

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO REFORZADAS CON LÁMINAS DE
FIBRAS DE CARBONO (CFRP)”**

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADO POR EL BACHILLER:

AQUINO CUSQUISIBÁN, Santos Edwin

ASESOR:

Dr. Ing. Miguel Ángel Mosqueira Moreno

CAJAMARCA – PERÚ

2019

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por darme la vida y permitirme llegar a este momento especial que es la culminación del presente trabajo de investigación.

A mis padres y hermanos por haberme apoyado permanente en los momentos que más lo he necesitado.

Expreso mi más sincero agradecimiento y reconocimiento a la Universidad Nacional de Cajamarca, a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil por haberme aceptado ser parte de ella y abierto las puertas de su claustro para poder estudiar mi carrera.

Agradezco de manera muy especial a mi asesor el Dr. Ing. Miguel Mosqueira Moreno, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento, así como también por haberme tenido toda la paciencia del mundo para guiarme durante todo el desarrollo de mi trabajo de investigación.

Finalmente, expreso mi más cordial agradecimiento a mis familiares, amigos, compañeros y personas que de una u otra manera contribuyeron hacer realidad el presente trabajo de investigación.

DEDICATORIA

Este trabajo quiero dedicárselo en primer lugar a Dios por dar sentido a mi vida, orientarme por el buen camino y darme la fortaleza para alcanzar mis sueños.

A mis padres: Manuel y María, por su amor, apoyo y sacrificios en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy, una persona con sueños y objetivos en la vida.

A mis hermanos: Roberto, Marleny y Segundo; por el aliento y apoyo incondicional para lograr el presente trabajo.

A mi abuelita Brígida, por sus sabios consejos para afrontar el camino de la vida y superarse cada día.

A mis amigos, quienes sin esperar nada a cambio compartieron sus conocimientos, alegrías y tristezas, que se convirtieron en un gran lazo de amistad.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. HIPÓTESIS.....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.5. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.6. OBJETIVOS.....	4
1.6.1. Objetivo General.....	4
1.6.2. Objetivos Específicos.....	4
1.7. DESCRIPCIÓN DE LOS CONTENIDOS DE LOS CAPÍTULOS.....	4

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	6
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES.....	7
2.2. BASES TEÓRICAS.....	8
2.2.1. CONCRETO ARMADO.....	8
2.2.2. VIGA.....	9
2.2.3. FLEXIÓN.....	9
2.2.4. CORTANTE.....	17
2.2.5. REQUISITOS DE RESISTENCIA Y SERVICIO:.....	20
2.2.6. RAJADURAS DE FLEXIÓN EN VIGAS DE CONCRETO ARMADO:.....	20
2.2.7. PREDIMENSIONAMIENTO DE VIGAS:.....	21
2.2.8. FIBRA DE CARBONO.....	23
2.2.9. REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO	23

2.2.10.	SISTEMA DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL CFRP (CARBON FIBER REINFORCED POLYMER)	23
2.2.11.	REFORZAMIENTO DE ELEMENTOS SOMETIDOS A FLEXIÓN .	24
2.2.12.	TIPOS DE FALLAS DEL REFORZAMIENTO CON CFRP:.....	25
2.2.13.	APLICACIÓN DE FIBRA DE CARBONO EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO	27
2.2.14.	APLICACIÓN DE LA NORMATIVA ACI 440.2R-17 EN UNA SECCIÓN RECTANGULAR REFORZADA A FLEXIÓN.....	35
2.2.15.	EFFECTO DE LA FIBRA DE CARBONO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO.....	42
2.2.16.	DESPRENDIMIENTO PREMATURO DE LA LÁMINAS DE FIBRAS DE CARBONO	44
2.2.17.	ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A FLEXIÓN: ..	45
2.2.18.	EFFECTO DE ESCALA	46
2.3.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	47

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	UBICACIÓN:	51
3.1.1.	UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN:.....	51
3.1.2.	ÉPOCA DE LA INVESTIGACIÓN:	51
3.2.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN:.....	51
3.2.1.	TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN:.....	51
3.2.2.	POBLACIÓN DE ESTUDIO:	52
3.2.3.	MUESTRA:.....	52
3.2.4.	UNIDAD DE ANÁLISIS:	52
3.2.5.	UNIDAD DE OBSERVACIÓN:	52
3.2.6.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS: ..	52
3.2.7.	EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	53
3.3.	PROCEDIMIENTO:.....	53
3.3.1.	CANTERA DE ESTUDIO:	54
3.3.2.	AGREGADO FINO:.....	55
3.3.3.	AGREGADO GRUESO:.....	55
3.3.4.	CEMENTO PORTLAND TIPO I:	55
3.3.5.	PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LOS AGREGADOS:.....	55
3.3.6.	DISEÑO DE MEZCLAS:.....	56
3.3.7.	DISEÑO DE VIGAS:.....	57

3.3.8.	ENCOFRADO DE VIGAS:	57
3.3.9.	HABILITACIÓN DE ACERO:.....	58
3.3.10.	LLENADO DE VIGAS:	58
3.3.11.	CURADO:	58
3.3.12.	DESENCOFRADO DE LAS VIGAS:.....	58
3.3.13.	APLICACIÓN DE SIKA CARBODUR S512:	58
3.3.14.	ENSAYO A FLEXIÓN:	59
3.4.	TRATAMIENTO, ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS:	59
3.4.1.	TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS:.....	59
3.4.2.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS:.....	59
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		
4.1.	DESCRIPCIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS:.....	89
4.2.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS CONTRASTADOS CON ANTECEDENTES TEÓRICOS:.....	93
4.3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS CONTRASTADOS CON BASES TEÓRICAS:	94
4.4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS CONTRASTADOS CON LA HIPÓTESIS: 94	
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
5.1.	CONCLUSIONES:	96
5.2.	RECOMENDACIONES:	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:		98
APÉNDICE		
APÉNDICE I: FICHA DE OBSERVACIONES:		102
ANEXOS		
ANEXO I: ILUSTRACIONES DEL DESARROLLO DE LA TESIS:.....		104
ANEXO II: PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS:.....		117
ANEXO III: TABLAS PARA EL DISEÑO MEZCLA.....		125
ANEXO IV: DISEÑO DE LA VIGA MODELO		126
ANEXO V: CONSTANCIA DE USO DEL LABORATORIO:		152
ANEXO VI: HOJAS TÉCNICAS:		152

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1. Cuantía básica para concretos de diferentes calidades. (Adaptado de Harmsen T. 2002)</i>	16
<i>Tabla 2.2. Peralte mínimo en vigas.</i>	21
<i>Tabla 2.3. Factores de reducción ambiental para diferentes sistemas de FRP y condiciones de exposición. (Adaptado de ACI.2R.17)</i>	30
<i>Tabla 2.4. Momento sostenido más esfuerzos límites de cargas cíclicas de servicio. (Adaptado de ACI.2R.17)</i>	35
<i>Tabla 3.1 Detalle de Muestras</i>	52
<i>Tabla 3.2. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 01.</i>	60
<i>Tabla 3.3. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 02.</i>	61
<i>Tabla 3.4. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 03.</i>	62
<i>Tabla 3.5. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 04.</i>	63
<i>Tabla 3.6. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 05.</i>	64
<i>Tabla 3.7. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 06.</i>	65
<i>Tabla 3.8. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 07.</i>	66
<i>Tabla 3.9. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 08.</i>	67
<i>Tabla 3.10. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 09.</i>	68
<i>Tabla 3.11. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 10.</i>	69
<i>Tabla 3.12. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 11</i>	70
<i>Tabla 3.13. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 12</i>	71
<i>Tabla 3.14. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 13.</i>	72
<i>Tabla 3.15. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 14.</i>	73
<i>Tabla 3.16. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 15.</i>	74
<i>Tabla 3.17. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 16.</i>	75
<i>Tabla 3.18. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 17</i>	76
<i>Tabla 3.19. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 18</i>	77
<i>Tabla 3.20. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 19.</i>	78
<i>Tabla 3.21. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 20.</i>	79
<i>Tabla 3.22. Resumen de cargas máxima de vigas</i>	82
<i>Tabla 3.23. Deflexión máxima y ancho de fisura de las vigas</i>	86
<i>Tabla 7.1. Ensayo de Contenido de Humedad para el Agregado Fino.</i>	117
<i>Tabla 7.2. Ensayo del Análisis Granulométrico del Agregado Fino - Ensayo N°01</i>	117

