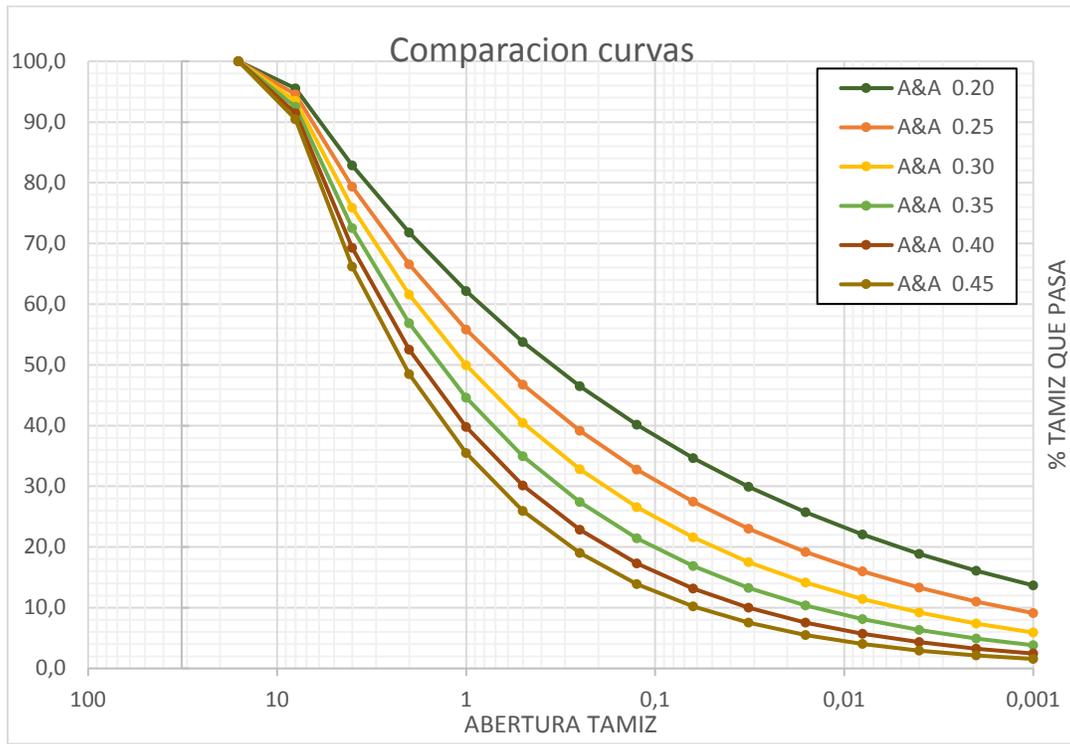


Ilustración 8 Curvas granulométricas A&A TM 10

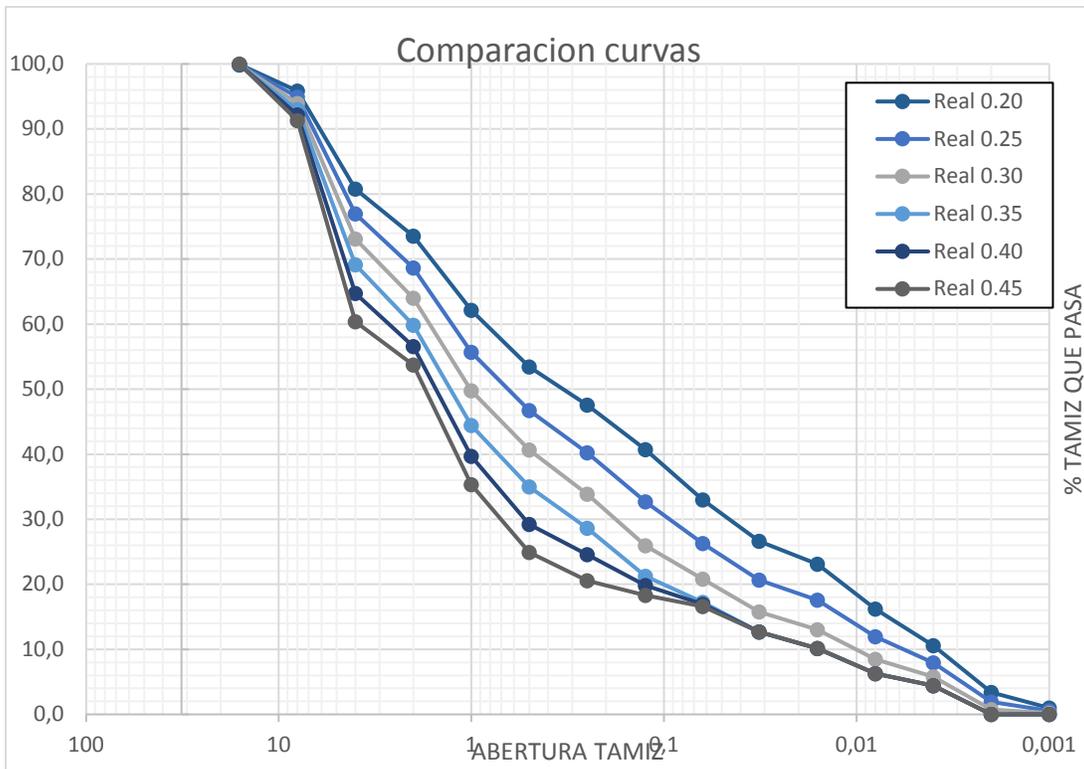


Ilustración 9 Curvas granulométricas experimentales TM 10.

Abertura mm	A&A 0.20	A&A 0.25	A&A 0.30	A&A 0.35	A&A 0.40	A&A 0.45
32	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	95,5	94,5	93,5	92,5	91,5	90,4
8	82,9	79,4	75,9	72,5	69,3	66,2
4	71,9	66,6	61,6	56,9	52,5	48,5
2	62,3	55,9	50,0	44,6	39,8	35,5
1	53,9	46,8	40,5	35,0	30,1	26,0
0,5	46,7	39,3	32,8	27,4	22,8	19,0
0,25	40,3	32,9	26,6	21,5	17,3	13,9
0,125	34,8	27,5	21,6	16,8	13,1	10,2
0,063	30,1	23,0	17,5	13,2	9,9	7,5
0,032	26,0	19,3	14,2	10,4	7,6	5,5
0,016	22,3	16,1	11,5	8,1	5,7	4,0
0,008	19,1	13,4	9,3	6,4	4,3	2,9
0,004	16,4	11,1	7,5	5,0	3,3	2,1
0,002	14,0	9,2	6,0	3,9	2,5	1,6
0,001	11,9	7,6	4,8	3,0	1,9	1,1
0,0005	10,0	6,3	3,9	2,3	1,4	0,8
0,00025	8,5	5,1	3,1	1,8	1,0	0,6
0,000125	7,1	4,2	2,4	1,4	0,8	0,4
0,000063	5,9	3,4	1,9	1,1	0,6	0,3

Tabla 12 Porcentaje que pasa, para las curvas teóricas de A&A TM 20mm

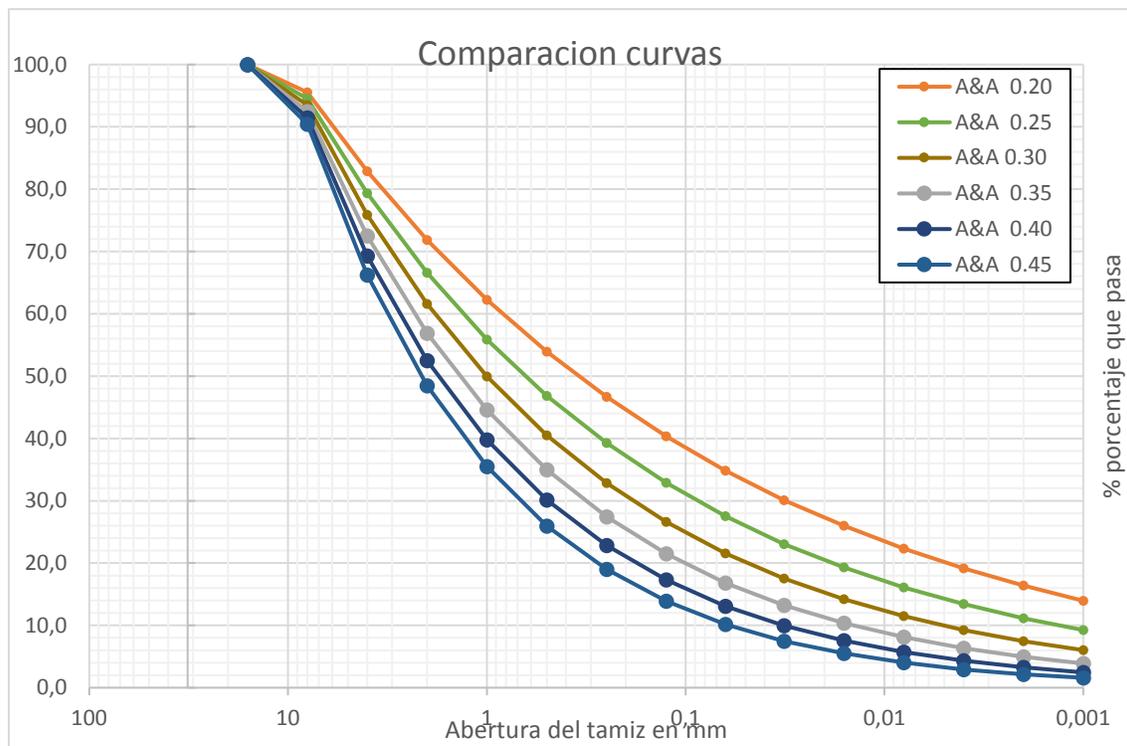


Ilustración 10 Curvas granulométricas A&A TM 20

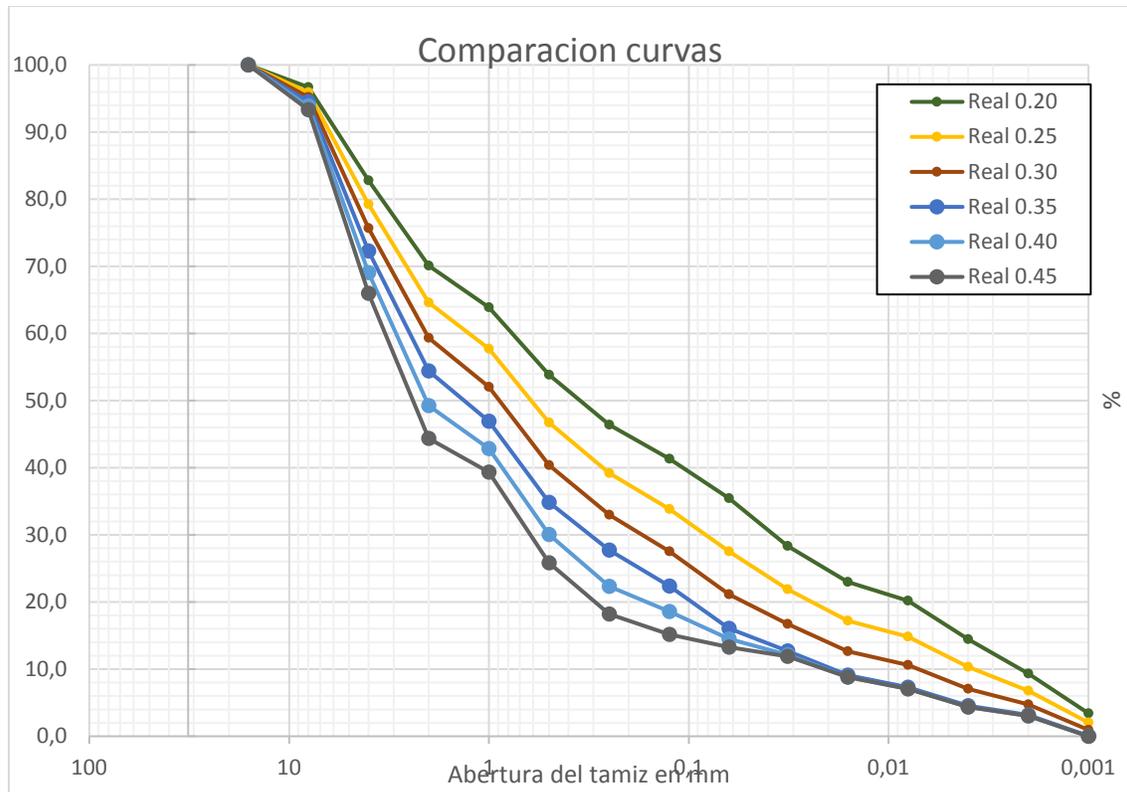


Ilustración 11 Curvas granulométricas experimentales TM 20.

4.2.2.3 Control de ajuste

Cualquiera que sea el método de ajuste utilizado lo que se busca es que el resultado sea el mejor posible, esto quiere decir que la curva experimental sea lo más similar a la curva teórica propuesta, así que, para evaluar la diferencia entre la curva teórica y experimental, se realizara un control de ajuste que consiste en calcular la dispersión media entre ambas curvas a partir de la siguiente formula.

$$Ajuste = \sqrt{\frac{\sum(X_{ci} - X_i)^2}{n - 1}}$$

Ecuación 9 Dispersión

n : Numero de tamices de la serie utilizados para obtener las granulometrías anteriores.

X_i : Es la ordena de la curva teórica que corresponde al tamiz que ocupa el lugar i en un total de k de la serie elegida.

X_{ci} : Es el porcentaje de árido conjunto que pasa por el tamiz que ocupa el lugar i de la serie elegida para obtener la granulometría

El ajuste para cada una de las curvas se realizó de la siguiente manera, cada una de las gradaciones realizadas a los áridos disponibles en el laboratorio, se situaron como vectores en la matriz solución, las variables serán los porcentajes por los que cada una de los áridos disponibles deberá ser multiplicado para obtener la curva más parecida a la curva teórica,

$$\begin{bmatrix} A_{1\text{ Tamiz } 1} \cdot x\%_{01} & \dots & A_{n\text{ Tamiz } 1} \cdot x\%_{0n} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{1\text{ Tamiz } n} \cdot x\%_{01} & \dots & A_{n\text{ Tamiz } n} \cdot x\%_{0n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1\text{ Tamiz } 1} \cdot x\%_{01} + A_{n\text{ Tamiz } 1} \cdot x\%_{0n} \\ \dots \\ A_{1\text{ Tamiz } n} \cdot x\%_{01} + A_{n\text{ Tamiz } n} \cdot x\%_{0n} \end{bmatrix}$$

Ecuación 10 Matriz Solución Ajuste de Áridos

Con la matriz anteriormente descrita se inicia un proceso iterativo hasta que los vectores solución propuestos consigan que el ajuste calculado con la Ecuación 9, sea el mínimo posible este proceso iterativo tendrá las siguientes restricciones.

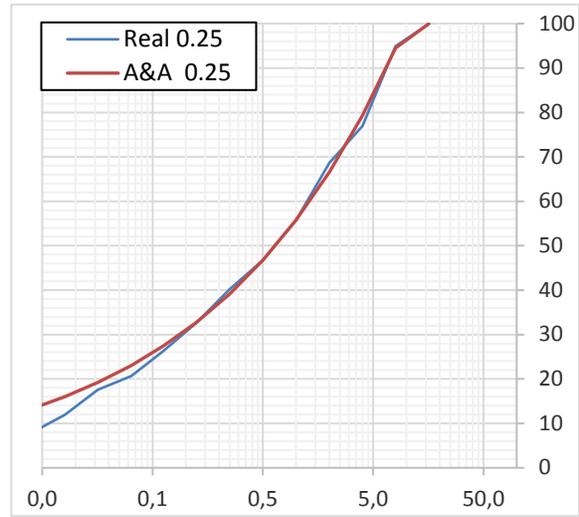
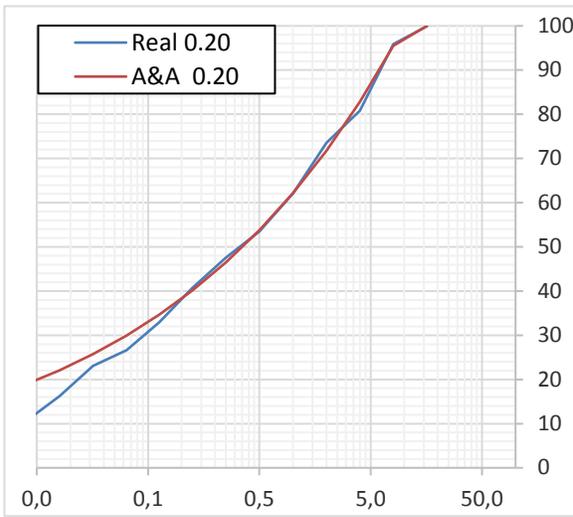
1. $x\%_{01} + \dots + x\%_{0n} \leq 100\%$
2. $x\%_{01}, \dots, x\%_{0n} \leq 100\%$
3. $A_{1\text{ Tamiz } 1} \cdot x\%_{01} + A_{n\text{ Tamiz } 1} \cdot x\%_{0n} + A_{1\text{ Tamiz } n} \cdot x\%_{01} + A_{n\text{ Tamiz } n} \cdot x\%_{0n} \leq 100\%$

Este proceso se ha realizado para cada una de las curvas planteadas, hasta lograr el objetivo.