<i>Tabla 7.3. Ensayo del Análisis Granulométrico del Agregado Fino - Ensayo N°02</i>	117
<i>Tabla 7.4. Ensayo del Análisis Granulométrico del Agregado Fino - Ensayo N°03</i>	118
<i>Tabla 7.5. Peso Específico del Agua.</i>	119
<i>Tabla 7.6. Factor "F" del recipiente Agregado Fino</i>	119
<i>Tabla 7.7. Ensayo de Peso Unitario Seco Suelto del Agregado Fino.</i>	119
<i>Tabla 7.8. Ensayo de Peso Unitario Seco Compactado del Agregado Fino.</i>	119
<i>Tabla 7.9. Ensayo de Peso Específico y Absorción del Agregado Fino.</i>	120
<i>Tabla 7.10. Ensayo de Partículas < 200 para el Agregado Fino.</i>	120
<i>Tabla 7.11. Resumen de Propiedades del Agregado Fino.</i>	120
<i>Tabla 7.12. Ensayo de Contenido de Humedad para el Agregado Grueso.</i>	121
<i>Tabla 7.13. Ensayo del Análisis Granulométrico del Agregado Grueso - Ensayo N°01</i>	121
<i>Tabla 7.14. Ensayo del Análisis Granulométrico del Agregado Grueso - Ensayo N°02</i>	121
<i>Tabla 7.15. Ensayo del Análisis Granulométrico del Agregado Grueso - Ensayo N°03</i>	122
<i>Tabla 7.16. Peso Específico del Agua.</i>	123
<i>Tabla 7.17. Factor "F" del recipiente Agregado Grueso.</i>	123
<i>Tabla 7.18. Ensayo de Peso Unitario Seco Suelto del Agregado Grueso.</i>	123
<i>Tabla 7.19. Ensayo de Peso Unitario Seco Compactado del Agregado Grueso.</i>	123
<i>Tabla 7.20. Ensayo de Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso.</i>	124
<i>Tabla 7.21. Ensayo de Partículas < 200 para el Agregado Grueso.</i>	124
<i>Tabla 7.22. Resumen de Propiedades del Agregado Grueso</i>	124
<i>Tabla 7.23. Resistencia Promedio o Resistencia Media Requerida.</i>	125
<i>Tabla 7.24. Consistencia y asentamiento del concreto.</i>	125
<i>Tabla 7.25. Volumen unitario de agua y contenido de aire atrapado.</i>	125
<i>Tabla 7.26. Relación agua/cemento por resistencia.</i>	125
<i>Tabla 7.27. Módulo de finura de la combinación de agregados.</i>	126
<i>Tabla 7.28. Resultados de los ensayos a compresión – diseño de mezcla.</i>	133
<i>Tabla 7.29. Resultados de los ensayos a compresión - Vigas</i>	135

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Viga simplemente apoyada sometida a una carga concentrada. (Adaptado de Harmsen T. 2002)</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.2. Diagrama momento resistente-curvatura de una sección de la viga sometida a carga uniformemente distribuido. (Adaptado de Harmsen T. 2002).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.3. Distribución de esfuerzos en el concreto en compresión de la viga. (Adaptado de Harmsen T. 2002)</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.4. Distribución de deformaciones para los diversos tipos de fallas en flexión. (Adaptado de Harmsen T. 2002)</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.5. Diagrama momento-curvatura para los diversos tipos de fallas en flexión. (Adaptado de Harmsen T. 2002)</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.6. Esfuerzos de una sección rectangular con esfuerzo en tensión sometida a flexión. (Adaptado de Harmsen T. 2002).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.7. Esfuerzos de una sección rectangular con falla balanceada. (Adaptado de Harmsen T. 2002).....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.8. Diagrama de fuerzas cortantes a una distancia "d". (Adaptado de Harmsen T. 2002).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.9. Rajadura de flexión en vigas de concreto armado. (Adaptado de Harmsen T. 2002).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.10. Vista en planta de la viga analizada. (Adaptado de Morales R. 2012).</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.11. Esquema de refuerzo a flexión con CFRP en vigas de concreto armado. (Adaptado de Rosero L. 2013).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.12. Posibles tipos de fallas de un elemento reforzado con CFRP. (Adaptado de Beltrán A. 2011).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.13. Pérdida de adherencia y delaminación. (Adaptado de ACI.2R.17)</i>	<i>31</i>
<i>Figura 2.14. Distribución de esfuerzos y para la sección rectangular. (Adaptado de ACI.2R.17)</i>	<i>36</i>
<i>Figura 2.15. Esfuerzos y deformaciones de la sección con CFRP. (Adaptado de ACI.2R.17).....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 2.16. Longitud de anclaje. (Adaptado de ACI.2R.17)</i>	<i>42</i>
<i>Figura 2.17. Detalle de apoyo en los elementos reforzados con Fibra de carbono (Adaptado de González, O.; et al., 2002)</i>	<i>43</i>
<i>Figura 2.18. Desprendimiento prematuro del laminado CFRP (Adaptado de Oller, E., Marí, A., Bellido, L. 2013)</i>	<i>44</i>

<i>Figura 2.19. Dispositivo adecuado para la prueba de flexión. (Adaptado de NTP 339.079)</i>	46
<i>Figura 2.20. Resistencia a la flexión relativa en función de la profundidad del miembro (Adaptado de Eligehausen, R.; Ozbolt, J. 1995)</i>	47
<i>Figura 3.1. Ubicación geográfica del lugar de investigación (Google Maps)</i>	51
<i>Figura 3.2. Secciones de las Vigas</i>	52
<i>Figura 3.3. Diagrama de flujo del procedimiento realizado en la investigación.</i>	53
<i>Figura 3.4. Plano de Ubicación de la Cantera “La Victoria” Km 4+300 de la carretera Cajamarca – Jesús</i>	54
<i>Figura 3.5. Esquema de agrietamiento viga N°01</i>	60
<i>Figura 3.6. Esquema de agrietamiento viga N°02</i>	61
<i>Figura 3.7. Esquema de agrietamiento viga N°03</i>	62
<i>Figura 3.8. Esquema de agrietamiento viga N°04</i>	63
<i>Figura 3.9. Esquema de agrietamiento viga N°05</i>	64
<i>Figura 3.10. Esquema de agrietamiento viga N°06</i>	65
<i>Figura 3.11. Esquema de agrietamiento viga N°07</i>	66
<i>Figura 3.12. Esquema de agrietamiento viga N°08</i>	67
<i>Figura 3.13. Esquema de agrietamiento viga N°09</i>	68
<i>Figura 3.14. Esquema de agrietamiento viga N°10</i>	69
<i>Figura 3.15. Esquema de agrietamiento viga N°11</i>	70
<i>Figura 3.16. Esquema de agrietamiento viga N°12</i>	71
<i>Figura 3.17. Esquema de agrietamiento viga N°13</i>	72
<i>Figura 3.18. Esquema de agrietamiento viga N°14</i>	73
<i>Figura 3.19. Esquema de agrietamiento viga N°15</i>	74
<i>Figura 3.20. Esquema de agrietamiento viga N°16</i>	75
<i>Figura 3.21. Esquema de agrietamiento viga N°17</i>	76
<i>Figura 3.22. Esquema de agrietamiento viga N°18</i>	77
<i>Figura 3.23. Esquema de agrietamiento viga N°19</i>	78
<i>Figura 3.24. Esquema de agrietamiento viga N°20</i>	79
<i>Figura 3.25. Momento Flector vs Deflexión Vigas Patrón Tipo I</i>	80
<i>Figura 3.26. Momento Flector vs Deflexión Vigas Reforzadas Tipo I</i>	80
<i>Figura 3.27. Momento Flector vs Deflexión Vigas Patrón Tipo II</i>	81
<i>Figura 3.28. Momento Flector vs Deflexión Vigas Reforzadas Tipo II</i>	81
<i>Figura 3.29. Momento último vs tipo de viga.</i>	83
<i>Figura 3.30. Carga ultima vs número de viga</i>	83