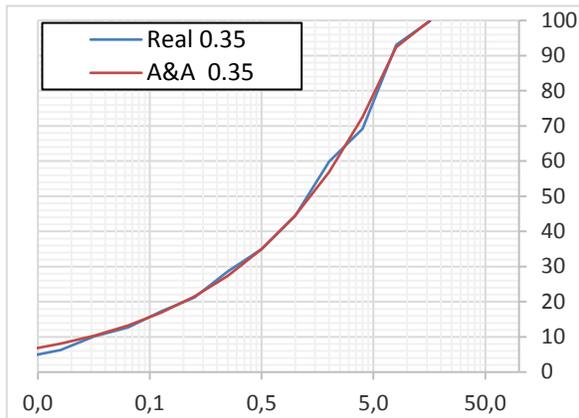
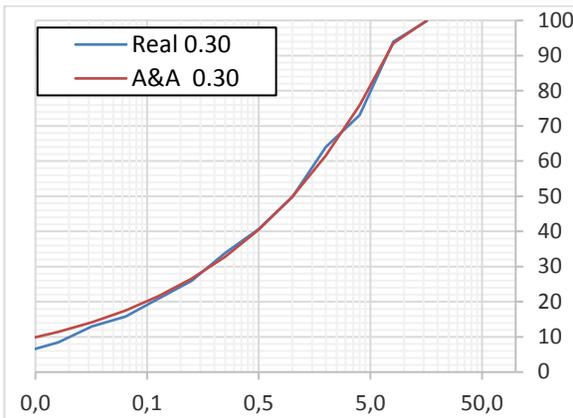
Según el manual de dosificación de hormigones /Serna 1983/ un ajuste es bueno si no supera el valor de 4%, en la siguiente tabla se muestra el valor de dispersión calculado para cada una de las curvas, como se puede ver solo una supera en 0,25% el valor recomendado, esto se puede deber a que no se cuenta con el número de arenas correctoras necesarias para que esta curva tenga un mejor ajuste, sin embargo para efectos de la investigación esta dispersión es aceptable y se trabajara con ella.

	TM 10	TM 20
q	Dispersión	Dispersión
0,20	1,30%	1,28%
0,25	1,34%	1,30%
0,30	1,51%	1,42%
0,35	1,79%	1,58%
0,40	2,99%	2,23%
0,45	4,25%	3,20%

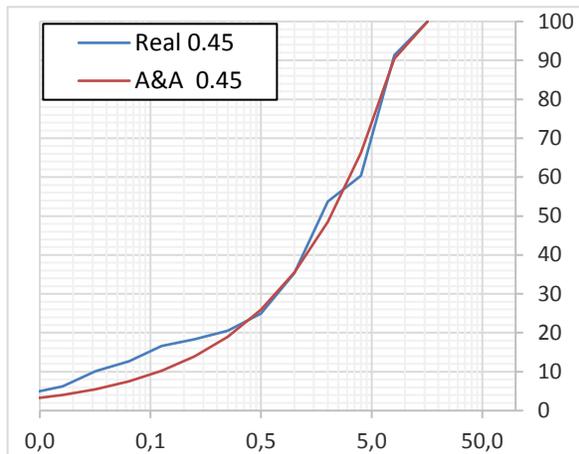
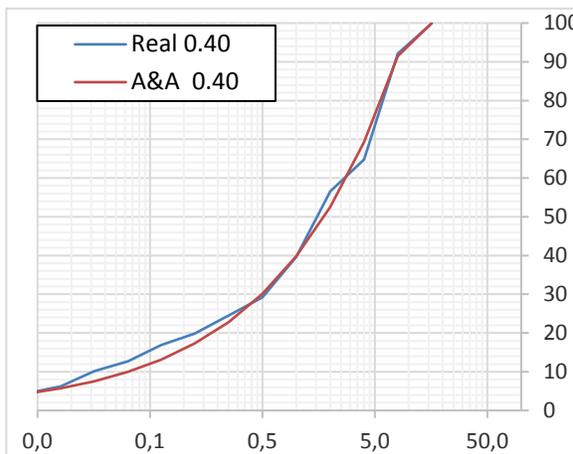
Tabla 13 Dispersión obtenida para cada uno de los ajustes realizados.



Ilustracion 17 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.20 TIPO A Ilustracion 16 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.25 TIPO A

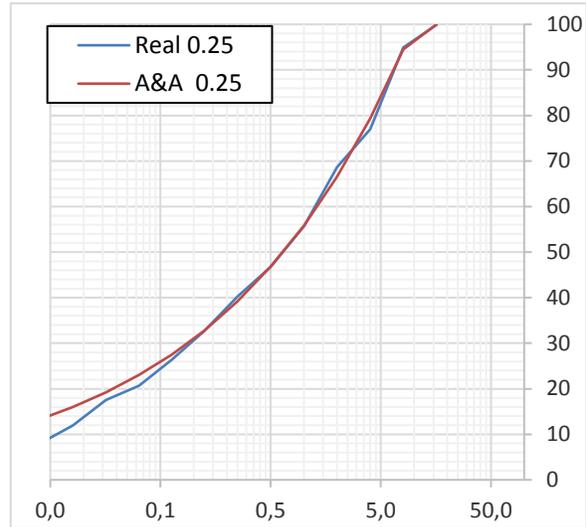
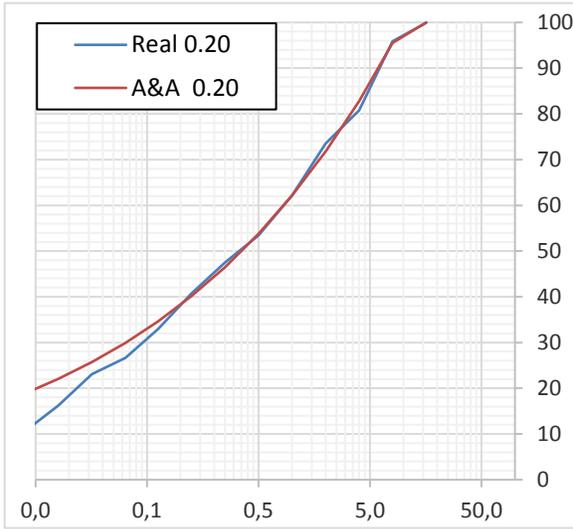


Ilustracion 14 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.30 TIPO A Ilustracion 15 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.35 TIPO A

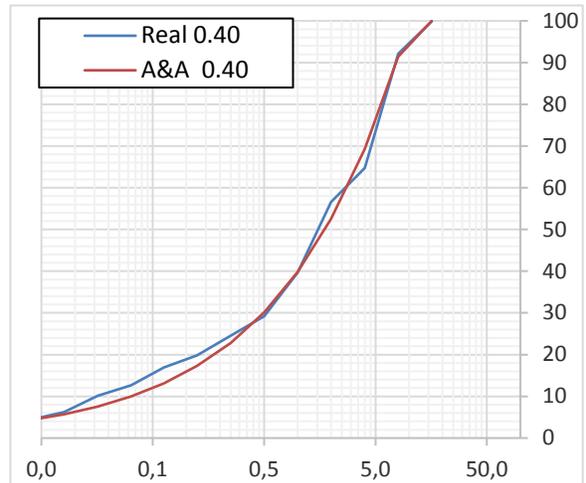
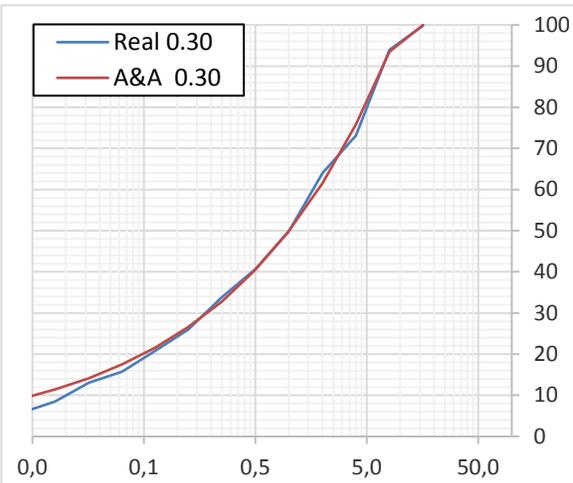


Ilustracion 13 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.40 TIPO A Ilustracion 12 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.45 TIPO A

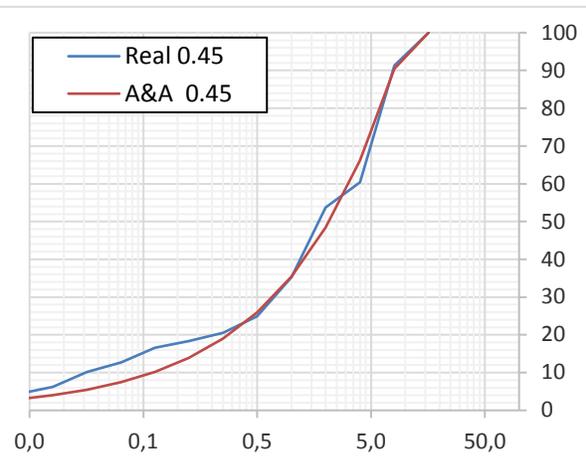
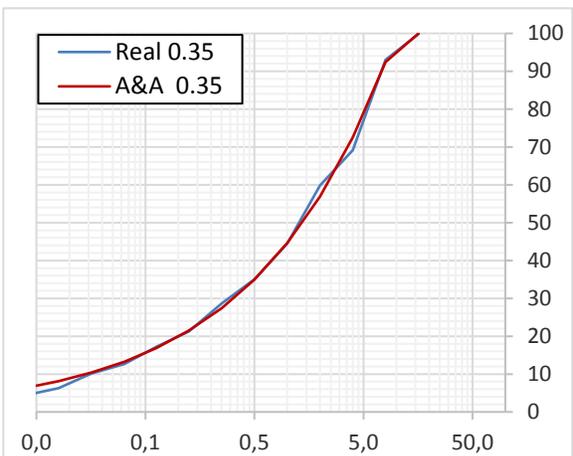
4.2.2.3.1 Comparativa gráfica, curvas de mezcla contra curvas teóricas A&A TM 10Mmm



Ilustracion 23 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.20 TIPO ρ Ilustracion 22 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.25 TIPO ρ



Ilustracion 21 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.30 TIPO ρ Ilustracion 20 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.35 TIPO B



Ilustracion 19 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.40 TIPO ρ Ilustracion 18 Abertura de tamiz vs % que pasa para q:0.45 TIPO ρ

4.2.2.4 Dosificaciones

Finalmente, se obtienen los porcentajes de cada árido, para tener la curva más cercana se realizó el cálculo para la dosificación final, sabiendo que se tomó como densidad específica de los áridos 2,65 y como absorción de los mismos 1%.

COMPONENTE	q:0.20	q:0.25	q:0.30	q:0.35	q:0.40	q:0.45
12./20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
07./12	5,2	9,0	13,2	13,3	0,0	0,0
4./7	430,3	517,3	604,9	703,9	840,7	963,0
Arena G. Cast	643,5	714,4	749,6	696,8	428,6	115,4
Arena Gruesa	101,9	123,7	148,3	178,1	230,6	310,9
Arena Media	156,3	153,2	149,1	167,0	241,2	259,3
Arena Fina	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	110,5
Harina	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cem I 52,5 SR	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0	425,0
Filler calizo	422,0	241,6	94,1	0,0	0,0	0,0
Humo de Sílice	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agua	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0

Tabla 14 Dosificaciones para el hormigón A f'c 25 MPa TMN 20 mm

COMPONENTE	q:0.20	q:0.25	q:0.30	q:0.35	q:0.40	q:0.45
12./20	302,5	368,6	434,3	499,1	554,7	607,9
07./12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4./7	366,7	425,9	480,6	529,0	604,0	677,4
Arena G. Cast	560,8	601,8	613,6	603,7	390,7	135,3
Arena Gruesa	91,9	109,5	126,0	141,1	172,3	222,4
Arena Media	138,3	130,8	122,3	112,6	172,3	195,0
Arena Fina	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	56,0
Harina	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cem I 52,5 SR	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Filler calizo	433,9	257,6	117,4	8,6	0,0	0,0
Humo de Sílice	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agua	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	190,0

Tabla 15 Dosificaciones para el hormigón B f'c 40 Mpa TMN 10 mm

4.2.3 Fabricación de hormigón

La fabricación del hormigón se ha realizado, en las instalaciones del laboratorio de materiales de construcción de la UPV edificio 4F, bajo la supervisión del tutor y los técnicos a cargo.

4.2.3.1 Amasado

El procedimiento de amasado se estableció fijando tiempos de mezcla, sin embargo, dependiendo de la mezcla y de su consistencia estos tiempos podían variar, para favorecer el trabajo, a continuación, se describe como ha establecido el procedimiento de amasado.

Minuto 0: adición de grava y arena.

Minuto 1: adición de cemento.

Minuto 5: adición del agua total (vertido lento).

Minuto 6: adición del aditivo super plastificante (vertido lento)

Minuto 10: adición de las fibras (esparciendo con la mano lentamente)

Minuto 14: Fin de amasado. (se examina si la mezcla está homogénea y se toma un control de la consistencia)

4.2.3.1.1 Amasadora

La amasadora es una amasadora estacionaria marca DIEM WERKE modelo DZ 180V, de eje vertical y tambor fijo, tiene una capacidad máxima de 295 litros, lo suficiente para nuestra investigación.

4.2.3.1.2 Cámara de curado

Las muestras se almacenaron en la cámara de curado No 1 del ICITECH programadas para que cumplan las condiciones de curado de la norma, con una humedad del 100% y una temperatura media de 20 grados Celsius.



Imagen 8 Cámara de curado No 1 ICITECH



Imagen 7 Mezcladora estacionaria DIEM WERKE DZ180V

4.2.3.2 TOMA DE MUESTRA



Imagen 9 Fabricación de probetas de hormigón.

La muestra se toma directamente de la amasadora según la norma UNE EN 12350-1, para esta investigación solo usaron dos tipos de moldes el molde cilíndrico y el prismático, para realizar los ensayos correspondientes.

Los moldes cilíndricos son de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, para tomar la muestra para compresión estos moldes deben ser cubiertos con desencofrante antes de usarse, las muestras se compactan manualmente por medio de una varilla de 16 mm, en llenado de tres capas y con 25 golpes por capa.

Los moldes prismáticos de 100 mm x 100 mm x 500mm son utilizados para los ensayos de flexo tracción al igual que los cilíndricos deben cubrirse del desencofrante antes de usar cuando estén listos se vierte el hormigón, dependiendo de la consistencia puede verse en una o dos capas, se compactan en la mesa vibradora si el hormigón presenta una consistencia seca, en caso de que el hormigón sea fluido se compactara únicamente por medio de la varilla de 16mm.

4.2.4 Ensayos Determinación de propiedades en estado fresco y endurecido

4.2.4.1 Asentamiento cono de Abrams

Cuando se finaliza el proceso de amasado, por cada una de las amasadas se procede inmediatamente a realizar el ensayo de consistencia del hormigón fresco por el método de cono de Abrams según la norma UNE-EN -12350-2:2009, cada uno de los ensayos realizados al hormigón y las observaciones que cada mezcla presento se registraron en las fichas de mezcla, que se pueden revisar en el *anejo 1, fichas hormigón fresco*.



Imagen 10 Ensayo de asentamiento en el cono de Abrams

4.2.4.2 Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión simple del hormigón se ha realizado siguiendo la norma UNE EN 12390-3, el primer paso para realizar el ensayo es refrentar de las probetas, esto con el fin de que el esfuerzo dado por la carga se reparta uniformemente en toda la cara del cilindro, para esto se refrentaran las probetas con azufre a 140 grados Celsius en el molde circular que se muestra en la Imagen 11



Imagen 11 Molde y horno para refrentado con azufre

Luego de esto el cilindro se falla en la maquina IBERTEST, esta prensa cuenta con el software WINTEST que tiene todos los parámetros exigidos por la norma UNE 83304.



Imagen 12 Máquina de compresión IBER TEST

4.2.4.3 Resistencia a la tracción por flexión

Los ensayos de resistencia a flexo tracción con probetas prismáticas se realizaron todos de acuerdo a la adaptación de la UNE-EN 14651:2007+A1, 2008, adaptándolo en las medidas de las probetas a 100 mm x 100 mm x 500 mm, esto para facilitar su fabricación, transporte y ensayo.

Las probetas endurecidas tendrán que ser preparadas antes de ensayar. Lo primero que se hace es una entalla de 18 mm de profundidad en el centro para asegurar que la primera fisura se presente justo ahí, luego de esto para medir esta abertura de fisura se debe instalar el deformímetro que se fijara con cuñas puestas simétricamente a 5 cm de la fisura de la viga como se ve en la imagen 13



Imagen 13 Posición deformímetro y entalla en las vigas prismáticas para ensayo de flexo tracción.

Se conecta la celda de carga y el deformímetro al equipo de adquisición de datos se procede a preparar el software con los datos de la probeta dando su identificación y datos necesarios. El primer paso es aplicar una precarga manual hasta alcanzar una carga entre 0.8 y 0.1 KN. Esto para hacer más corto el tiempo total del ensayo. Tras esto, se programa una velocidad de carga constante de 0.02 mm/min hasta que la fisura alcanza una abertura de 0.5 mm, lo cual suele coincidir con el momento de aparición de la primera fisura, a partir

de este momento se cambia la velocidad de carga a 0.13 mm/min hasta alcanzar una abertura de fisura de 4 mm.



Imagen 15 Montaje ensayo de flexión tracción INSTRON

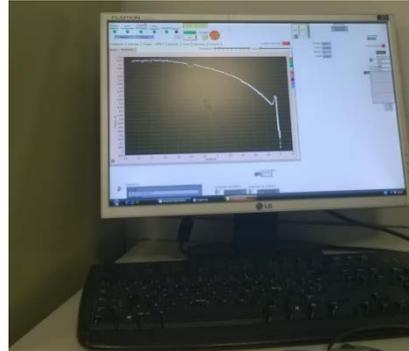


Imagen 14 Salida de datos, software WINTTEST

5 RESULTADOS Y ANALISIS

En este capítulo, se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos a partir de cada uno de los ensayos descritos en el capítulo anterior, los resultados a analizar serán tanto los realizados al hormigón fresco como al hormigón endurecido, dando una especial atención a la adaptación del ensayo a flexión UNE-EN 14651:2007 debido a que como se introdujo en el estado del arte, la resistencia a flexión y resistencias residuales medidas en este ensayo son uno de los parámetros principales que se analizan en hormigones con fibras.

Como se explicó en los capítulos anteriores el foco del actual trabajo es la influencia de la variación del módulo de distribución (q) en el modelo de Andreassen y Andersen en las características en estado fresco y endurecido del hormigón con fibras, por lo tanto, es en este parámetro en el que se ha centrado el análisis de resultados, es decir se enfoca en hacer la comparación de resultados a partir de este factor, sin dejar de analizar las demás variables.

Se presentan los resultados en dos apartados principales, estos son: características medidas en estado fresco: Cono de Abrams y características medidas en estado endurecido: Resistencia a la compresión y Resistencia a la flexo-tracción.

5.1 Caracterización Hormigón Estado fresco

5.1.1 Ensayo de consistencia del hormigón en estado fresco por cono de Abrams

El ensayo de asentamiento se llevó a cabo en todas las amasadas realizadas, el objetivo inicial planteado fue el de mantener un asentamiento constante para todas las amasadas modificando el aditivo vertido en la mezcla, sin embargo llevar esto a la práctica ha representado una gran dificultad, debido que al variar el módulo de distribución (q) la demanda de agua cambiaba significativamente y no era fácilmente predecible el cambio en la demanda de aditivo, sin embargo, a pesar de no haber mantenido el asentamiento en un solo valor los asentamiento se han movido en rangos pequeños para cada uno de los grupos analizados.

El aditivo fue dosificado en función de la observación y experimentación: es decir mientras este era amasado, se tocaba, se observaba el esfuerzo de las espas al mezclar y su aspecto en general, en base a esto se adicionaba el aditivo hasta que según el criterio anteriormente mencionado fuera un hormigón trabajable, según la dosificación podía ser más o menos certero este procedimiento por lo que para esto también fueron realizadas muestras de sacrificio para conocer un rango inicial de demanda de aditivo en cada uno de los hormigones planteados.

Debido a que se tienen dos parámetros variables tales como el contenido de aditivo y el asentamiento del hormigón, realizar la comparación directamente con estos supone una dificultad en el momento de graficar sus datos y hacer visible la tendencia que se desea mostrar por lo se ha calculado la demanda de aditivo para cada una de las amasadas a partir del asentamiento total y el volumen total de aditivo exigido para llegar a él, a partir de esta variable (demanda de aditivo) se ha realizado el siguiente análisis.

5.1.1.1 Influencia de la adición de fibras en el estado fresco del hormigón

A pesar que el objetivo inicial del estudio no es el de identificar la variación de las características en función de la adición de fibras, se analizará en este capítulo, para realizar observaciones que nos permiten auditar si se han fabricado los hormigones de la manera correcta y si se presentan las tendencias lógicas que ya son dadas por hecho en el estudio de los hormigones con fibras.

5.1.1.1.1 Hormigón tipo A.

No	Tipo De Fibra	Exponente Q en modelo A&A	Kg/m3 De Fibra	Asentamiento en cm	% de aditivo	Demanda gr/cm
17	HORMIGÓN SIN FIBRAS	0,25	0	22	0,40	55
7	HORMIGÓN SIN FIBRAS	0,30	0	20	0,30	45
14	DRAMIX 65 5D 30 Kg	0,25	30	17	0,40	71
10	DRAMIX 65 5D 30 Kg	0,30	30	14	0,25	54
16	DRAMIX 65 5D 60 Kg	0,25	60	20	0,50	75
8	DRAMIX 65 5D 60 Kg	0,30	60	16	0,30	56
9	DRAMIX 65 5D 100 Kg	0,30	100	14	0,31	66
17	HORMIGÓN SIN FIBRAS	0,25	0	22	0,40	55
7	HORMIGÓN SIN FIBRAS	0,30	0	20	0,30	45
13	SIKA FIBER M38 5 Kg	0,25	5.	17,5	0,50	86
11	SIKA FIBER M38 5 Kg	0,30	5	15,5	0,30	58
15	SIKA FIBER M38 10 Kg	0,25	10.	18,5	0,54	88
12	SIKA FIBER M38 10 Kg	0,30	10	14	0,30	64

Tabla 16 Resultados Cono De Abrams Hormigón Tipo A, Primera fase

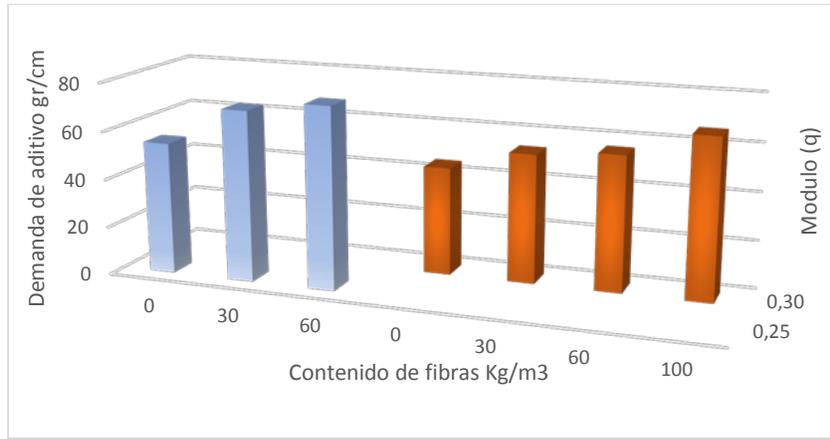


Ilustración 24 Diagrama De Barras demanda de aditivo Hormigón A con fibras Dramix 65 5D

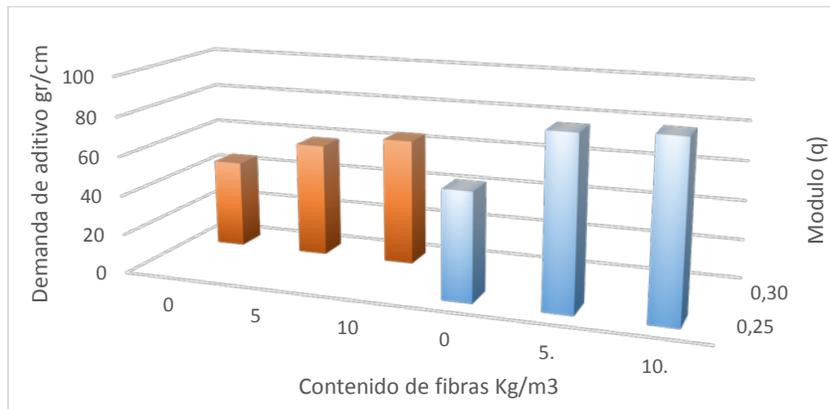


Ilustración 25 Diagrama De Barras demanda de aditivo Hormigón A con fibras Sika Fiber M 38

5.1.1.1.2 Hormigón tipo B.

No	Tipo De Fibra	Exponente Q en modelo A&A	Kg/m3 De Fibra	Asentamiento en cm	% de aditivo	Demanda gr/cm
4	HORMIGÓN SIN FIBRAS	0,30	0	22,5	0,60	113,33
2	HORMIGÓN SIN FIBRAS	0,35	0	12,5	0,30	102,00
18	HORMIGÓN SIN FIBRAS	0,40	0	15,5	0,30	82,26
6	ACERO 80/30 50KG	0,30	50	20,5	1,00	207,32
1	ACERO 80/30 50KG	0,35	50	21	0,65	131,55
5	ACERO 80/30 100 KG	0,30	100	20	1,10	233,75
3	ACERO 80/30 100 KG	0,35	100	23	0,80	147,83
19	ACERO 80/30 100 KG	0,40	100	8	0,25	132,81

Tabla 17 Resultados Cono De Abrams Hormigón Tipo B, Primera fase

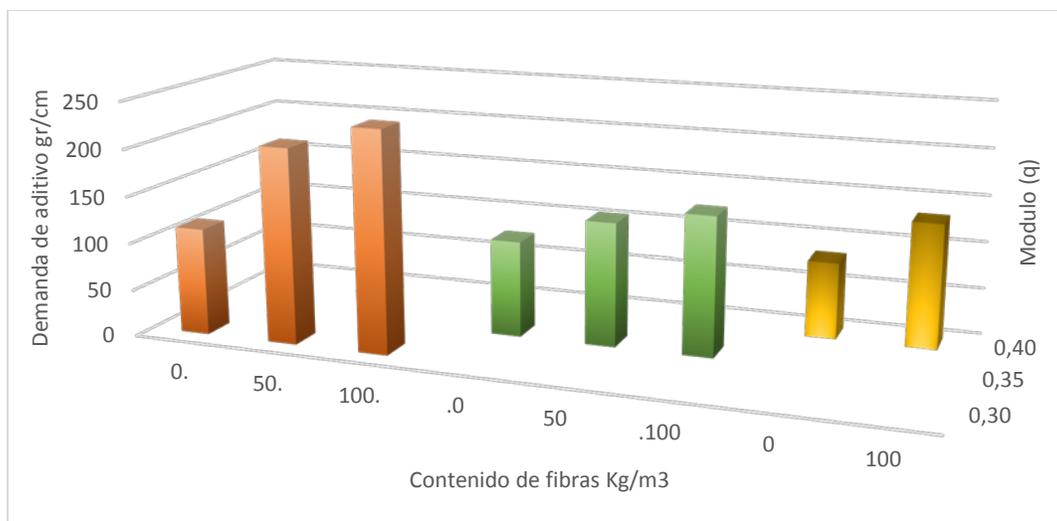


Ilustración 26 Diagrama De Barras demanda de aditivo Hormigón B con fibras Dramix 80/30

La demanda de agua es una característica muy importante en los hormigones con fibras, dado que una de las particularidades que presentan estos frente a los convencionales es el aumento de la misma y la incorporación de aditivos reductores de esta, la Ilustración 24, Ilustración 25 y Ilustración 26 muestran la tendencia que el aumentar el contenido de fibras en la matriz, exigirá un aumento en el volumen de aditivo vertido en la mezcla, esto sucede porque las fibras aumentan el área superficial que debe ser cubierta por la pasta, lo que hace que se necesite más agua para lograr la consistencia deseada, este comportamiento como se dijo anteriormente es un comportamiento que nos permite hacer un control al estudio.

5.1.1.2 Influencia de la variación del módulo de distribución (q) de fibras en el estado fresco del hormigón.

5.1.1.2.1 Hormigón Tipo A (Primera fase)

No	Tipo De Fibra	Exponente Q en modelo A&A	Kg/m3 De Fibra	Asentamiento en cm	% de aditivo	Demanda gr/cm
17	HORMIGÓN SIN FIBRAS	0,25	0	22	0,40	55
7	HORMIGÓN SIN FIBRAS	0,30	0	20	0,30	45
14	DRAMIX 65 5D 30 KG	0,25	30	17	0,40	71
10	DRAMIX 65 5D 30 KG	0,30	30	14	0,25	54
16	DRAMIX 65 5D 60 KG	0,25	60	20	0,50	75
8	DRAMIX 65 5D 60 KG	0,30	60	16	0,30	56
9	DRAMIX 65 5D 100 KG	0,30	100	14	0,31	66
17	HORMIGÓN SIN FIBRAS	0,25	0	22	0,40	55
7	HORMIGÓN SIN FIBRAS	0,30	0	20	0,30	45
13	SIKA FIBER M38 5 KG	0,25	5.	17,5	0,50	86
11	SIKA FIBER M38 5 KG	0,30	5	15,5	0,30	58
15	SIKA FIBER M38 10 KG	0,25	10.	18,5	0,54	88
12	SIKA FIBER M38 10 Kg	0,30	10	14	0,30	64

Tabla 18 Resultados Cono de Abrams Hormigón Tipo A, Primera fase

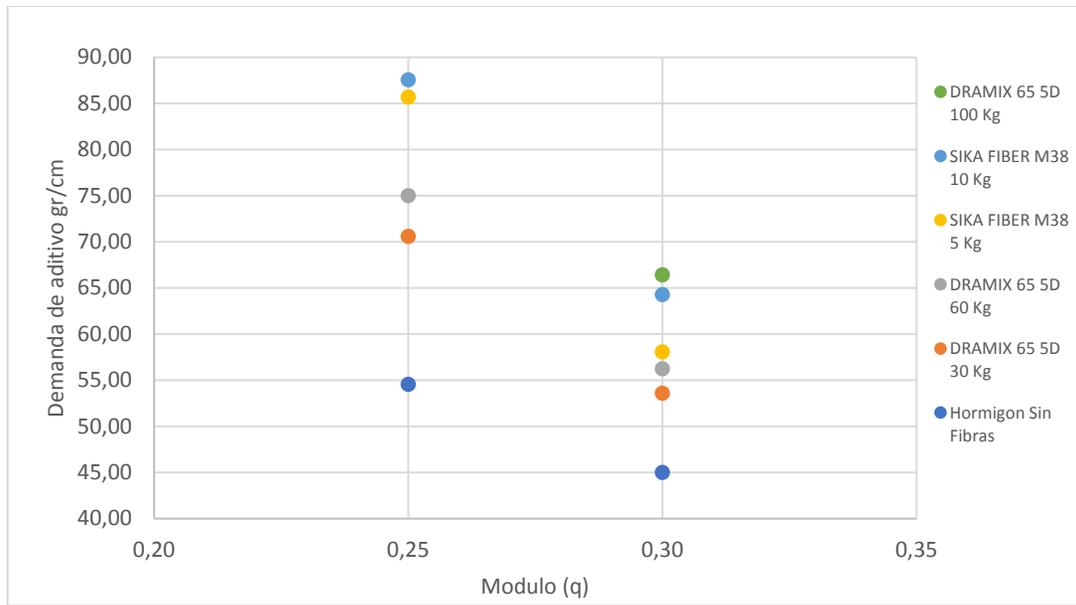


Ilustración 27 Diagrama de Puntos demanda de aditivo Hormigón Tipo A, Primera fase

Como se observa en la Ilustración 27, la tendencia es que al aumentar el módulo de distribución (q) del hormigón, se disminuye la demanda de aditivo. Esto se puede ver para las 13 dosificaciones propuestas en esta etapa, lo que quiere decir que al hacer hormigones con un menor contenido de finos, nos permitirá disminuir el aditivo vertido. Otra observación importante en esta gráfica es que los hormigones con fibra de polipropileno (Sika Fiber M38) demandan más aditivo que los hormigones con fibras metálicas, esto es porque sus dimensiones son mayores y su área superficial es mayor frente a la de las fibras DRAMIX 65 5D como ya se había mostrado en la tabla 9, además los resultados son congruentes al situar en el punto mínimo de demanda al hormigón que no contiene fibras,

5.1.1.2.2 Hormigón Tipo A (Segunda fase)

No	Exponente Q en modelo A&A	Asentamiento en cm	% de aditivo	Demanda gr/cm
25	0,20	2	0,50	750
26	0,25	3	0,50	500
27	0,30	2	0,37	555
28	0,35	3	0,37	370
31	0,40	2	0,20	300
32	0,45	4	0,20	150

Tabla 19 Resultados Cono De Abrams Hormigón Tipo A, Segunda Fase

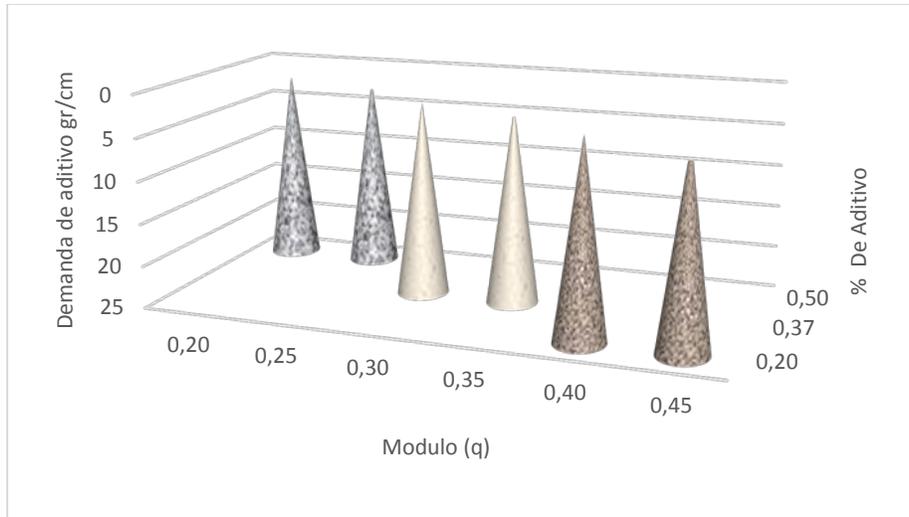


Ilustración 28 Resultados Cono De Abrams Hormigo Tipo A, Segunda Fase

Es importante hacer la aclaración que aunque que el valor del asentamiento es bajo, los hormigones con los módulos (q) de menor valor, fueron hormigones cohesivos que se permitieron colocar de manera adecuada y su fabricación fue fácil, sin embargo los hormigones en la última parte del espectro correspondientes a los módulos 0,40 y 0,45 presentaron dificultades en el momento de su fabricación: esto debido a que eran hormigones con bajos asentamientos al igual que los anteriores, pero con una mayor dificultad para su colocación y vibración, por lo que quisimos aumentar la dosis de aditivo, sin embargo hacer esto nos llevó a obtener un hormigón segregado e inviable, el rango de estos dos hormigones entre ser un hormigón seco y ser un hormigón segregado, fue muy pequeño, por lo cual se deja como observación para estas dosificaciones que son inviables de fabricar debido a su alta dificultad para encontrar la trabajabilidad adecuada.

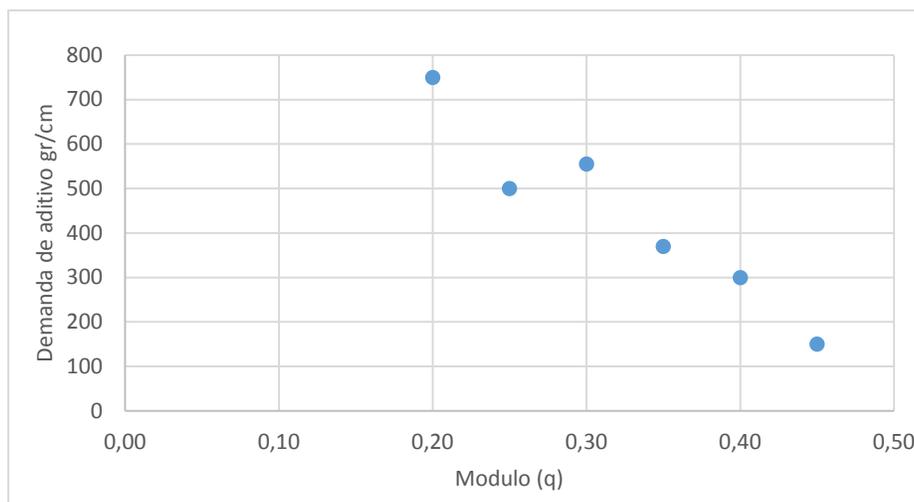


Ilustración 29 Diagrama de Puntos demanda de aditivo Hormigón Tipo A, Segunda fase

La Ilustración 29 nos permite visualizar mejor la influencia de modificar el módulo de distribución (q), en el hormigón con fibras, lo primero a comentar es que se observa claramente que la demanda de aditivo disminuye a medida que se aumenta el módulo (q), sin embargo esta disminución no se realiza en la misma proporción en cada cambio, si no que para unos saltos es más importante y para otros mucho más leve, esto se debe a que el área superficial no disminuye de manera constante junto con el módulo (q), si no que según la acomodación de las partículas esta disminución puede ser mayor o menor de módulo a módulo dependiendo del rango donde se encuentre.