Figura 3.31. Carga máxima vs Viga Tipo I.....	84
Figura 3.32. Incremento de carga vs tipo de viga.....	84
Figura 3.33. Comparación de cargas en las vigas reforzadas con CFRP (TN).....	85
Figura 3.34. Comparación de cargas en las vigas reforzadas con CFRP (%).....	85
Figura 3.35. Deflexión máxima vs número de viga.....	87
Figura 3.36. Ancho de fisura vs número de viga	87
Figura 7.1. Extracción de agregados de la cantera La Victoria.	104
Figura 7.2. Agregado Fino - Agregado Grueso.....	104
Figura 7.3. Ensayo de contenido de humedad.	104
Figura 7.4. Ensayo de análisis granulométrico de agregados.	104
Figura 7.5. Saturación por 24 horas del agregado fino y del agregado grueso....	105
Figura 7.6. Agregado grueso en estado de saturado con superficie seca.....	105
Figura 7.7. Ensayo de peso específico del agregado grueso.....	105
Figura 7.8. Agregado fino en estado de saturado con superficie seca.....	105
Figura 7.9. Ensayo de Peso específico agregado fino.	106
Figura 7.10. Peso unitario suelto del agregado fino.	106
Figura 7.11. Peso unitario suelto compactado del agregado fino.....	106
Figura 7.12. Peso unitario suelto del agregado grueso.	106
Figura 7.13. Peso unitario suelto compactado del agregado grueso.....	107
Figura 7.14. Ensayo de porcentaje de finos que pasan el tamiz N°200.	107
Figura 7.15. Diseño de mezcla, ensayo de asentamiento del concreto y elaboración de probetas cilíndricas.	107
Figura 7.16. Ensayo a compresión de probetas de concreto a los 7 días ($f'c=210\text{kg/cm}^2$).	108
Figura 7.17. Ensayo a compresión de probetas de concreto a los 7 días ($f'c=280\text{kg/cm}^2$).	108
Figura 7.18. Ensayo a compresión de probetas de concreto a los 14 días ($f'c=210\text{kg/cm}^2$)	108
Figura 7.19. Ensayo a compresión de probetas de concreto a los 14 días ($f'c=280\text{kg/cm}^2$)	109
Figura 7.20. Ensayo a compresión de probetas de concreto a los 28 días ($f'c=210\text{kg/cm}^2$)	109
Figura 7.21. Ensayo a compresión de probetas de concreto a los 28 días ($f'c=280\text{kg/cm}^2$)	109
Figura 7.22. Elaboración de las armaduras de las vigas.	110

<i>Figura 7.23. Armadura modelo de las vigas.</i>	110
<i>Figura 7.24. Encofrado de vigas</i>	110
<i>Figura 7.25. Vibrado del concreto en las vigas.</i>	111
<i>Figura 7.26. Llenado de vigas</i>	111
<i>Figura 7.27. Ensayo de asentamiento del concreto</i>	111
<i>Figura 7.28. Elaboración de probetas cilíndricas</i>	112
<i>Figura 7.29. Etapa final del llenado de vigas.</i>	112
<i>Figura 7.30. Desencofrado de vigas.</i>	112
<i>Figura 7.31. Curado de vigas</i>	112
<i>Figura 7.32. Reforzamiento con Sika CarboDur S512</i>	113
<i>Figura 7.33. Vertimiento del componente A y B del adhesivo Sikadur-30</i>	113
<i>Figura 7.34. Mezclado del componente A y B del adhesivo Sikadur-30</i>	113
<i>Figura 7.35. Inspección del Ing. Miguel Mosqueira Moreno en el reforzamiento de vigas</i>	113
<i>Figura 7.36. Aplicación del adhesivo Sikadur-30 a las láminas de Sika CarboDur S512</i>	114
<i>Figura 7.37. Pegado de las láminas de Sika CarboDur S512 a las vigas</i>	114
<i>Figura 7.38. Reforzamiento a 10 vigas con Sika CarboDur S512.</i>	114
<i>Figura 7.39. Ensayo a compresión de probetas de concreto.</i>	114
<i>Figura 7.40. Inspección del Ing. Miguel Mosqueira en el ensayo a flexión de las vigas de concreto armado.</i>	115
<i>Figura 7.41. Ensayo a flexión de vigas patrón (210-280kg/cm²)</i>	115
<i>Figura 7.42. Ensayo a flexión de vigas reforzadas con láminas de Sika CarboDur S512 (210-280kg/cm²)</i>	115
<i>Figura 7.43. Fallas en las vigas reforzadas con láminas de Sika CarboDur S512.</i>	116
<i>Figura 7.44. Ensayo a flexión de vigas reforzadas con láminas de Sika CarboDur S512</i>	116
<i>Figura 7.45. Tomada de datos en los ensayos a flexión.</i>	116
<i>Figura 7.46. Consolidado del Análisis Granulométrico del Agregado Fino</i>	118
<i>Figura 7.47. Análisis Granulométrico del Agregado Grueso</i>	122
<i>Figura 7.48. Resistencia a la Compresión de Probetas - Diseño de mezcla.</i>	134
<i>Figura 7.49. Resistencia a la Compresión en Porcentaje – Diseño de mezcla.</i> ...	134
<i>Figura 7.50. Resultados de los ensayos a compresión - Vigas</i>	135

RESUMEN

En los últimos años las estructuras de concreto armado por alguna razón presentan déficit en alguna de sus propiedades respecto a una nueva sollicitación durante su vida útil, que crean la necesidad de un reforzamiento y uno de los sistemas de reforzamiento cada vez más frecuente es el uso de la fibra de carbono. Razón por la cual la presente investigación radicó en determinar la variación de la resistencia a la flexión de vigas de concreto armado reforzadas con láminas de fibras de carbono, para ello se elaboraron 2 tipos de vigas: las vigas tipo I fueron de un $f'c=210\text{kg/cm}^2$ y las vigas tipo II de un $f'c=280\text{kg/cm}^2$ ambas de 1.20 m de longitud, 15 cm de ancho y 20 cm de peralte además fueron reforzadas con acero longitudinal de 8mm y acero transversal de 6mm, luego el 50% de cada tipo respectivamente sirvieron como vigas patrón y el 50% restante fueron reforzadas; para el reforzamiento se utilizó una lámina de Sika® CarboDur® S512 que tiene un ancho de 50 mm y un espesor de 1.2 mm, junto a su adhesivo especial Sikadur®-30. Se elaboraron en total 20 vigas, que fueron ensayadas a los 28 días. De los resultados del laboratorio se concluyó que la variación de la resistencia a la flexión de las vigas de concreto armado reforzadas con láminas de fibras de carbono con respecto a las vigas patrones fue de 63.6% y 59.8% para las vigas tipo I y las vigas tipo II respectivamente. Asimismo, se concluyó que las fibras de carbono son muy eficientes para aumentar la resistencia a la flexión en vigas de concreto armado ya que aumentan su ductilidad evitando así las deflexiones excesivas.