5.1.1.2.3 Hormigón Tipo B (Primera fase)

No	Tipo De Fibra	Exponente Q en modelo A&A	Kg/m ³ De Fibra	Asentamiento en cm	% de aditivo	Demanda gr/cm
4	HORMIGÓN SIN FIBRAS	0,30	0	22,5	0,60	113,33
2	HORMIGÓN SIN FIBRAS	0,35	0	12,5	0,30	102,00
18	HORMIGÓN SIN FIBRAS	0,40	0	15,5	0,30	82,26
6	ACERO 80/30 50KG	0,30	50	20,5	1,00	207,32
1	ACERO 80/30 50KG	0,35	50	21	0,65	131,55
5	ACERO 80/30 100 KG	0,30	100	20	1,10	233,75
3	ACERO 80/30 100 KG	0,35	100	23	0,80	147,83
19	ACERO 80/30 100 KG	0,40	100	8	0,25	132,81

Tabla 20 Resultados Cono De Abrams Hormigón Tipo B, Primera Fase

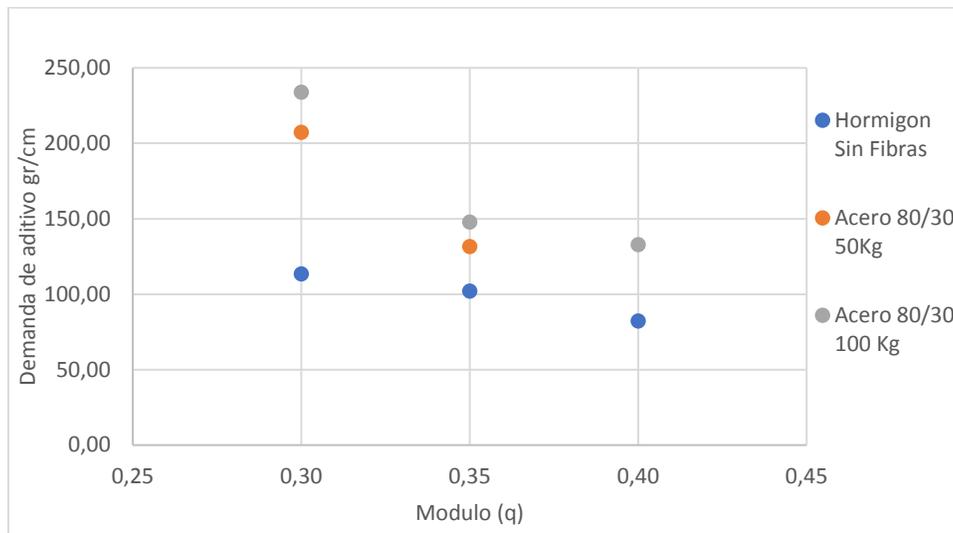


Ilustración 30 Diagrama de Puntos demanda de aditivo Hormigón Tipo B, Primera fase

Al igual que la Ilustración 27 la Ilustración 30, repite la tendencia encontrada para el hormigón A, que al disminuir el contenido de finos nos permitirá también disminuir la demanda de aditivo en la mezcla, se presenta también congruencia respecto a la adición de fibras dado que los puntos más altos son para el hormigón con mayor contenido en fibras y los puntos más bajos corresponden al hormigón sin fibras.

5.1.1.2.4 Hormigón Tipo B (Segunda fase)

No	Exponente Q en modelo A&A	Asentamiento en cm	% de aditivo	Demanda gr/cm
23	0,20	20	1,40	298
24	0,25	23	1,40	259
29	0,30	16	0,70	186
30	0,35	19	0,70	157
33	0,40	16	0,50	133
34	0,45	18	0,50	118

Tabla 21 Resultados Cono De Abrams Hormigón Tipo B, Segunda Fase

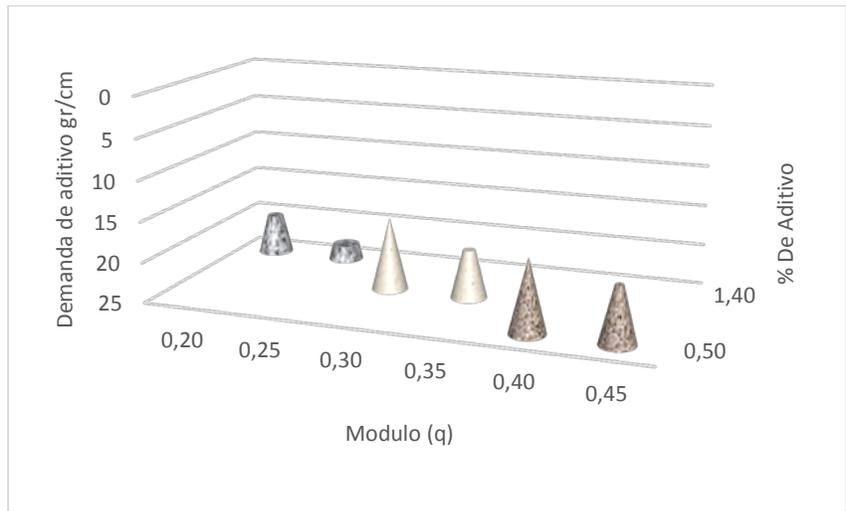


Ilustración 31 Resultados Cono De Abrams Hormigón Tipo B, Segunda Fase

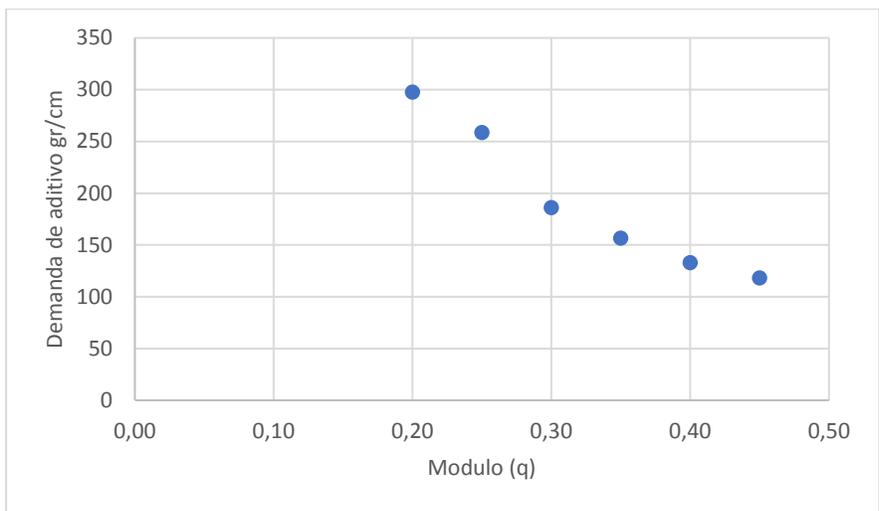


Ilustración 32 Diagrama de Puntos demanda de aditivo Hormigón Tipo B Primera fase

Al igual que la Ilustración 29 la Ilustración 32 muestra la tendencia que el aumentar el contenido de finos en la mezcla exigirá de ella también aumentar el contenido de aditivo , la tendencia es clara, pero además se puede observar que los primeros tres puntos tienen una disminución en la demanda mucho más notable e importante que los últimos puntos , esto se debe como se había dicho antes que la disminución en el área superficial de la masa de áridos no es constante si no que se acomoda en función de la variación de su módulo (q)

5.2 Caracterización Hormigón Estado Endurecido

5.2.1 Ensayo de resistencia a la compresión.

Como se vio en el apartado del programa experimental en cada amasada se fabricaron tres cilindros de hormigón de 150mm x 300 mm para conocer su resistencia a compresión, primero con el fin de realizar un control sobre la uniformidad del hormigón y calidad en su fabricación , pero además y no menos importante para evaluar también como característica mecánica que podría verse influenciada por el modelo de empaquetamiento de los agregados en el hormigón, para efectos de nuestra investigación solo nos ha interesado obtener el $f'c$ por lo que solo hemos evaluado la resistencia a hormigón a los 28 días.

5.2.1.1.1 Hormigón tipo A.

COMPARACION HORMIGON TIPO A DRAMIX 65-5D		
Kg/m3 Fibra	Q A&A	$f'c$ MPa
0	0,25	34,85
0	0,30	34,20
30	0,25	38,28
30	0,30	34,36
60	0,25	37,34
60	0,30	35,06

Tabla 22 Resultados a Compresión hormigón Tipo A con fibras Dramix 65-5D

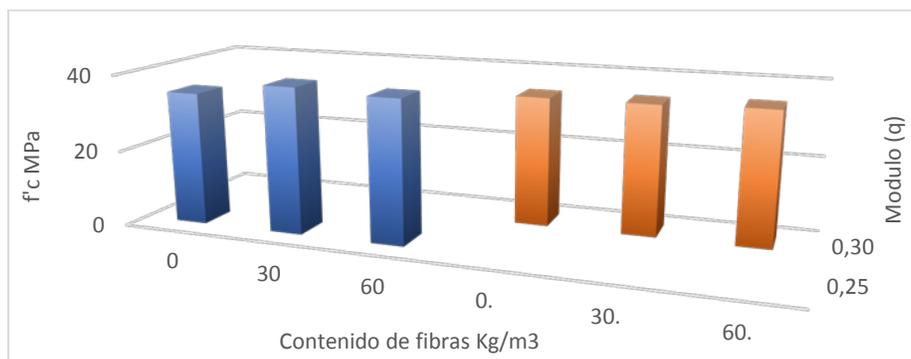


Ilustración 33 Diagrama de Barras Resultados a Compresión Hormigón Tipo A con fibras Dramix 65-5D.

COMPARACION HORMIGON TIPO A SIKA FIBER M38		
Kg/m3 Fibra	Q A&A	f'c MPa
0	0,25	34,85
0	0,30	34,20
5	0,25	35,56
5	0,30	31,55
10	0,25	33,96
10	0,30	33,43

Tabla 23 Resultados a Compresión hormigón Tipo A con fibras Sika Fiber M38

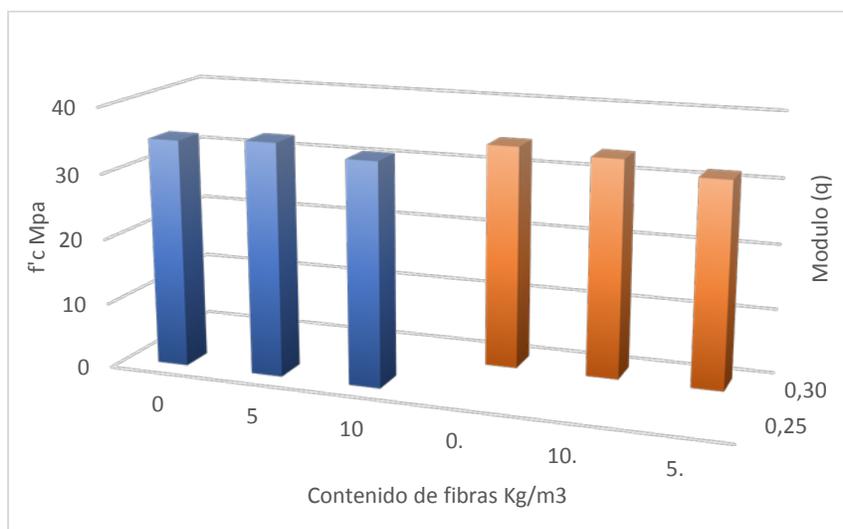


Ilustración 34 Diagrama de Barras Resultados a Compresión Hormigón Tipo A con fibras Sika Fiber M38.

Es apreciable que ninguno de los dos tipos de fibras incluidas en esta fase para el hormigón A, modifica de manera importante la resistencia a compresión, esta no se ve afectada ni positiva ni negativamente, por lo que se puede concluir que para el hormigón A de TM 20 la adición de fibras de polipropileno y Acero no significa ningún cambio en su resistencia a compresión.

5.2.1.1.1 Hormigón tipo B.

COMPARACION HORMIGON TIPO B ACERO 80/30		
Kg/m3 Fibra	Q A&A	f'c MPa
0	0,30	60,4
0	0,35	58,2
0	0,40	50,7
50	0,30	56,3
50	0,35	52,0
100	0,30	57,9
100	0,35	53,3
100	0,40	51,4

Tabla 24 Resultados a Compresión hormigón Tipo B con fibras Acero 80/30

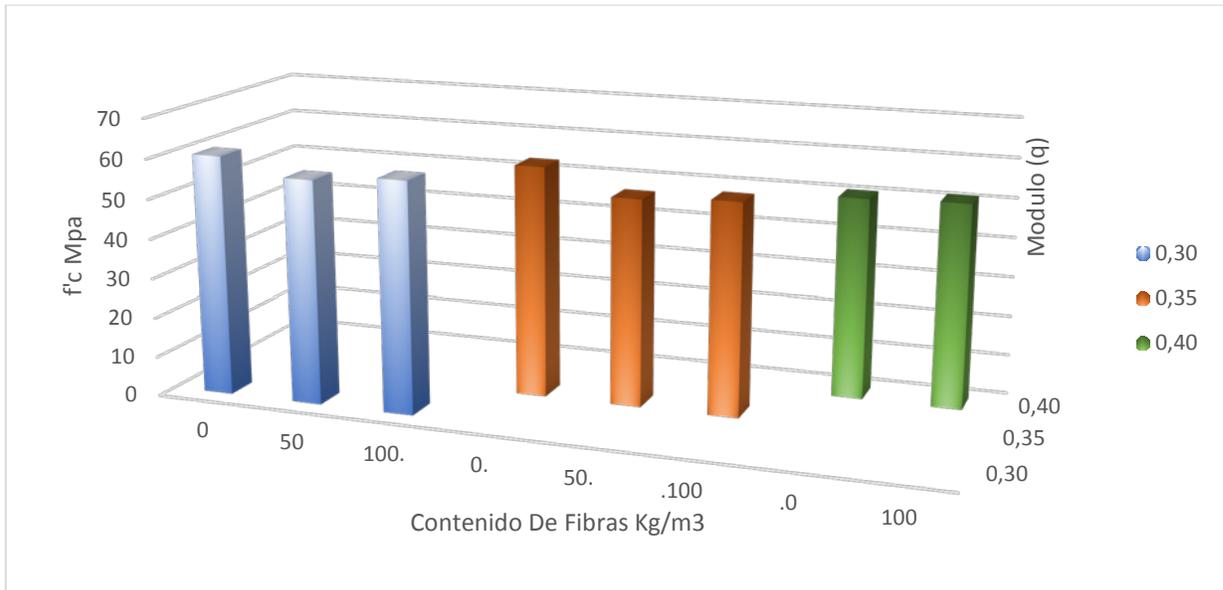


Ilustración 35 Diagrama de Barras Resultados a Compresión Hormigón Tipo B con fibras Sika Acero 80/30

Al igual que para el hormigón A, la inclusión y aumento de las fibras en el hormigón B, no significa un aumento o mejoramiento en su resistencia a compresión, e incluso en el caso de los hormigones con módulos de distribución q (0,35) y q (0,30) las resistencias se ven disminuidas al aumentar su contenido en fibras, sin embargo, no significativamente y no para considerarse una desventaja de la inclusión de fibras.

5.2.1.2 Influencia de la variación del módulo de distribución (q) de fibras en la resistencia a compresión del hormigón

5.2.1.2.1 Hormigón Tipo A (Primera fase)

COMPARACION HORMIGON TIPO A DRAMIX 65-5D		
Kg/m3 Fibra	Q A&A	f'c MPa
0	0,25	34,85
0	0,30	34,20
30	0,25	38,28
30	0,30	34,36
60	0,25	37,34
60	0,30	35,06

Tabla 25 Resultados a Compresión hormigón Tipo A con fibras Dramix 65-5D

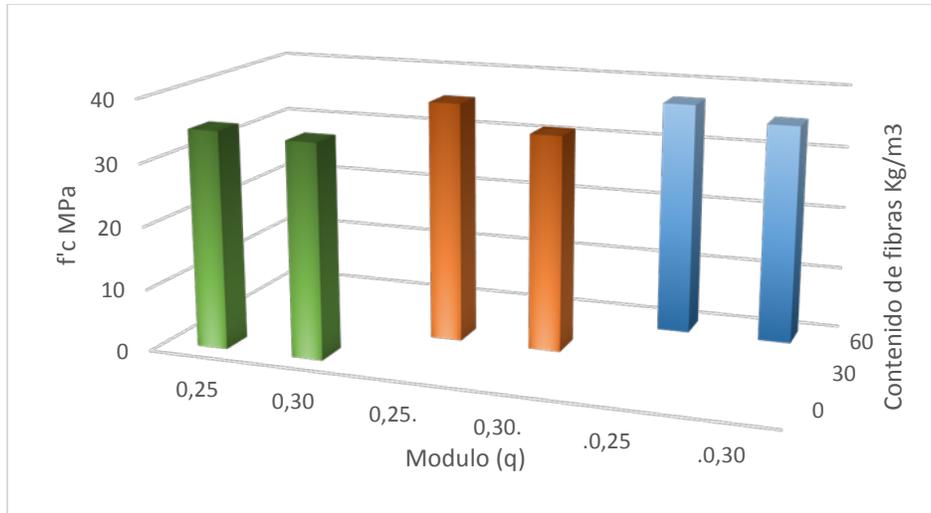


Ilustración 36 Diagrama de Barras Resultados a Compresión Hormigón Tipo A con fibras Sika Dramix 65-5D

Para esta fase del análisis solo hemos analizado dos módulos de distribución para cada una de las dosificaciones. Sin embargo, con estos dos puntos ya se observa que las resistencias del módulo q 0,25 es mayor para las tres dosificaciones respecto a las resistencias obtenidas en el módulo q:0,30, este aumento es mínimo y puede considerarse también una dispersión de resultados, sin embargo, como más adelante ser vera cuando se aumente el espectro de módulos (q) observados esta tendencia será mucho más visible he importante.

COMPARACION HORMIGON TIPO A SIKA FIBER M38		
Kg/m3 Fibra	Q A&A	f'c MPa
0	0,25	34,85
0	0,30	34,20
5	0,25	35,56
5	0,30	31,55
10	0,25	33,96
10	0,30	33,43

Tabla 26 Resultados a Compresión hormigón Tipo A con fibras Sika Fiber M38

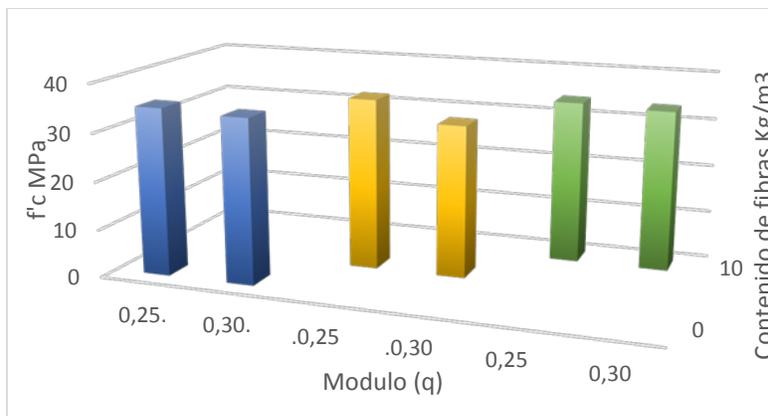


Ilustración 37 Diagrama de Barras Resultados a Compresión hormigón tipo A, con fibra Sika Fiber M38.

5.2.1.2.2 Hormigón Tipo A (Segunda fase)

TM 20 10Kg SIKA FIBER M38	
Q A&A	f'c MPa
0,20	35,8
0,25	34,8
0,30	29,3
0,35	34,5
0,40	26,1
0,45	22,1

Tabla 27 Resultados a Compresión hormigón Tipo A, Segunda Fase

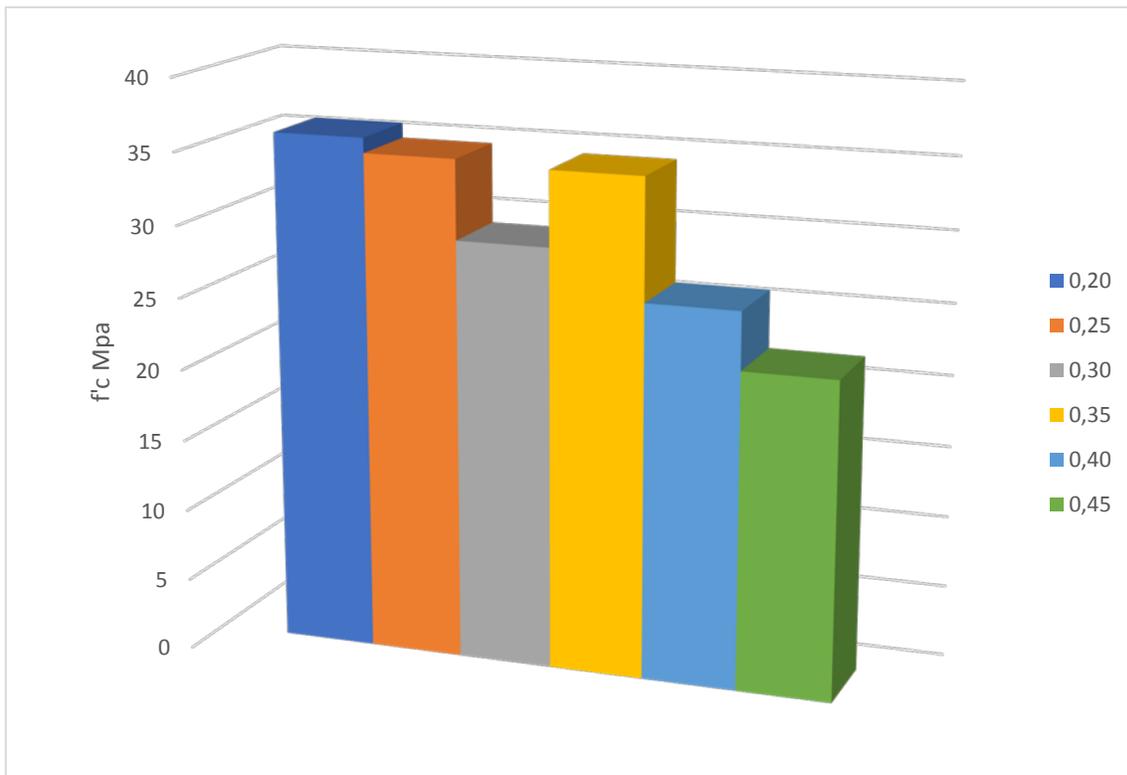


Ilustración 38 Diagrama de Barras Resistencia a Compresión Hormigón Tipo A, Segunda Fase

Como se manifestó en el párrafo anterior, al ampliar el análisis respecto al módulo (q), se hace mucho más visible la mejora que presenta la resistencia a compresión del hormigón al disminuir su modelo de distribución (q), es importante señalar que el hormigón correspondiente al módulo $q:0,45$ no cumplió la resistencia especificada (25 MPa), este resultado coincide con la dificultad de fabricación descrita en el numeral de análisis de las propiedades en estado fresco, por lo que nos lleva a inferir que trabajar en valores muy altos de módulos (q), puede significar también disminuciones en sus características mecánicas debido a la dificultad de su colocación.

5.2.1.2.3 Hormigón Tipo B (Primera fase)

COMPARACION HORMIGON TIPO A ACERO 80/30		
Kg/m3 Fibra	Q A&A	f' c MPa
0	0,30	60,4
0	0,35	58,2
0	0,40	50,7
50	0,30	56,3
50	0,35	52,0
100	0,30	57,9
100	0,35	53,3
100	0,40	51,4

Tabla 28 Resultados a Compresión hormigón Tipo B con fibras Acero 80/30

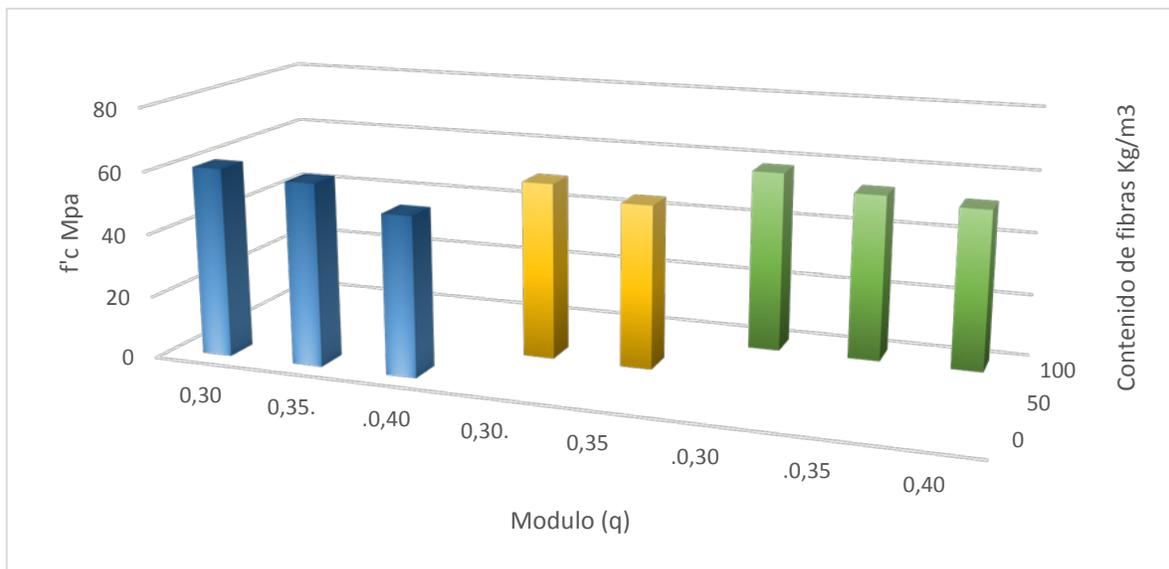


Ilustración 39 Diagrama de Barras Resultados a Compresión hormigón tipo B, con fibra Acero 80/30

En el Ilustración 39 se observa la misma tendencia que en la Ilustración 38, esta es que el disminuir el módulo (q), en las dosificaciones de hormigón mejora la resistencia mecánica a compresión.

5.2.1.2.4 Hormigón Tipo B (Segunda fase).

TM 20 10Kg SIKA FIBER M38	
Q A&A	f'c MPa
0,20	66,6
0,25	56,4
0,30	53,7
0,35	47,4
0,40	51,3
0,45	45,9

Tabla 29 Resultados a Compresión hormigón Tipo B Segunda Fase

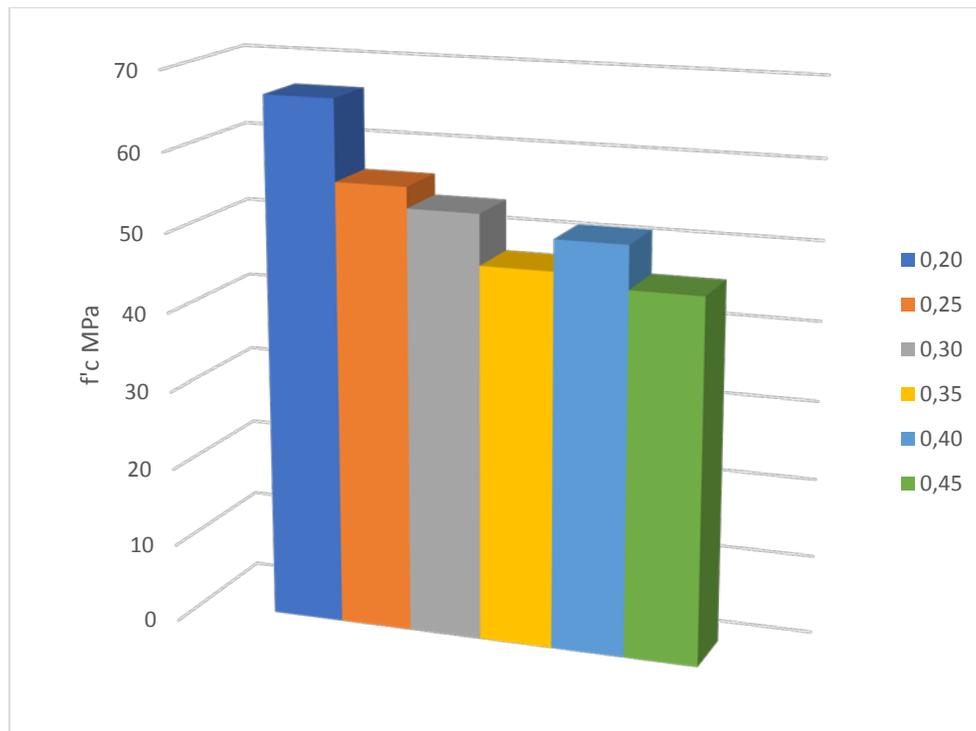


Ilustración 40 Diagrama de Barras Resultados a Compresión Hormigón Tipo B, Segunda Fase

Al igual que en la Ilustración 39 en la que el hormigón mejora su resistencia a medida que se disminuye su módulo (q), la Ilustración 40 muestra que las resistencias más altas son las obtenidas por hormigones dosificados con los menores módulos (q), a diferencia de la campaña anterior todos los hormigones cumplieron con la resistencia especificada.

5.2.2 Ensayo de resistencia a la Flexo tracción.

En este punto se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a flexo tracción a tres puntos con probetas prismáticas. El principal objetivo de este estudio como ya se ha comentado anteriormente es el evaluar la influencia de la variación del módulo de distribución (q), en las características mecánicas del hormigón con fibras. En el estado del arte hemos visto que la propiedad más importante a medir en hormigones con fibras es la resistencia a la flexión, puesto que esta es una de las que más varía cuando se incluyen fibras en el hormigón por lo que hemos enfocado una especial atención en este capítulo.

En este punto hemos evaluado tanto la resistencia limite como las resistencias residuales según lo indica la norma UNE EN 14651 se ha medido a 0,5 1,5 2,5 y 3,5 mm de abertura de fisura.

5.2.2.1 Influencia de la adición de fibras en la resistencia limite a flexo tracción del hormigón.

Se realizará el análisis de la resistencia a flexo tracción del hormigón separando la resistencia límite de las resistencias residuales, se consideró importante hacer esta separación debido a que el comportamiento residual del hormigón con fibras es el que confiere su mayor ventaja y es importante analizarlo como un parámetro diferente al de la resistencia limite.

5.2.2.1.1 Hormigón tipo A

COMPARACION HORMIGON TIPO A DRAMIX 65 5D		
ROTULO	Q A&A	F lim
0	0,25.	4,84
60	.0,25	4,14
30	0,25	4,10
0	0,30.	3,48
60	0,30	4,24
30	.0,30	3,63

Tabla 30 Resistencia Limite Hormigón Tipo A con fibras Dramix 65 -5D

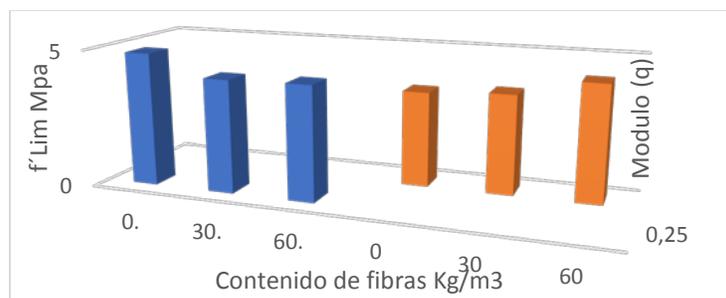


Ilustración 41 Diagrama de Barras Resistencia Limite Hormigón Tipo A con fibras Dramix 65-5D.

COMPARACION HORMIGON TIPO A SIKA FIBER M38		
Kg/m3 Fibra	Q A&A	F lim MPa
0	0,25.	4,84
0	0,30.	3,48
5	.0,25	3,80
5	.0,30	4,00
10	0,25	3,98
10	0,30	3,16

Tabla 31 Resistencia Limite Hormigón Tipo A con fibras Sika Fiber M38

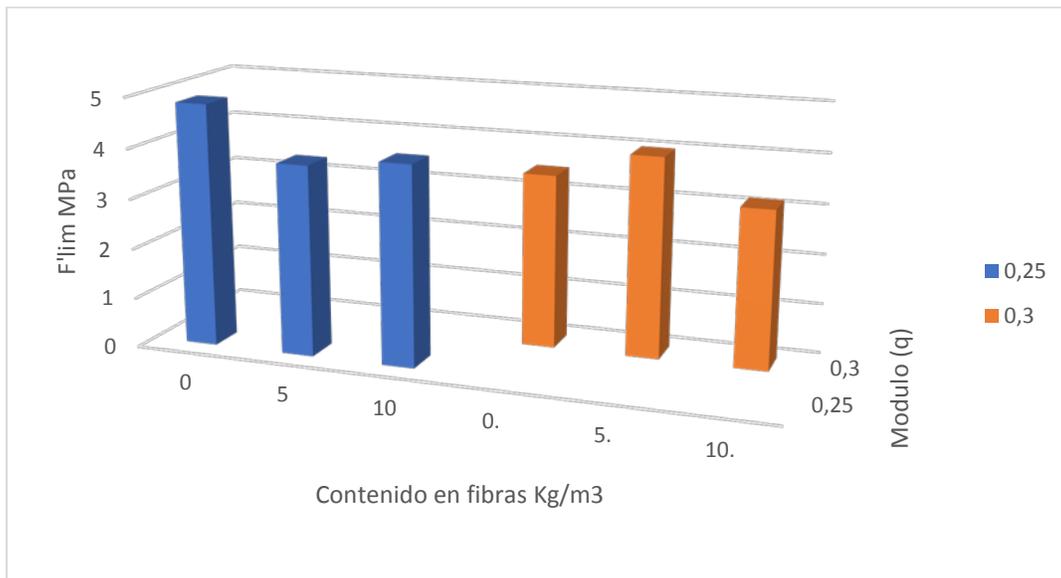


Ilustración 42 Diagrama de Barras Resistencia Limite Hormigón Tipo A con fibras Sika Fiber M38.