Palabras Clave: Reforzamiento, fibras de carbono, vigas, resistencia a flexión, ductilidad, deflexión, concreto armado.

ABSTRACT

In recent years, reinforced concrete structures for some reason have a deficit in some of their properties with respect to a new demand during their useful life, which create the need for reinforcement and one of the reinforcing systems increasingly frequent is the use of carbon fiber. Reason for which the present investigation was in determining the variation of the resistance to the bending of reinforced concrete beams reinforced with sheets of carbon fibers, for it 2 types of beams were elaborated: the beams type I were of a $f'c = 210\text{kg} / \text{cm}^2$ and the type II beams of a $f'c = 280\text{kg} / \text{cm}^2$ both of 1.20 m in length, 15 cm in width and 20 cm in height were also reinforced with 8mm longitudinal steel and 6mm transversal steel, then the 50% of each type respectively served as standard beams and the remaining 50% were reinforced; for the reinforcement a Sika® CarboDur® S512 sheet with a width of 50 mm and a thickness of 1.2 mm was used, together with its special Sikadur®-30 adhesive. A total of 20 beams were prepared, which were tested after 28 days. From laboratory it results it was concluded that the variation of the flexural strength of the reinforced concrete beams reinforced with sheets of carbon fibers relative to the beams patterns was 63.6% and 59.8% for I-beams and the beams type II respectively. Likewise, it was concluded that carbon fibers are very efficient to increase the resistance to bending in reinforced concrete beams since they increase their ductility, thus avoiding excessive deflections.

Keywords: Strengthening, carbon fibers, beams, resistance to bending, ductility, deflection, reinforced concrete.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años el reforzamiento de estructuras ha estado entre los más importantes retos de la ingeniería civil, a consecuencia que las estructuras de concreto armado que por alguna razón presentan déficit en alguna de sus propiedades respecto a una nueva sollicitación durante su vida útil. Generalmente estas nuevas sollicitaciones se presentan por el aumento en su carga de servicio, problemas de durabilidad debido a la utilización de materiales pobres e inapropiados durante la etapa de construcción, inadecuado diseño o construcción, cambios en el ambiente omitidos en el estudio y diseño inicial, incremento de cargas originada por el cambio de uso de la estructura o incremento de su vida útil para afrontar el deterioro de la edificación, sumados a innumerables efectos ambientales, que crean la necesidad de pensar en aumentar la resistencia de la estructura mediante un reforzamiento. (Alegre G., 2017)

En el Perú, históricamente el reforzamiento se hacía de manera convencional. Sin embargo, cada vez es más frecuente el uso de un sistema de reforzamiento estructural basado en un material de alta tecnología que presenta innumerables ventajas frente a los métodos convencionales: la fibra de carbono, un polímero más resistente a la tracción que el acero y mucho más liviano.

De todos los sistemas de reforzamiento estructural disponibles en el Perú, el que más acogida ha tenido, por las ventajas que ofrece, es el de láminas de fibras de carbono. Una o varias capas de láminas dependiendo del requerimiento estructural y características de la fibra son colocadas alrededor o debajo de las secciones de concreto por reforzar y junto a un sistema adhesivo epóxico especial se logra una total adherencia a la antigua superficie de concreto. Con ello se obtiene una capa externa de reforzamiento que ayuda a soportar las cargas del elemento y previene deflexiones excesivas. (Flores L., 2013)

En base a lo anterior, una buena alternativa de solución para reforzar una estructura a consecuencia de los diversos problemas ya mencionados es mediante el uso de las láminas de fibras de carbono con lo cual se logra aumentar la resistencia de un elemento (vigas, columnas, losas). Específicamente en esta investigación las láminas de fibras de carbono se usarán para aumentar la resistencia a la flexión de vigas de concreto armado, para lo cual se utilizará la sigla "CFRP" para hacer referencia al "Polímero Reforzado con Fibra de Carbono" por su nombre en inglés "Carbon Fiber Reinforced Polymer", es aquí que reside el tema principal de la misma.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La investigación trata de resolver la siguiente pregunta:

¿Cuánto es la variación de la resistencia a la flexión de vigas de concreto armado reforzadas con láminas de fibras de carbono (CFRP)?

1.3. HIPÓTESIS

La variación de la resistencia a la flexión de vigas de concreto armado reforzadas con láminas de fibras de carbono (CFRP) es del 20 al 40% en relación a las vigas de concreto armado sin reforzar.

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Justificación teórica:

Esta investigación se realiza con el propósito de aportar conocimientos relacionados al reforzamiento de vigas de concreto armado con láminas de fibras de carbono para aumentar su resistencia a la flexión.

Justificación práctica:

La justificación práctica de esta investigación es dar a conocer las ventajas de la fibra de carbono (Sika® CarboDur®) y proponerlo como una alternativa de solución confiable para el reforzamiento de vigas de concreto.

Justificación personal:

La justificación personal es mi interés por conocer más del tema de reforzamiento de estructuras utilizando un material de alta tecnología que es la fibra de carbono.

1.5. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

En la presente investigación se elaboraron 20 vigas de: 1.20 m de longitud, 15 cm de ancho y 20 cm de peralte, las cuales fueron ensayadas como vigas simplemente apoyadas aplicando una carga al centro de la luz, tal como establece la NTP 339.079.

Las vigas tuvieron una resistencia a la compresión del concreto de 210 kg/cm² y de 280 kg/cm² ambas reforzadas con acero longitudinal de 8mm y acero transversal de 6mm. Además, su diseño estructural cumplió con la norma de concreto armado E 060.

Las láminas de fibra de carbono se colocaron en la cara inferior de las vigas simplemente apoyadas extendiéndose a lo largo de toda la luz.

El producto utilizado fue Sika® CarboDur® S512 y su adhesivo especial Sikadur®-30. Se decidió trabajar con el producto de reforzamiento de la empresa Sika, por la buena reputación que tiene en el mercado actual y también porque ofrecía mayor disponibilidad del producto.

En esta investigación solo se limitó a investigar la resistencia a la flexión de las vigas de concreto armado.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. Objetivo General

- Determinar la variación de la resistencia a la flexión de vigas de concreto armado reforzadas con láminas de fibras de carbono (CFRP).

1.6.2. Objetivos Específicos

- Determinar la resistencia a flexión de las vigas de concreto armado sin reforzamiento y con reforzamiento de fibras de carbono (Sika® CarboDur®).
- Determinar el momento flector máximo y deflexión máxima de las vigas de concreto armado sin reforzamiento y con reforzamiento de fibras de carbono (Sika® CarboDur® S512).
- Describir la eficiencia de las fibras de carbono en el aumento de la resistencia a la flexión en vigas de concreto armado.

1.7. DESCRIPCIÓN DE LOS CONTENIDOS DE LOS CAPÍTULOS

La presente investigación cuenta con cinco capítulos los cuales se describen a continuación:

Capítulo I: Se presenta la introducción, que comprende el planeamiento del problema, formulación del problema, hipótesis, justificación de la investigación, alcances de la investigación y los objetivos.

Capítulo II: Este capítulo contiene al marco teórico, que describe el estado del arte a nivel internacional, nacional y local; luego se detalla los fundamentos teóricos que sirven de base para la investigación.

Capítulo III: Se indica la ubicación geográfica y el tiempo en el cual se realizó la investigación; así mismo, se describe la metodología aplicada y el procedimiento en orden cronológico realizados en esta investigación. Finalmente se presenta los resultados obtenidos del procesamiento de datos, de acuerdo a los objetivos especificados.

Capítulo IV: En esta sección se realiza el análisis y discusión de los resultados obtenidos del capítulo anterior, también se hace un contraste de la hipótesis y de los antecedentes teóricos.

Capítulo V: En este capítulo finaliza la investigación, presentando las conclusiones para cada objetivo en función a los resultados encontrados y también se indica las recomendaciones pertinentes a la presente investigación.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

De acuerdo con Ibáñez C. (2013) en su investigación de pregrado: "**Diseño del reforzamiento para la reparación o aumento de capacidad de carga de vigas para puentes de concreto reforzado utilizando fibras de carbono**". Presentó un método de diseño para la reparación y reforzamiento con fibra de carbono en vigas de puentes de concreto reforzado, que presentan fallas o golpes graves. Para lo cual se diseñaron dos vigas con cargas referentes a un HS-15 y HS-20 y con los cuales se procedió a calcular la cantidad de refuerzo FRP de fibra de carbono para reforzarla. Los resultados mostraron que el sistema de barras de fibra de carbono incrementa 20% el módulo de ruptura de una viga de concreto armado, con ventajas de bajo impacto estético y rápida aplicación, incluso en edificaciones en funcionamiento.

Según Beltrán A. (2011) en su investigación de pregrado: "**Uso de fibras de carbono como reforzamiento a flexión en vigas de concreto reforzado**". Determina el comportamiento de una viga de concreto armado fisurada por efectos de la flexión, cuando se refuerza con una tela unidireccional fabricada en fibra de carbono (SikaWrap 103 C). Este estudio concluye que el uso de materiales compuestos por fibra de carbono, en este caso SikaWrap 103C adherido en una matriz de epóxico Sikadur - 301, como reforzamiento a flexión en elementos de concreto armado es muy eficiente. Además, que el incremento de la resistencia a flexión fue notable en la viga con reforzamiento preventivo ya que se presentó un incremento del 33.16% con respecto a la carga de falla sin reforzamiento.

Otro estudio en el ámbito internacional es de los autores Duque A., Amazo I. Ruiz D. (2010) en su investigación: "**Ensayos de resistencia de pórticos de concreto a escala, reforzados con CFRP en los nudos**". Presentaron los resultados de un estudio experimental de cuatro pórticos de concreto a escala $\frac{1}{2}$ sometidos a carga monolítica, dos de los cuatro fueron fortalecidos en los nudos mediante polímeros reforzados con fibra de carbono. Esta investigación concluyó que la alternativa de refuerzo con CFRP es viable y fácil de implementar en estructuras de concreto debido a la limpieza del proceso, al bajo peso de las fibras y a la rapidez del proceso. Además, en promedio, la rigidez de los pórticos reforzados con fibras de carbono es 1.93 veces la rigidez de los pórticos de concreto sin refuerzo.

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Según Alegre G. (2017) en su investigación de pregrado: "**Estudio de la influencia en la resistencia y ductilidad de las fibras de carbono utilizadas como reforzamiento de vigas de concreto armado**". Determina el comportamiento elástico e inelástico de vigas de concreto armado sometidas a flexión y reforzadas con fibras de carbono. Al finalizar esta investigación se comprobó que el refuerzo de fibra de carbono (CFRP) aumenta la resistencia de las secciones de concreto armado sometidas a flexión. El incremento de la resistencia a flexión alcanza un valor de 58.9% para la sección con menor cuantía de acero, y en el caso de la sección de mayor cuantía de acero, el incremento de la resistencia alcanza un valor de 18.4%.

Calla F., Torres J. (2015) en su investigación de pregrado: "**Reforzamiento por flexión de vigas de concreto armado con fibra de carbono**". En el cual, para demostrar la efectividad de la fibra de carbono en el refuerzo de estructuras a flexión, elaboraron 39 modelos estructurales que les permitan conocer la forma en que pueden fallar ante una fuerza aplicada. Finalmente demostraron la efectividad del reforzamiento con fibra de carbono por flexión, ya que en todas las vigas ensayadas se obtuvo momentos resistentes mayores, llegando así a un aumento aproximado de 30% a 40% en comparación a las que no fueron reforzadas.

Cutti K. (2015) en su investigación de pregrado: "**Análisis experimental del uso de las fibras de carbono para el reforzamiento en una viga peraltada, de concreto armado para una edificación en la ciudad de Lircay Angaraes Huancavelica**". Realiza el ensayo a flexión de una viga sin reforzamiento y el ensayo de una viga con reforzamiento con fibras de carbono, dándonos como resultado que, al incrementar cargas, la fibra de carbono influye en incrementar la resistencia de la viga, incrementando 1000 kg (1 ton) a la viga normal.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. CONCRETO ARMADO

McCormac, J.C; Brown, R.H. (2011) definen concreto armado (concreto reforzado) como una combinación de concreto y acero en la que el refuerzo de acero proporciona la resistencia a la tensión de que carece el concreto, y que el acero de refuerzo también es capaz de resistir fuerzas de compresión como es el caso de las columnas.

Mencionan también que el concreto armado es probablemente el material disponible más importante para la construcción, debido a que puede usarse en una u otra forma para casi todas las estructuras, grandes o pequeñas en edificios, puentes, presas, muros de contención, túneles, etcétera. Entre sus numerosas ventajas de este material universal tenemos los siguientes:

- Tiene una resistencia considerable a la compresión por unidad de costo en comparación con muchos otros materiales.
- El concreto armado tiene gran resistencia a las acciones del fuego y el agua y, de hecho, es el mejor material estructural que existe para los casos en que el agua esté presente. Durante incendios de intensidad media, los miembros con un recubrimiento adecuado de concreto sobre las varillas de refuerzo sufren sólo daño superficial sin fallar.
- Las estructuras de concreto armado son muy rígidas.
- Requiere de poco mantenimiento.
- Comparado con otros materiales, tiene una larga vida de servicio. Bajo condiciones apropiadas, las estructuras de concreto armado pueden usarse indefinidamente sin reducción en sus capacidades de carga. Esto puede explicarse por el hecho de que la resistencia del concreto no disminuye con el tiempo, sino que en realidad aumenta con los años, debido al largo proceso de solidificación de la pasta de cemento.
- Es prácticamente el único material económico disponible para zapatas, losas de piso, muros de sótano, pilares y construcciones similares.
- Una característica especial del concreto es la posibilidad de colarlo en una variedad extraordinaria de formas que van desde simples losas, vigas y columnas, hasta grandes arcos y cascarones.
- En muchas regiones, el concreto aprovecha para su elaboración la existencia de materiales locales baratos (arena, grava y agua) y requiere cantidades relativamente pequeñas de cemento y acero de refuerzo, las cuales puede ser necesario conseguir en otras regiones del país.

- Se requiere mano de obra de baja calificación para su montaje, en comparación con otros materiales, como el acero estructural.