La resistencia límite del hormigón a flexo tracción y a la resistencia a compresión del hormigón guardan una relación importante, por lo que extrapolar este análisis a los vistos en la Ilustración 33 e Ilustración 35 resulta interesante , al igual que la resistencia a compresión la resistencia límite a flexo tracción del hormigón no se ve afectada por la inclusión del fibras, como se puede observar en la Ilustración 41 e Ilustración 42

5.2.2.1.2 Hormigón tipo B

COMPARACION HORMIGON TIPO B-ACERO 80/30		
Kg/m3 Fibra	Q A&A	F lim MPa
0.	0,30	3,32
0	0,35	3,98
.0	0,40	2,75
50.	0,30	4,48
50	0,35	5,05
100.	0,30	5,81
100	0,35	5,01
.100	0,40	4,77

Tabla 32 Resistencia Limite Hormigón Tipo B con fibras Acero 80/30

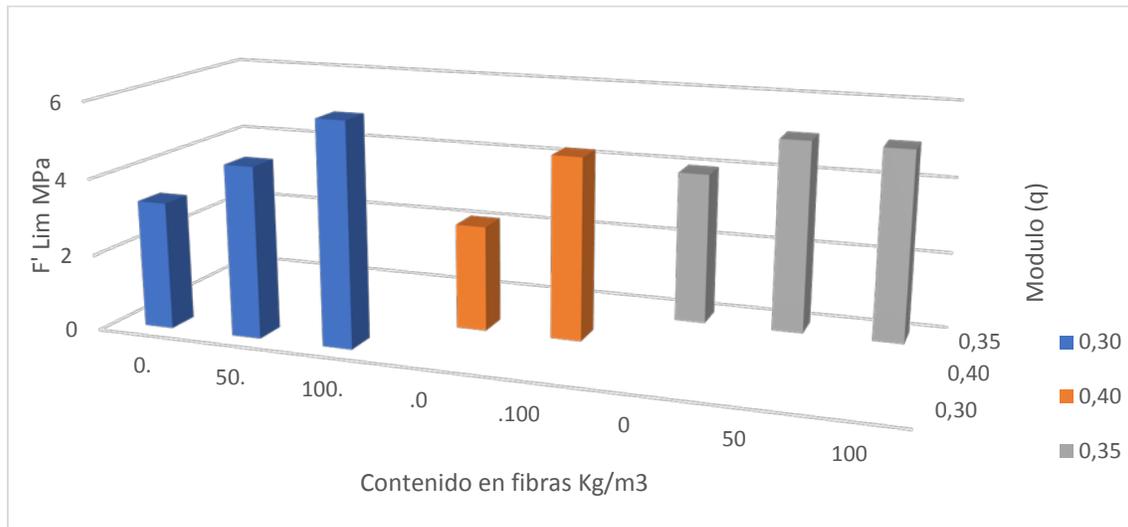


Ilustración 43 Diagrama de Barras Resistencia Limite Hormigón Tipo B con fibras Sika Acero 80/30

Lo observado en la Ilustración 43 difiere un poco con lo encontrado en las anteriores, dado que en estas en el caso del hormigón con módulo de distribución q (0,25) y (0,30) el aumento en la dosificación de fibras ha significado también un aumento en su resistencia limite a flexo tracción, esto podrá observarse con mayor claridad en los resultados analizados en la siguiente etapa.

5.2.2.2 Influencia de la variación del módulo de distribución (q) de fibras en la resistencia limite a flexo tracción del hormigón.

5.2.2.2.1 Hormigón Tipo A (Primera fase)

COMPARACION HORMIGON TIPO A DRAMIX 65 5D		
Kg/m3 Fibra	Q A&A	F lim MPa
0	0,25.	4,84
60	.0,25	4,14
30	0,25	4,10
0	0,30.	3,48
60	0,30	4,24
30	.0,30	3,63

Tabla 33 Resistencia Limite Hormigón Tipo A con fibras Dramix 65 -5D

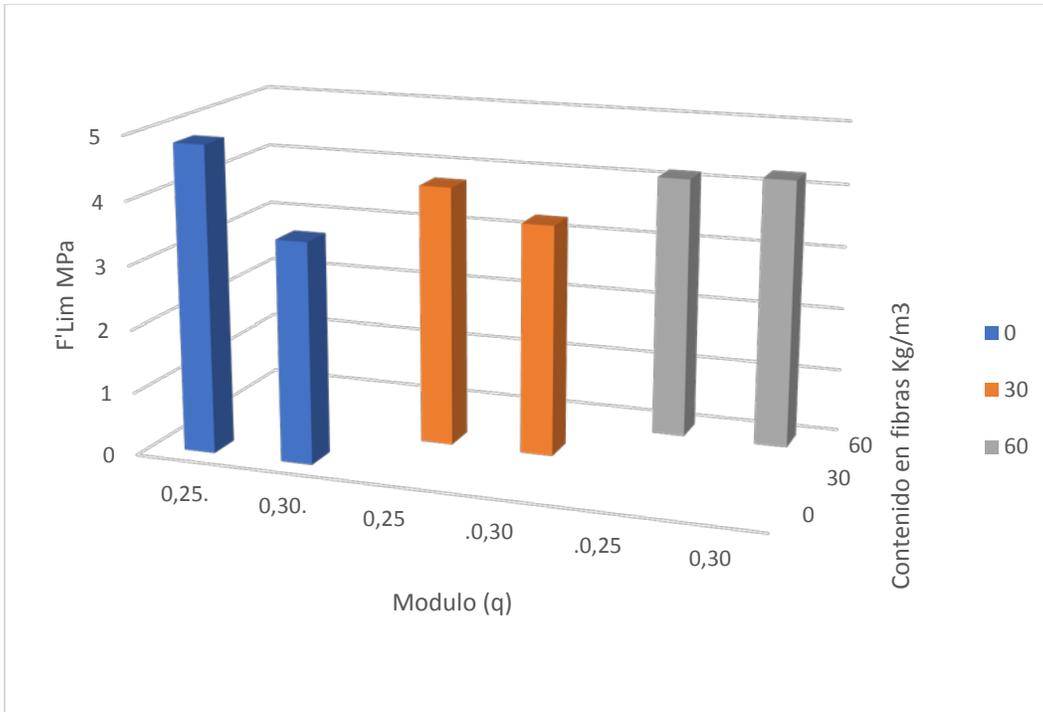


Ilustración 44 Diagrama de Barras Resistencia Limite Hormigón Tipo A con fibras Sika Dramix 65-5D

COMPARACION HORMIGON TIPO A SIKA FIBER M38		
Kg/m3 Fibra	Q A&A	F lim MPa
0	0,25.	4,84
0	0,30.	3,48
5	0,25	3,80
5	0,30	4,00
10	0,25	3,98
10	0,30	3,16

Tabla 34 Resistencia Limite Hormigón Tipo A con fibras Sika fiber M38

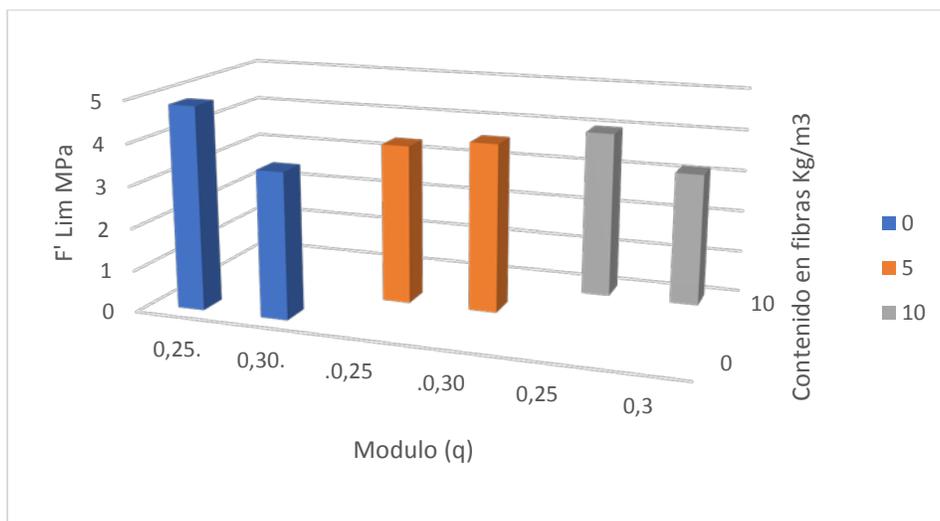


Ilustración 45 Diagrama de Barras Resistencia Limite hormigón tipo A, con fibra Sika Fiber M38.

En la *Ilustración 44* y *Ilustración 45* se observa la misma tendencia que se presentó para la resistencia a compresión, esto es que a medida que se aumenta el contenido de finos la resistencia límite del hormigón aumenta.

5.2.2.2.2 Hormigón Tipo A (Segunda fase)

TM 20 10Kg SIKA FIBER M38	
Q A&A	F lim MPa
0,20	3,8
0,25	3,8
0,30	3,5
0,35	4,5
0,40	3,3
0,45	2,8

Tabla 35 Resistencia Límite Hormigón Tipo A Segunda Fase

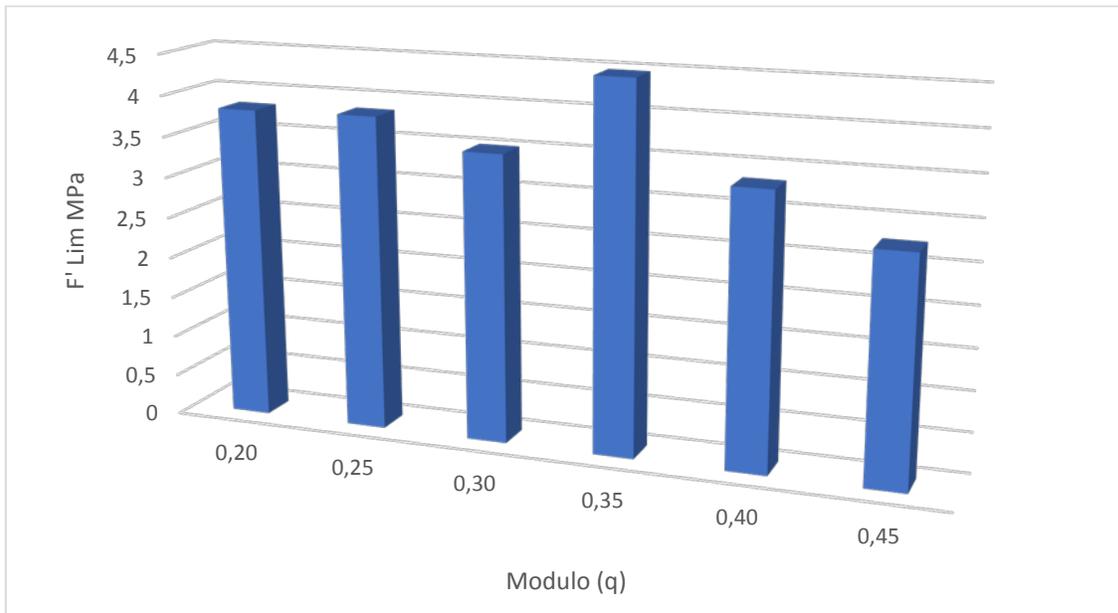


Ilustración 46 Diagrama de Barras Resistencia Limite Hormigón Tipo A, Segunda Fase

Es interesante comprobar la relación que guarda la resistencia límite a flexión con la resistencia a compresión del hormigón dado que la tendencia de la *Ilustración 46* y la *Ilustración 38* es la misma, las dos presentan un valor alto en el hormigón correspondiente al módulo ($q:0,35$), pero sin embargo al observar los demás datos la tendencia es que al aumentar el módulo (q) disminuye su resistencia límite a la flexión.

5.2.2.2.3 Hormigón Tipo B (Primera fase)

COMPARACION HORMIGON TIPO B ACERO 80/30		
Kg/m3 Fibra	Q A&A	F lim MPa
0.	0,30	3,32
0	0,35	3,98
.0	0,40	2,75
50.	0,30	4,48
50	0,35	5,05
100.	0,30	5,81
100	0,35	5,01
.100	0,40	4,77

Tabla 36 Resistencia Limite Hormigón Tipo B con fibras Acero 80/30

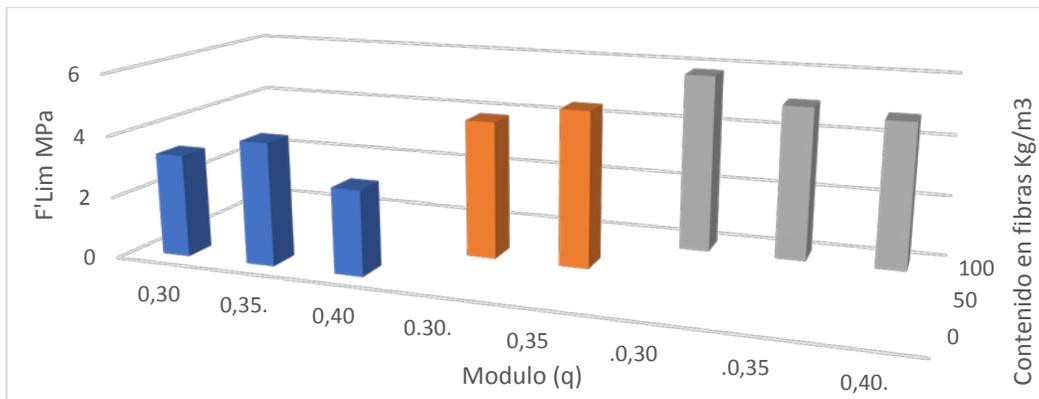


Ilustración 47 Diagrama de Barras Resistencia Limite Hormigón tipo B, con fibra Acero 80/30

En el caso del hormigón B, no es fácil detectar una tendencia o efecto que pueda tener la variación del módulo (q).

En los hormigones sin fibras y en el hormigón con 50 Kg/m³, en cambio para el hormigón con mayor contenido de fibras que es el hormigón de 100 Kg/m³ se puede observar la mejora en la resistencia limite a medida que se disminuye el módulo granulométrico.

5.2.2.2.4 Hormigón Tipo B (Segunda fase)

TM 10 50Kg ACERO 80/30	
Q A&A	F lim MPa
0,20	6,4
0,25	5,4
0,30	5,2
0,35	4,6
0,40	4,2
0,45	4,6

Tabla 37 Resistencia Límite Hormigón Tipo B Segunda Fase

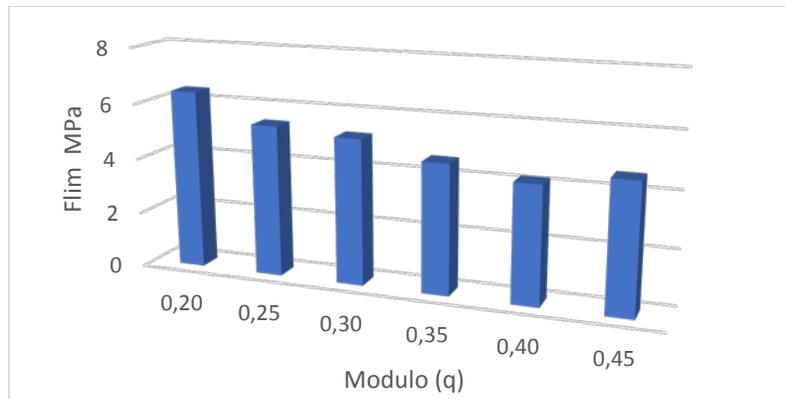


Ilustración 48 Diagrama de Barras Resistencia Limite Hormigón Tipo B, Segunda Fase

La Ilustración 48 nos muestra como el hormigón aumenta su resistencia en hasta en 2 MPa al pasar del módulo (q:0,45) al módulo (q:0,20).

5.2.2.3 Influencia de la adición de fibras en la resistencia residual a flexo tracción del hormigón.

En el siguiente numeral se analizara la resistencia post fisuración del hormigón con fibras, como se ha aclarado ya en el estado del arte la inclusión de fibras al hormigón , nos permite obtener un material dúctil , por lo que esta característica solo es comparable para los hormigones con fibras.

5.2.2.3.1 Hormigón tipo A

COMPARACION HORMIGON TIPO A DRAMIX 65			
Kg/m3 Fibra	Fr	Q A&A	fr MPa
60	Fr,1	0,25	6,38
60	Fr,2	0,25	7,31
60	Fr,3	0,25	6,86
60	Fr,4	0,25	6,66
60	Fr,2	0,30	6,52
60	Fr,1	0,30	5,36
60	Fr,3	0,30	5,94
60	Fr,4	0,30	5,19
30	Fr,1	0,25	3,30
30	Fr,2	0,25	4,28
30	Fr,3	0,25	3,49
30	Fr,4	0,25	3,30
30	Fr,1	0,30	3,62
30	Fr,2	0,30	4,75
30	Fr,3	0,30	4,92
30	Fr,4	0,30	3,98

Tabla 38 Resistencias Residuales Hormigón Tipo A con fibras Dramix 65 -5D

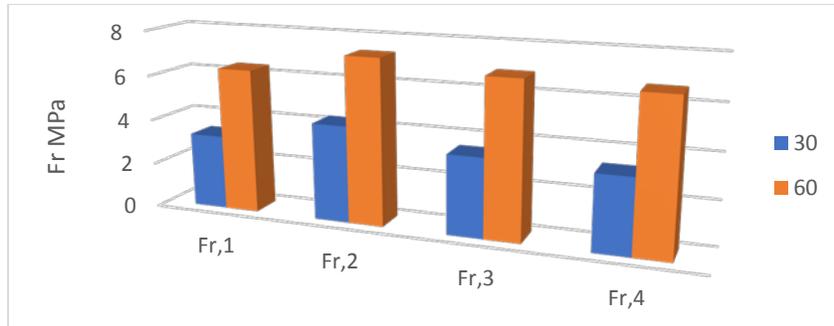


Ilustración 49 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo A Dramix 65-5D (Primera Fase) Modulo 0,25

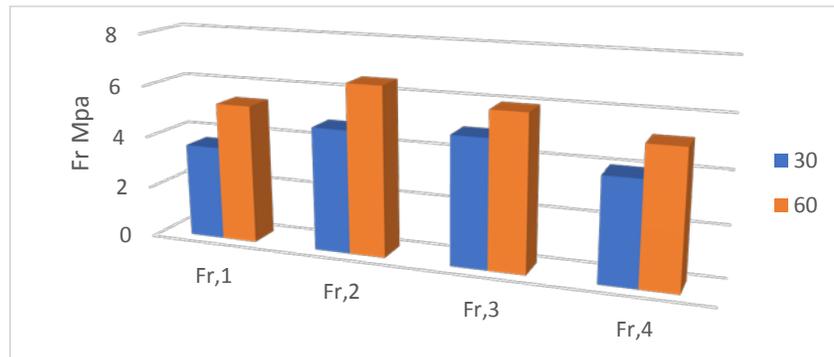


Ilustración 50 Diagrama de barras resistencias residuales Hormigón Tipo A Dramix 65 (Primera Fase) Modulo 0,30