2.2.2. VIGA

ACI 318 (2014) define viga como un miembro sometido principalmente a flexión y cortante, con o sin fuerza axial o de torsión. Por otro lado, Blanco A. (2011), designa a las vigas como elementos que reciben la carga de las losas, y las transmiten hacia otras o directamente hacia las columnas o muros. Generalmente las vigas forman los denominados ejes de la estructura, teniendo las columnas ubicadas en sus intersecciones. Las vigas tienen una función sísmica importantísima, ésta es la de constituir junto con las columnas y muros los elementos resistentes a los diferentes esfuerzos producidos por las fuerzas horizontales de sismo (cortante, momentos y axiales) y ser lo elementos que ayuda a proporcionar rigidez lateral.

Además, precisa que las vigas pueden ser peraltadas o chatas dependiendo de su altura o peralte, se denomina viga peraltada a aquella que tiene una altura mayor al espesor del techo, y por tanto es visible. Las diferencias entre una viga peraltada y una viga chata si son notorias, puesto que comprenden no solo su capacidad resistente por flexión y cortante, sino su capacidad de deformación (rigidez o flexibilidad). Es obvio que una viga peraltada se deforma menos y tiene mayor capacidad resistente que una viga chata, debido a su mayor inercia y su mayor brazo de palanca interno. El comportamiento en flexión de una viga origina esfuerzos de compresión y tracción.

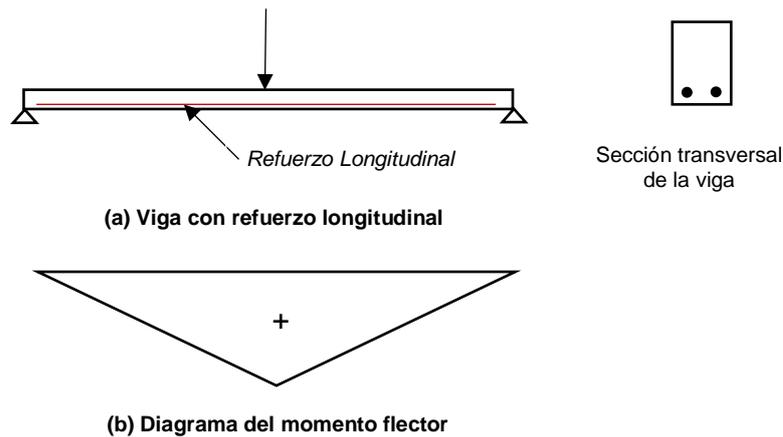
2.2.3. FLEXIÓN

Astorga, A.; Rivero, P. (2009) definen flexión como un tipo de esfuerzo que incluye tracción y compresión, pero en lugar de actuar a lo largo de la dirección en que se aplican las fuerzas, como sucede con la tracción y compresión, lo hace cambiando la dirección de ellas. La flexión es un mecanismo propio de las vigas, que con la acción de su propio peso y cualquier carga adicional existente, inciden fuerzas perpendiculares que producen una deformación en la pieza que tiende a curvarse hacia abajo.

2.2.3.1. Secciones Rectangulares Sometidas a Flexión:

Harmsen T. (2002), especifica el caso de una viga de sección rectangular, simplemente apoyada y con refuerzo en la zona inferior; la cual está sometida a la acción de una carga concentrada la cual genera el diagrama de momento flector presentado en la figura 2.1 y que además a lo largo de todo el elemento, la fibra superior está comprimida y la inferior, traccionada.

Figura 2.1. Viga simplemente apoyada sometida a una carga concentrada. (Adaptado de Harmsen T. 2002)



Si las cargas se incrementan hasta la falla por flexión (Se asume que la viga está preparada para fallar inicialmente por flexión y no por otra sollicitación.), la sección central de la viga, donde la fuerza cortante es nula, atraviesa por las siguientes etapas:

Etapas 1: No hay presencia de rajaduras por que la carga es pequeña y por lo tanto los esfuerzos de compresión y tracción en la sección no superan la resistencia del concreto.

Etapas 2: El esfuerzo del concreto está a punto de alcanzar su resistencia a tracción. No se observan las primeras rajaduras, pero si una creciente deformación. El acero y el concreto se deforman conjuntamente debido a su adherencia entre ellos presentando un comportamiento elástico, además los esfuerzos de cada material están vinculados por la siguiente ecuación:

$$f_s = n f_c \quad (2.1)$$

Donde:

f_s : Esfuerzo del acero.

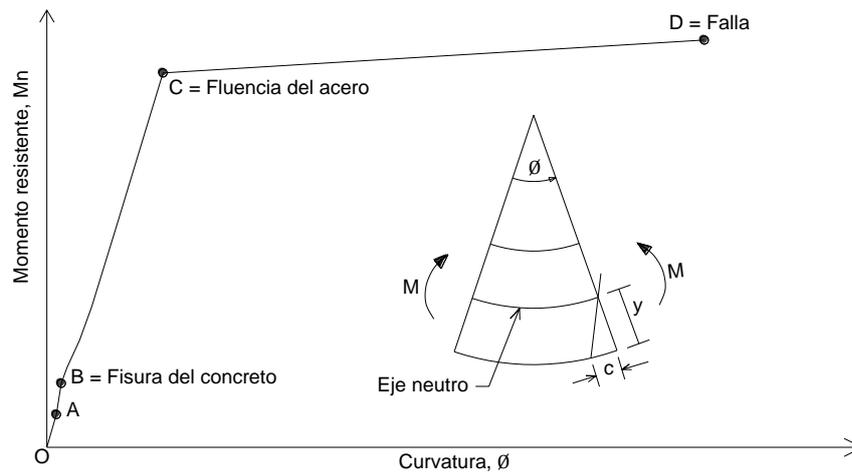
f_c : Esfuerzo del concreto.

n : Relación modular.

Etapas 3: El concreto presenta agrietamiento, por lo cual no resiste el esfuerzo de tracción y éste último es absorbido por el refuerzo; la distribución de esfuerzos sigue siendo lineal. El concreto llega hasta la mitad de su resistencia a la compresión.

Etapas 4: El acero alcanza el esfuerzo de fluencia, aunque el concreto no llegue a su resistencia máxima, la deflexión se incrementa rápidamente y la distribución de esfuerzos ya no es lineal. Finalmente, el concreto falla por aplastamiento.

Figura 2.2. Diagrama momento resistente-curvatura de una sección de la viga sometida a carga uniformemente distribuido. (Adaptado de Harmsen T. 2002)



Harmsen define a la curvatura como:

$$\phi = \frac{\varepsilon}{y} \quad (2.2)$$

Donde:

ε : Deformación unitaria de la sección analizada a una distancia y del eje neutro de la misma.

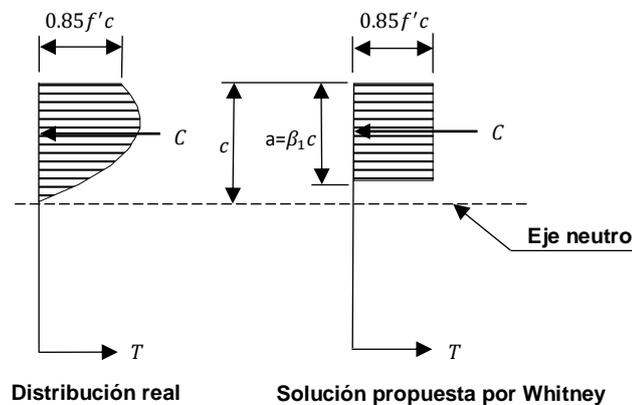
2.2.3.2. Hipótesis básicas para el estudio de elementos sometidos a flexión:

El Código ACI-318S-14 (2014) en su capítulo 22.2, presenta las siguientes hipótesis para elementos sometidos a flexión:

- Las deformaciones en concreto y refuerzo son directamente proporcionales a su distancia al eje neutro de la sección excepto para vigas de gran peralte para las cuales se asumirá una distribución no lineal de deformaciones. Esta suposición ha sido confirmada experimentalmente y es fundamental para la determinación de los esfuerzos en el refuerzo, tanto a tracción como a compresión.
- El concreto falla al alcanzar una deformación unitaria última de 0.003. Sin embargo, para concretos normales éstas varían entre 0.003 y 0.004.
- El esfuerzo en el acero antes de alcanzar la fluencia es igual al producto de su módulo de elasticidad por su deformación unitaria. Para deformaciones mayores a la de fluencia, el esfuerzo en el refuerzo será independiente de la deformación e igual a f_y . Esta hipótesis refleja el modelo elasto-plástico de la curva esfuerzo-deformación del acero.
- La resistencia a la tensión del concreto es despreciada.

- La distribución de los esfuerzos de compresión en la sección de concreto será asumida de modo que sea coherente con los resultados obtenidos en los ensayos. Esta hipótesis reconoce la naturaleza inelástica del comportamiento del concreto.
- Los requerimientos del punto anterior son satisfechos por la distribución rectangular de esfuerzos, propuesta por Whitney. El valor de β_1 es 0.85 si la resistencia del concreto es menor que 280 kg/cm^2 . Si este no es el caso, β_1 disminuirá en 0.05 por cada incremento de 70 kg/cm^2 en la resistencia del concreto. En ningún caso β_1 será menor que 0.65, pues los ensayos han demostrado que para concretos de alta resistencia una reducción excesiva de β_1 conlleva a diseños poco conservadores. La resultante de la distribución rectangular de esfuerzos propuesta por Whitney coincide con la resultante de la distribución no lineal de esfuerzos.

Figura 2.3. Distribución de esfuerzos en el concreto en compresión de la viga.
(Adaptado de Harmsen T. 2002)



2.2.3.3. Tipos de fallas en los elementos sometidos a flexión:

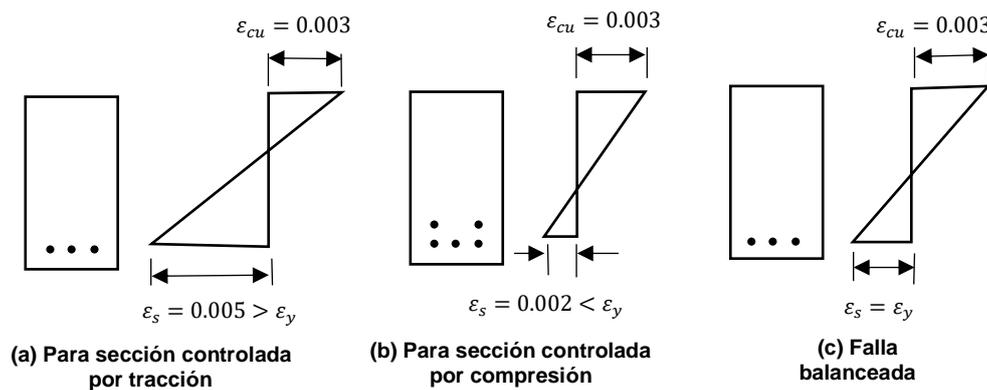
Harmsen, T. (2002), menciona que los elementos sometidos a flexión casi siempre fallan por compresión del concreto. Sin embargo, el concreto puede fallar antes o después que el acero fluya. La naturaleza de la falla es determinada por la cuantía de refuerzo y es de tres tipos:

- **Falla por tensión:** El acero fluye y el elemento exhibe una falla dúctil. Se aprecian grandes deflexiones y rajaduras antes del colapso lo cual alerta a los usuarios acerca del peligro inminente. Estas secciones son llamadas también sub-reforzadas.
- **Falla por compresión:** El acero no tiene oportunidad de fluir y el concreto falla repentinamente. Estas secciones son llamadas sobre-reforzadas.

La resistencia de una sección sobre-reforzada es mayor que la de otra sub-reforzada de dimensiones similares. Sin embargo, la primera no tiene comportamiento dúctil y el tipo de colapso no es conveniente. En el diseño se evita este tipo de falla.

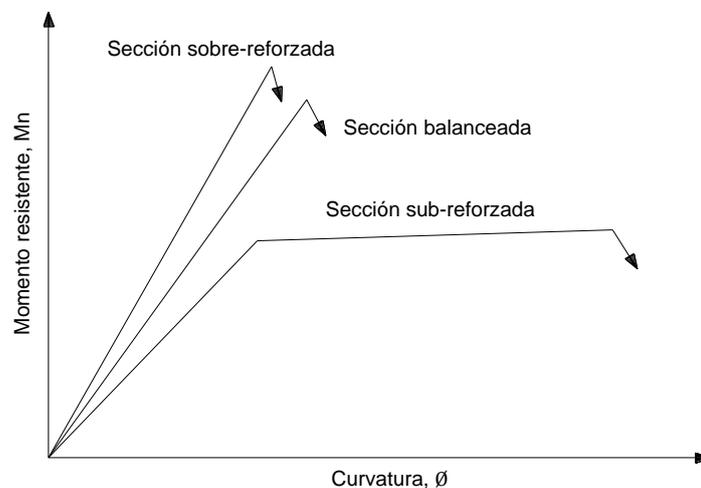
- **Falla balanceada:** Se produce cuando el concreto alcanza la deformación unitaria Última de 0.003 simultáneamente al inicio de la fluencia del acero (ACI-10.3.2). La falla es frágil y no deseada.

Figura 2.4. Distribución de deformaciones para los diversos tipos de fallas en flexión. (Adaptado de Harmsen T. 2002)



Las características descritas anteriormente para cada tipo de falla se pueden apreciar mejor al ser comparadas en la siguiente gráfica momento resistente vs curvatura:

Figura 2.5. Diagrama momento-curvatura para los diversos tipos de fallas en flexión. (Adaptado de Harmsen T. 2002)



2.2.3.4. Análisis de una Sección Rectangular con Comportamiento Dúctil

Partiendo de la distribución de esfuerzos mostrada en la figura 2.6 se establece la condición equilibrio:

$$C = T$$

$$0.85f'_c b a = A_s f_y \quad (2.3)$$

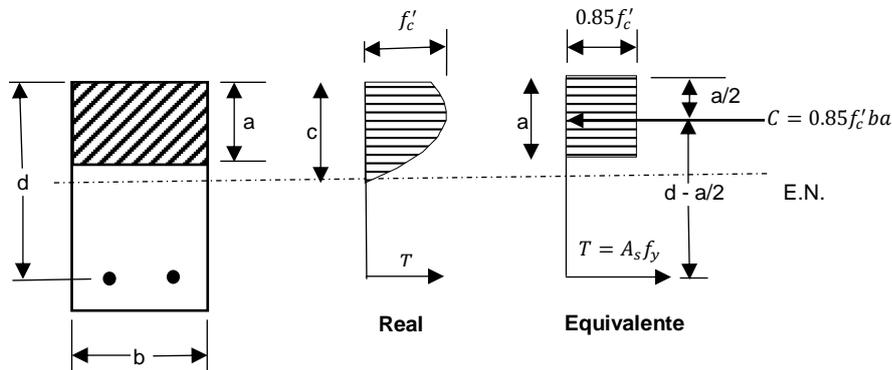
Donde:

b: Ancho de la sección de concreto.

a: Altura del bloque rectangular de esfuerzos de compresión en el concreto.