COMPARACION HORMIGON TIPO A SIKA FIBER M38			
Kg/m3 Fibra	Fr	Q A&A	fr MPa
5	Fr,1	0,25	0,74
5	Fr,1	0,30	0,63
5	Fr,2	0,25	0,90
5	Fr,2	0,30	0,71
5	Fr,3	0,25	1,03
5	Fr,3	0,30	0,83
5	Fr,4	0,25	1,11
5	Fr,4	0,30	0,88
10	Fr,1	0,25	2,25
10	Fr,1	0,30	1,38
10	Fr,2	0,25	2,53
10	Fr,2	0,30	1,65
10	Fr,3	0,25	2,78
10	Fr,3	0,30	1,96
10	Fr,4	0,25	2,88
10	Fr,4	0,30	2,09

Tabla 39 Resistencias Residuales Hormigón Tipo A con fibras Sika Fiber M38

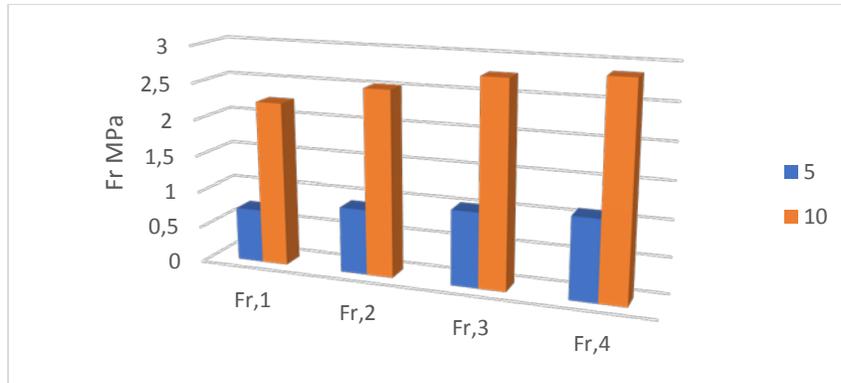


Ilustración 51 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo A Sika Fiber M38 (Primera Fase) Modulo 0,25

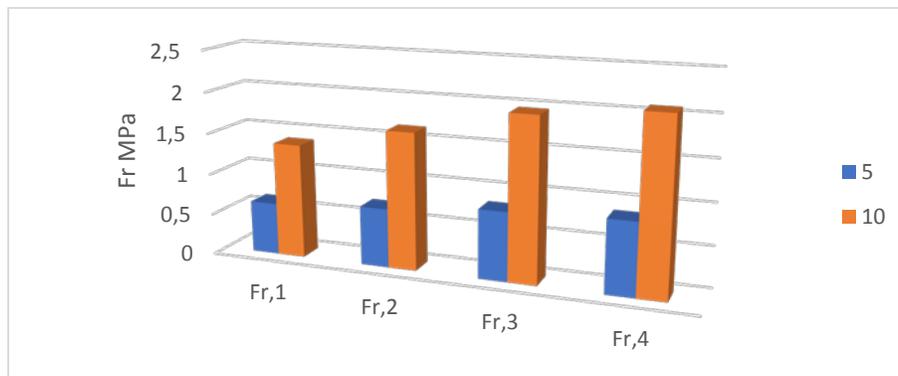


Ilustración 52 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo A Sika Fiber M38 (Primera Fase) Modulo 0,30

Como método de control hemos verificado que los hormigones cumplan las tendencias ya pautadas en la ingeniería del hormigón con fibras, como se observa en la Ilustración 51 y Ilustración 52 este comportamiento las resistencias residuales aumentan con la inclusión de fibras.

5.2.2.3.2 Hormigón tipo B

COMPARACION HORMIGON TIPO B ACERO 80/30			
Kg/m3 Fibra	Fr	Q A&A	fr MPa
50	Fr,1	0,30	7,11
50	Fr,2	0,30	9,13
50	Fr,3	0,30	8,43
50	Fr,4	0,30	7,57
50	Fr,1	0,35	6,37
50	Fr,2	0,35	7,07
50	Fr,3	0,35	6,82
50	Fr,4	0,35	6,23
100	Fr,1	0,30	12,69
100	Fr,2	0,30	11,98
100	Fr,3	0,30	10,93
100	Fr,4	0,30	9,50
100	Fr,1	0,35	10,38
100	Fr,2	0,35	10,61
100	Fr,3	0,35	9,34
100	Fr,4	0,35	8,25
100	Fr,1	0,40	9,89
100	Fr,2	0,40	10,09

Tabla 40 Resistencias Residuales Hormigón Tipo B con fibras Acero 80/30

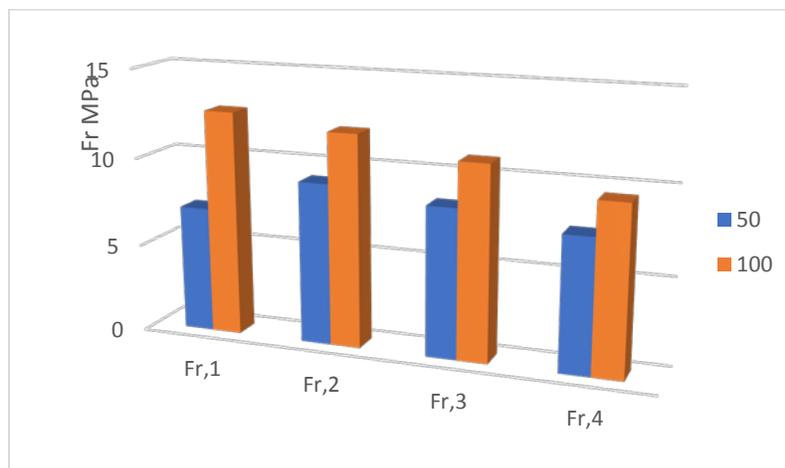


Ilustración 53 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo B Acero 80/30 (Primera Fase) Modulo 0,30

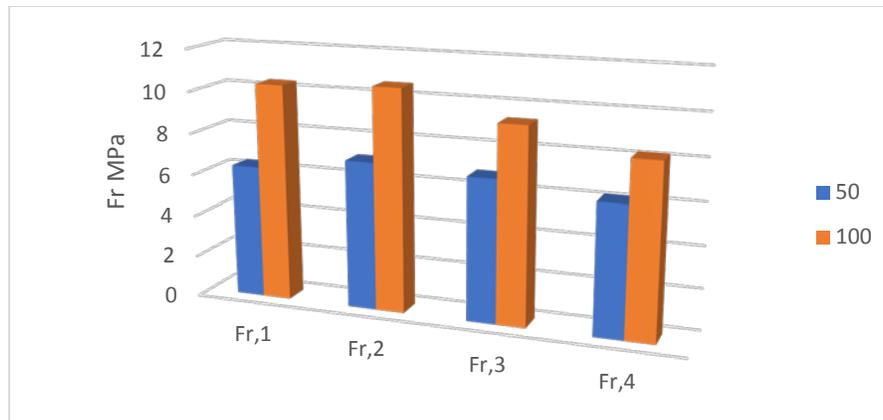


Ilustración 54 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo B Acero 80/30 (Primera Fase) Modulo 0,35

Al igual que la Ilustración 51 y la Ilustración 52 estas presentan el mismo comportamiento al aumentar la dosificación en fibras, con una diferencia en su comportamiento respecto a los hormigones con fibras poliméricas, esta es que la resistencia en hormigones con fibras metálicas va en disminución a medida que se aumenta la abertura de fisura, contrario a lo que sucede en el hormigón con fibras poliméricas que aumentan su resistencia residual a medida que se abre la fisura.

5.2.2.4 Influencia de la variación del módulo de distribución (q) de fibras en la resistencia residual a flexo tracción del Hormigón.

5.2.2.4.1 Hormigón Tipo A (Primera fase)

COMPARACION HORMIGON TIPO A DRAMIX 65			
Kg/m3 Fibra	Fr	Q A&A	Fr MPa
60	Fr,1	0,25	6,38
60	Fr,2	0,25	7,31
60	Fr,3	0,25	6,86
60	Fr,4	0,25	6,66
60	Fr,2	0,30	6,52
60	Fr,1	0,30	5,36
60	Fr,3	0,30	5,94
60	Fr,4	0,30	5,19
30	Fr,1	0,25	3,30
30	Fr,2	0,25	4,28
30	Fr,3	0,25	3,49
30	Fr,4	0,25	3,30
30	Fr,1	0,30	3,62
30	Fr,2	0,30	4,75
30	Fr,3	0,30	4,92
30	Fr,4	0,30	3,98

Tabla 41 Resistencias Residuales Hormigón Tipo A con fibras Dramix 65 -5D

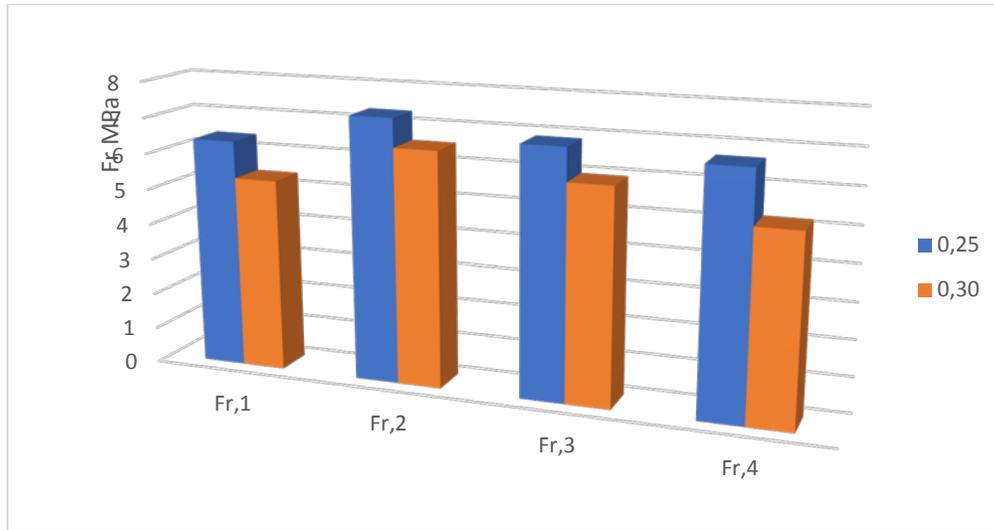


Ilustración 55 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo A Dramix 65-5D (Primera Fase) 60 Kg/m³

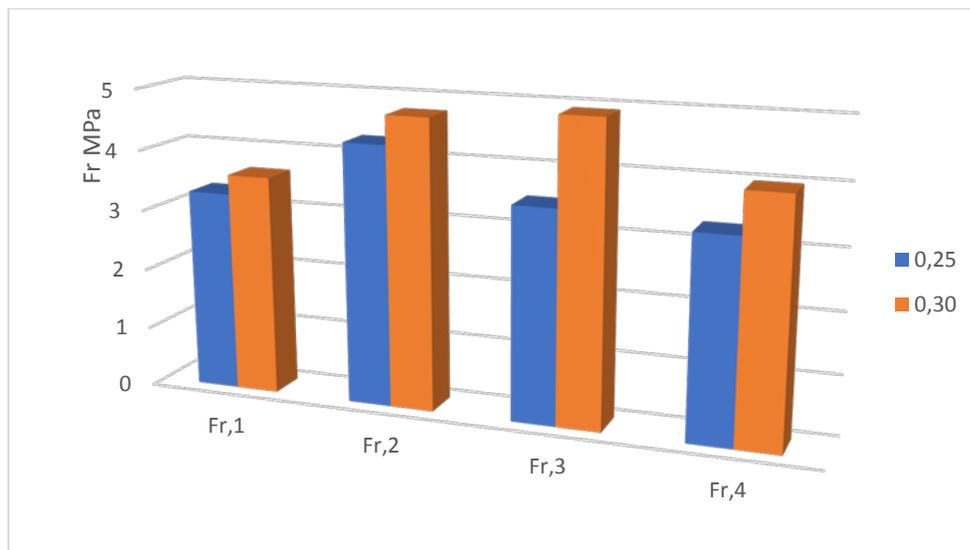


Ilustración 56 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo A Dramix 65-5D (Primera Fase) 30 Kg/m³

La Ilustración 55 e Ilustración 56 discrepan entre ellas, es decir la Ilustración 55 indica que al aumentar el valor del módulo de distribución (q), las resistencias residuales aumentan, sin embargo la Ilustración 56 indica lo contrario en sus resultados, esto es que las resistencias residuales aumentan a medida que el valor del módulo (q) disminuye, lo que sea una dispersión puede ser una posibilidad sin embargo el análisis de la segunda fase puede darnos una mejor idea del análisis ya que hemos ampliado el espectro y no solo tenemos dos puntos como en la primera fase analizada.

COMPARACION HORMIGON TIPO A SIKA FIBER M38			
Kg/m3 Fibra	Fr	Q A&A	Fr MPa
5	Fr,1	0,25	0,74
5	Fr,1	0,30	0,63
5	Fr,2	0,25	0,90
5	Fr,2	0,30	0,71
5	Fr,3	0,25	1,03
5	Fr,3	0,30	0,83
5	Fr,4	0,25	1,11
5	Fr,4	0,30	0,88
10	Fr,1	0,25	2,25
10	Fr,1	0,30	1,38
10	Fr,2	0,25	2,53
10	Fr,2	0,30	1,65
10	Fr,3	0,25	2,78
10	Fr,3	0,30	1,96
10	Fr,4	0,25	2,88
10	Fr,4	0,30	2,09

Tabla 42 Resistencias Residuales Hormigón Tipo A con fibras Sika fiber M38

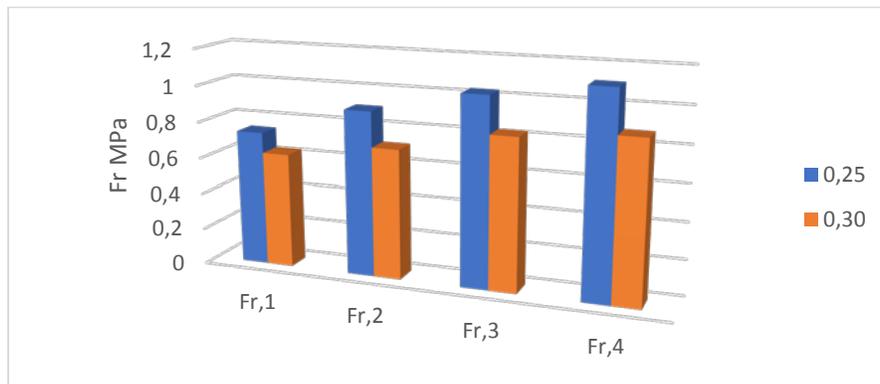


Ilustración 57 Diagrama de Barras Resistencias residuales Tipo A con fibras Sika fiber M38 5 Kg/m3

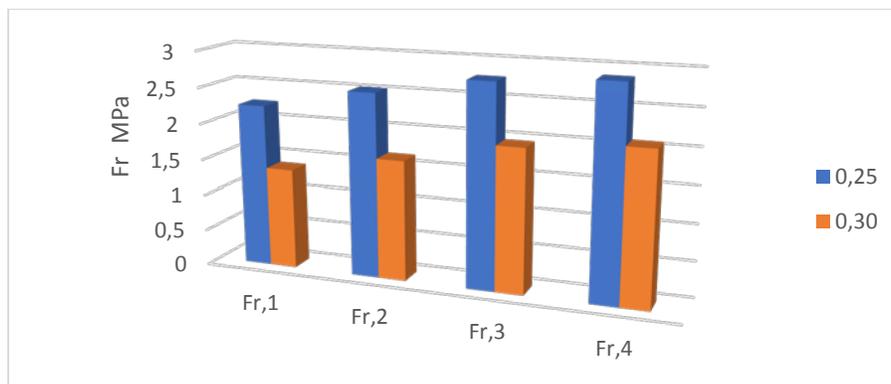


Ilustración 58 Diagrama de Barras Resistencias residuales Sika fiber M38 10 Kg/m

En este caso las dos dosificaciones con fibras poliméricas han coincidido con la tendencia antes mencionada y esta es que el aumentar el contenido de finos en el hormigón aumenta la resistencia residual.

5.2.2.4.2 Hormigón Tipo A (Segunda fase)

TM 20 10Kg SIKA FIBER M38				
Q A&A	Fr -0.5mm MPa	Fr -1.5mm MPa	Fr -2.5mm MPa	Fr -3.5mm MPa
0,20	2,2	3,2	3,7	3,8
0,25	1,7	2,5	3,0	3,4
0,30	1,6	2,1	2,4	2,6
0,35	1,8	2,5	2,9	3,2
0,40	2,1	2,8	3,1	3,2
0,45	1,3	1,6	1,8	1,6

Tabla 43 Resistencias Residuales Hormigón Tipo A Segunda Fase

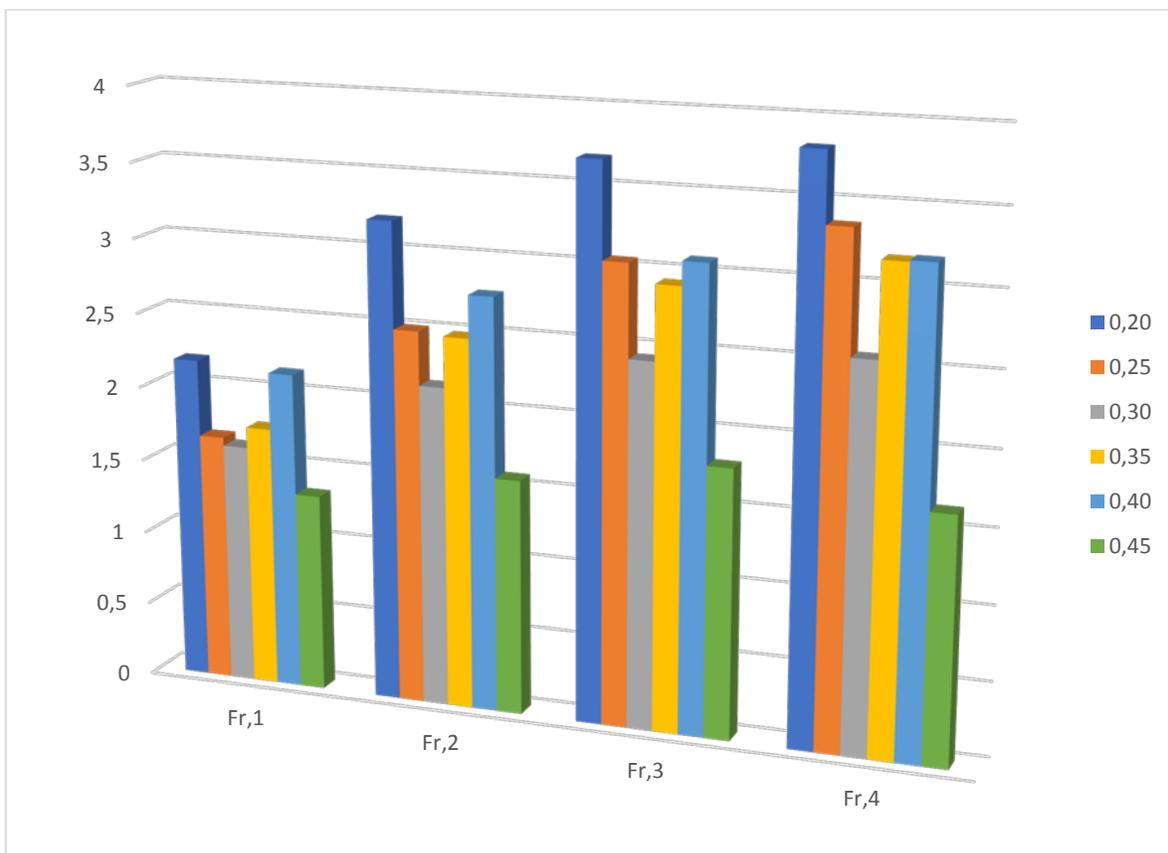


Ilustración 59 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo A Segunda Fase

En la Ilustración 59 se repite la tendencia observada en la Ilustración 57 e Ilustración 58, dado que para cada una de las resistencias residuales en el hormigón el resultado más alto se presenta en el hormigón dosificado con el menor valor de módulo de distribución (q), aunque no sea una relación presente en cada disminución del módulo, como cuando la mezcla pasa del módulo ($q:0,30$) al ($q:0,45$) en este caso la dispersión puede darse en la dosificación correspondiente al módulo ($q:0,45$). Dado que los demás datos presentan la tendencia de disminuir a mediada que el módulo (q) disminuye. Clara.

Es importante anotar que la resistencia más baja correspondió en todos los ensayos mecánicos anteriormente descritos al hormigón que presentó problemas de fabricación

5.2.2.4.3 Hormigón Tipo B (Primera fase)

COMPARACION HORMIGON TIPO B ACERO 80/30			
Kg/m3 Fibra	Fr	Q A&A	Fr MPa
50	Fr,1	0,30	7,11
50	Fr,2	0,30	9,13
50	Fr,3	0,30	8,43
50	Fr,4	0,30	7,57
50	Fr,1	0,35	6,37
50	Fr,2	0,35	7,07
50	Fr,3	0,35	6,82
50	Fr,4	0,35	6,23
100	Fr,1	0,30	12,69
100	Fr,2	0,30	11,98
100	Fr,3	0,30	10,93
100	Fr,4	0,30	9,50
100	Fr,1	0,35	10,38
100	Fr,2	0,35	10,61
100	Fr,3	0,35	9,34
100	Fr,4	0,35	8,25
100	Fr,1	0,40	9,89
100	Fr,2	0,40	10,09

Tabla 44 Resistencias Residuales Hormigón Tipo B con fibras Acero 80/30

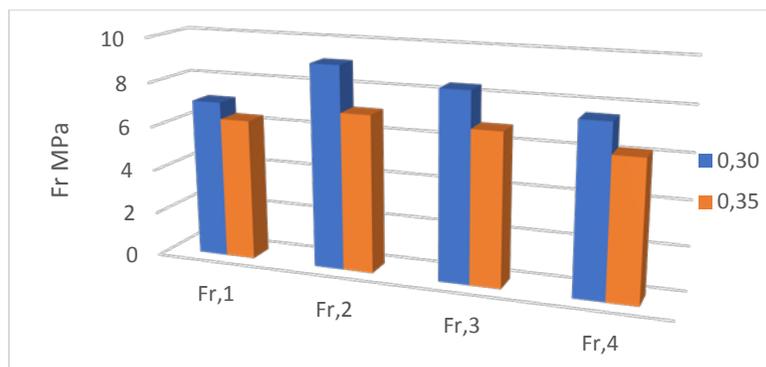


Ilustración 60 Diagrama de Barras Resistencias residuales Tipo B con fibras Acero 80/30 50Kg/m3

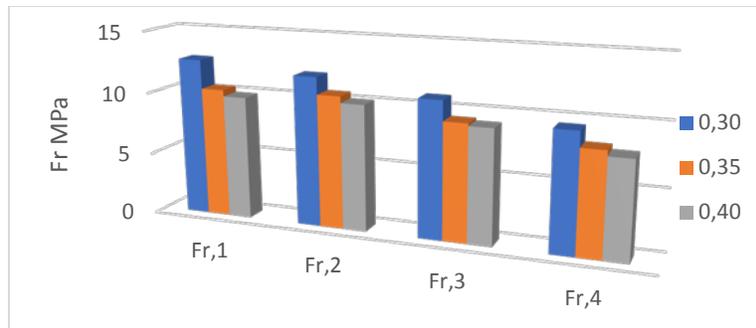


Ilustración 61 Diagrama de Barras Resistencias residuales Tipo B con fibras Acero 80/30 100Kg/m3

5.2.2.4.4 Hormigón Tipo B (Segunda fase)

TM 10 50Kg ACERO 80/30				
Q A&A	Fr -0.5mm MPa	Fr -1.5mm MPa	Fr -2.5mm MPa	Fr -3.5mm MPa
0,20	10,8	10,3	9,6	8,5
0,25	9,1	11,2	9,1	8,3
0,30	5,2	8,3	8,5	7,6
0,35	4,9	7,2	6,6	5,9
0,40	4,0	6,0	6,2	5,5
0,45	5,2	7,3	6,9	5,6

Tabla 45 Resistencias Residuales Hormigón Tipo B Segunda Fase

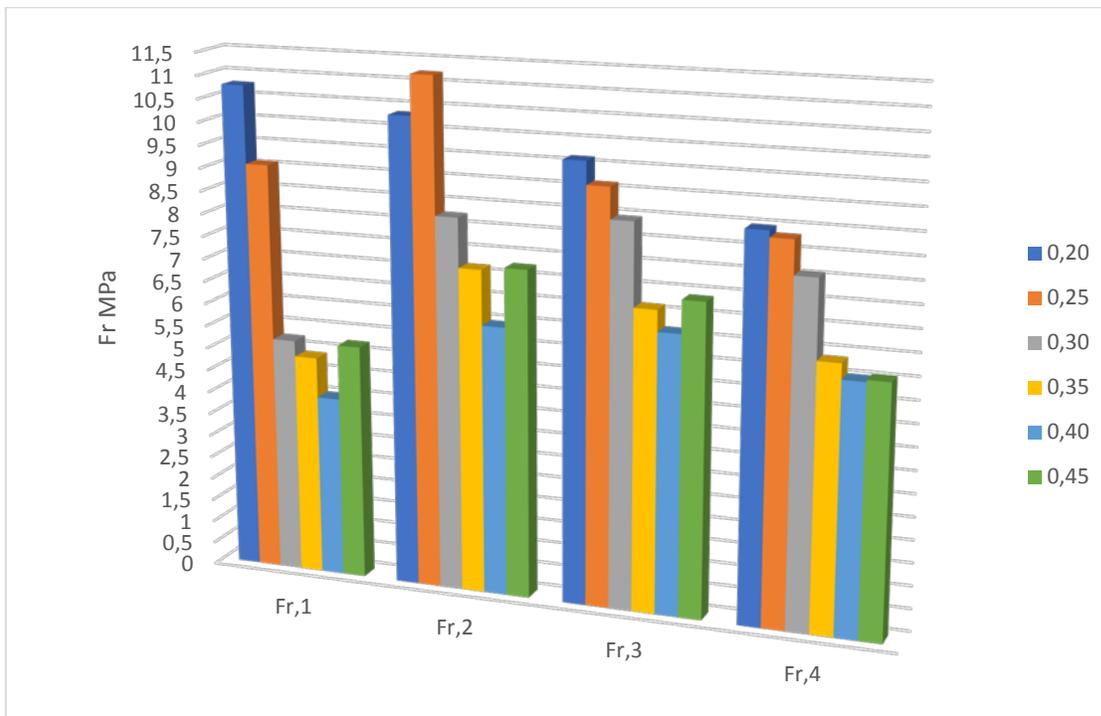


Ilustración 62 Diagrama de Barras Resistencias residuales Hormigón Tipo B Segunda Fase

La tendencia para el hormigón con fibras metálicas es mucho más clara y se observa desde la primera etapa en la Ilustración 60 e Ilustración 61 , en este caso es clara la influencia de la variación del módulo granulométrico en los hormigones con fibras de acero , y esta es que con solo variar el modelo de distribución estamos aumentando hasta en un 40 % las resistencias residuales del hormigón.

La impresión final que tenemos después del análisis de resultados que se acaba de realizar, es que el acomodamiento y proporción de tamaños de los áridos en el hormigón, puede modificar significativamente las características mecánicas del hormigón ,elegir un módulo y otro como lo hemos visto puede mejorar la resistencia a compresión y a flexo tracción, hasta en 40%, sin aumentar el contenido de cemento, sin embargo también es cierto que los módulos (q), con mejores resultados exigieron un aumento de aditivo en su dosificación, en este punto es importante analizar la relación costo beneficio, dado que un aumento de resistencia residual hasta de 6 MPa, solo exige el aumento en aumento de aditivo en la mezcla.

6 CONCLUSIONES

En este capítulo mostraremos de forma esquemática y enumerada una a una las conclusiones que hemos obtenido después de llevar a cabo el plan de ensayos propuesto y el análisis de sus resultados, estas conclusiones se han escrito no solo a partir de la observación única de los resultados sino que además a esto se ha sumado nuestra experiencia en la fabricación y nuestro estudio de las investigaciones anteriores y actuales, las conclusiones se presentaran en el orden que se han realizado los ensayos.

- La primera conclusión que además será introductoria para las siguientes es que al analizar los resultados de la campaña en la primera etapa se encontró que los hormigones propuestos con diferentes tipos y cuantías de fibras tenían la misma tendencia en cuanto a la influencia de la variación en las curvas de andreansen y Andersen en sus características reológicas y mecánicas.

6.1 Hormigón en estado fresco

- La demanda de agua en los hormigones a los que se les incorpora fibra aumento respecto a aquellos que no la contenían, a medida que se aumentaba la dosificación en la cantidad de fibras el hormigón demandaba más agua y por lo tanto implicaba un aumento en el porcentaje de aditivo respecto a los hormigones sin fibras.
- La demanda de agua en los hormigones con los modelos de curva granulométricas de Andreansen y Andersen aumentaban a medida que se disminuía el módulo de distribución (q), es decir los hormigones con mayor contenido de finos deberán ser fabricados con mayores contenidos de aditivo.
- La demanda de agua en el hormigón tipo A con modelos de curvas granulométricas de Andreansen y Andersen disminuía a medida que la curva se hacía más gruesa sin embargo del módulo (q:035), el hormigón segregaba con un porcentaje alto de aditivo y se hacía muy seco y difícil de trabajar cuando se disminuía el aditivo modificado, por lo que se concluye que los hormigones con TM 10 mm dosificados con fibras de polipropileno presentan una inviabilidad de fabricación con módulos (q) de distribución mayores a 0,40.

6.2 Hormigón en estado endurecido

- La resistencia especificada se cumplió para todas las curvas analizadas en el hormigón B, por el contrario, en el hormigón A la resistencia especificada no cumplió para el hormigón con q de 0,45 esto coincidiendo con la dificultada en la fabricación de esta mezcla, de el hecho se concluye que los hormigones que son difíciles de trabajar y que impiden su correcta vibración y compactación no obtendrán las características mecánicas deseadas.
- Se encontró la tendencia en los dos hormigones que la resistencia a compresión aumentaba a medida que la curva era más fina, en el hormigón A aumento en un 38% de 0,45 a 0,20 esto traduce en ganar 13 MPa en un hormigón de 25 MPa, el hormigón tipo B ha aumentado su resistencia en un 45% de 0,45 a 0,20 esto traduce en ganar 21 MPa en un hormigón de 45 MPa
- La resistencia a flexión del hormigón A, presento una mayor dispersión respecto a las obtenidas para el hormigón B sin embargo la tendencia general al observar los resultados es que al reducir el módulo (q) en el modelo la resistencia mejora dado que los mayores picos se encuentran en las curvas finas y las menores resistencias en las curvas más gruesas.
- La resistencia limite a flexión en el hormigón B, al igual que la resistencia a la compresión se vio mejorada al reducir el módulo (q) en el modelo , esto se repitió también para la resistencia Fr_1, Fr_3 y Fr_4 donde el hormigón con la curva más fina fue el que presento una mayor resistencia y el hormigón con la curva más gruesa presento la menor , en la resistencia residual Fr_2 , la de mayor resistencia no correspondió a la curva más fina sin embargo la tendencia sigue siendo igual ya que fue con el modelo $q:0,25$ que se presentó la mayor resistencia con solo una diferencia de 1 MPa en la curva más fina.

6.3 Conclusión general

- La inclusión de un estudio que optimice el acomodamiento de los áridos en el hormigón al momento de realizar la dosificación de hormigones con fibras mejora las propiedades mecánicas considerablemente.

7 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

Se proponen nuevas líneas de investigación en los epígrafes siguientes:

- Como se ha leído en las conclusiones las resistencias no decayeron al disminuir el módulo (q) de Andreansen y Andersen, lo que quiere decir que en futuras investigaciones se podría disminuir el exponente hasta un valor mucho menor al que hemos planteado hasta un mínimo trabajable, o un pico que nos dé un módulo (q) óptimo.
- En los estudios futuros también se podrían incluir diferentes tipos de fibras debido a que en este trabajo solo hemos incluido fibras de polipropileno y metálicas, por lo que, en futuras líneas de investigación, podrían incluirse fibras de otros materiales.
- En las conclusiones también se ha notado que todas las características en general se han visto mejoradas, en futuras líneas de investigación también se podrían incluir analizar otras propiedades, y se podrían medir diferentes parámetros tales como la porosidad, la tenacidad, el módulo elástico u otras características que sería interesante analizar.
- En este trabajo hemos analizado hormigones convencionales con características típicas de un hormigón de obra y de prefabricación, sin embargo, este mismo estudio también se puede realizar para otros tipos de hormigones como hormigones autocompactantes o hormigones de altas prestaciones.

8 BIBLIOGRAFIA

1. EHE- 08 - Instrucción de Hormigón Estructural, Ministerio de Fomento de España, 2010.
2. Muazzam Ghous Sohail -"Advancements In Concrete Mix Designs:High-Performance And Ultrahigh-Performance Concretes 1970 To 2016"
Journal of materials in civil engineering volume 30 issue 3 – marzo 2018.
3. Mohamed N Rahaman - "Ceramic Processing And Sinterign"
CRC PRESS 1995.
4. D.J Hannant -"fibre cements and fibre concretes"
John Wiley & Sons, Ltd., 1978.
5. Stephen O Ekolu, Morgan Dundu Y Xiaojian "Construction Materials And Structures"
IOS PRESS 2014.
6. Karel D Vořák "Influence Of Different Grinding Types On Granulometry Of Recycled Glass"
Advanced Materials Research (Volume 897) 2014
7. Per Goltermann, Vagn Johansen "Packing Of Ggregates: An Alternative Too The Optimal Aggregate Mix"
Aci Materials Journal Title No 94 M51 2015.
8. D.M. Roy ,B.E. "Scheetz Concrete Components Packing Handbook"
National Research Council Washington, Dc 1993.
9. The Nordic Concrete Federation "Nordic Concrete Research"
Vodskov, July 2014.
10. Towards T "Optimized Concrete Matrix Andefficient Fibre Application".
Journal Of Cleaner Production 2016.
11. Bernard Martineau "Formulation Of A General Gradation Curve And It Transformation To Equivalent Sigmoid Form To Represent Grain Size Distribution"
Published Online: 29 Dec 2015 <http://Dx.Doi.Org/10.1080/14680629.2015.1124048>.

12. Yahya Ghasemi "Aggregates In Concrete Mix Design"
Licentiate Thesis Luleå 2017.
13. Mohammed Seddik Meddah "Effect Of Content And Particle Size Distribution Of Coarse Aggregate On The Compressive Strength Of Concrete"
Construction And Building Materials 24 505–512 2010.
14. L. De Castro, V. C. Pandolfelli "Conceitos De Dispersão E Empacotamento De Partículas Para A Produção De Hormigons Especiais Aplicados Na Construção Civil"
Cerâmica 55 18-32 2009.
15. Pedro Serna Ros "Método Para La Formulación De Hormigones De Fibras Metálicas"
Departamento De Materiales De Construcción E.T.S.I.C.C.P. Universidad Politécnica. Valencia 684-1994.
16. J. E. Funk Et Al., "Predictive Process Control Of Crowded Particulate Suspensions Chapter 6 Derivation Of The Dinger-Funk Particle Size Distribution Equation"
Kluwer Academic Publishers 1994
17. Norma Venezolana Hormigon. Evaluación Y Métodos De Ensayo
Covenin 1976:2003
18. A. Castro *, F. Ferreira "Efecto De Empaquetamiento De Las Partículas En La Durabilidad De Los Hormigones De Alto Desempeño"
Revista Ingeniería De Construcción Ric Vol 31 N°2 2016.
19. B. Parmentier & E. De Grove "Dispersion Of The Mechanical Properties Of Frc Investigated By Different Bending Tests"
Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst (Eds) 2008.
20. Paulo H. R. Borges¹; "Andreansen Particle Packing Method On The Development Of Geopolymer Concrete For Civil Engineering"
Journal Of Materials In Civil Engineering Asce / April 2014