As: Área de refuerzo en tensión de la sección.

Figura 2.6. Esfuerzos de una sección rectangular con esfuerzo en tensión sometida a flexión. (Adaptado de Harmsen T. 2002)



Despejando la ecuación 2.3:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (2.4)$$

Se define índice de refuerzo, ω , como:

$$\omega = \frac{\rho f_y}{f'_c} \quad (2.5)$$

Donde:

ρ : Cuantía del acero en tensión definida a través de la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{A_s}{b d} \quad (2.6)$$

El índice de refuerzo es un parámetro adimensional usado para medir el comportamiento de la sección ya que involucra las tres variables principales que lo afectan: ρ , f_y y f'_c

De las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4, tenemos:

$$a = \frac{\rho d f_y}{0.85 f'_c} = \frac{\omega d}{0.85} \quad (2.7)$$

El momento resistente nominal de la sección estará dado por:

$$Mn = C \left(d - \frac{a}{2} \right) = T \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.8)$$

De donde se obtiene:

$$Mn = 0.85f'_c ba \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.9)$$

$$Mn = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.10)$$

Finalmente, se tiene:

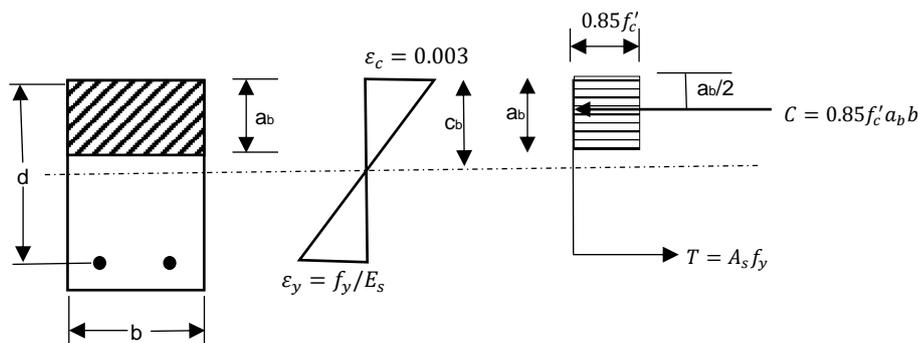
$$Mn = bd^2 \omega f'_c (1 - 0.59\omega) \quad (2.11)$$

2.2.3.5. Determinación de la Cuantía Balanceada o Cuantía Básica

Las expresiones deducidas en la sección anterior son válidas siempre que el esfuerzo en el acero sea igual a su esfuerzo de fluencia. Ello se verifica siempre que la cuantía de la sección sea menor o igual que la cuantía básica.

En la figura 2.7 se muestra las características de una sección balanceada en la rotura. En el diagrama de deformaciones, por semejanza de triángulos, se puede plantear la siguiente relación:

Figura 2.7. Esfuerzos de una sección rectangular con falla balanceada. (Adaptado de Harmsen T. 2002)



Por semejanza de triángulos se puede anotar la siguiente equivalencia:

$$\frac{0.003}{c_b} = \frac{\epsilon_y}{d - c_b} = \frac{f_y/E_s}{d - c_b} \quad (2.12)$$

Donde:

ϵ_y : Deformación unitaria correspondiente al esfuerzo de fluencia del acero.

c_b : Distancia del eje neutro a la fibra extrema en compresión en una sección con cuantía balanceada.

En adelante, los parámetros que tengan el subíndice b estarán referidos a la condición particular de cuantía balanceada.

Despejando c_b se obtiene:

$$c_b = \frac{0.003 d E_s}{f_y + 0.003 E_s} \quad (2.13)$$

Reemplazando el valor de: $E_s = 2'039,000.00 \text{ kg/cm}^2$

$$c_b = \frac{6117 d}{f_y + 6117} \quad (2.14)$$

Sabiendo que: $a_b = \beta_1 c_b$ y haciendo uso de las ecuaciones (2.11) y (2.12), se obtiene:

$$a_b = \beta_1 c_b = \frac{\omega_b d}{0.85} = \frac{\bar{\rho}_b f_y d}{0.85 f'_c} \quad (2.15)$$

Donde:

$\bar{\rho}_b$: Cuantía balanceada o básica.

Finalmente

$$\bar{\rho}_b = \frac{0.85 f'_c \beta_1 c_b}{f_y d} = \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} \left(\frac{6117 d}{f_y + 6117} \right) \quad (2.16)$$

Por razones de seguridad el código del ACI limita la cuantía de acero ρ a $0.75 \bar{\rho}_b$.

En la práctica, una sección con este refuerzo es antieconómica, por lo que normalmente se procura usar cuantías menores a $0.5 \bar{\rho}_b$. En la Tabla 2.1. se muestran los valores de $\bar{\rho}_b$, $0.75 \bar{\rho}_b$ y $0.5 \bar{\rho}_b$ para diferentes calidades de concreto.

Tabla 2.1. Cuantía básica para concretos de diferentes calidades. (Adaptado de Harmsen T. 2002)

f'_c (Kg/cm ²)	210	280	350	420
β_1	0.85	0.85	0.80	0.75
$\bar{\rho}_b$	0.0214	0.0285	0.0335	0.0377
$0.75 \bar{\rho}_b$	0.0116	0.0214	0.0252	0.0283
$0.5 \bar{\rho}_b$	0.0107	0.0143	0.0167	0.0189

2.2.3.6. Acero Máximo en Flexión:

En el acápite 10.3.4 de la norma E.060 Concreto Armado, establece que el refuerzo de acero en tracción no deberá exceder de $0.75 A_{sb}$:

$$A_{s_{m\acute{a}x}} = 0.75 A_{sb} \quad (2.17)$$

$$\rho_{m\acute{a}x} = 0.75 \bar{\rho}_b \quad (2.18)$$

La cuantía máxima para secciones doblemente reforzadas, es:

$$\rho_{m\acute{a}x} = 0.75 \bar{\rho}_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y} \quad (2.19)$$

2.2.3.7. Refuerzo mínimo en elementos a flexión

De acuerdo a la norma E.060 Concreto Armado del Reglamento Nacional de Edificaciones:

$$A_{s \min} = 0.7 \frac{\sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d \quad (2.20)$$

2.2.4. CORTANTE

Blanco A. (2011) menciona que a diferencia de lo que ocurre con los miembros sometidos a flexión, el comportamiento de miembros de concreto armado sujetos a cortante aún no está totalmente comprendido, existiendo diversas teorías que tratan de explicar los mecanismos internos. La gran mayoría de los elementos de concreto armado tienen que resistir fuerzas cortantes que rara vez actúan por si solas, siendo así necesario examinar las interacciones con otras acciones.

Así mismo que la transmisión de cortante en vigas de concreto armado se apoya fuertemente en la resistencia a tracción y compresión del concreto, y tiene como característica primordial un tipo de falla que no es dúctil. En las estructuras resistentes a sismos se pone gran atención a la capacidad de incursionar en el régimen plástico (ductilidad) y por este motivo el diseñador debe asegurarse que no ocurra una falla por cortante, sino buscar la falla por flexión, por eso la resistencia a cortante del elemento debe ser algo mayor que la resistencia máxima a flexión que se pueda desarrollar.

2.2.4.1. Diseño por Cortante:

De acuerdo a la norma de concreto armado E 0.60 en su capítulo 11, menciona que la resistencia requerida por corte " V_u " debe ser menor o igual que la resistencia nominal " V_n " afectada por un factor de diseño en la sección analizada:

$$V_u \leq \phi V_n \quad (2.21)$$

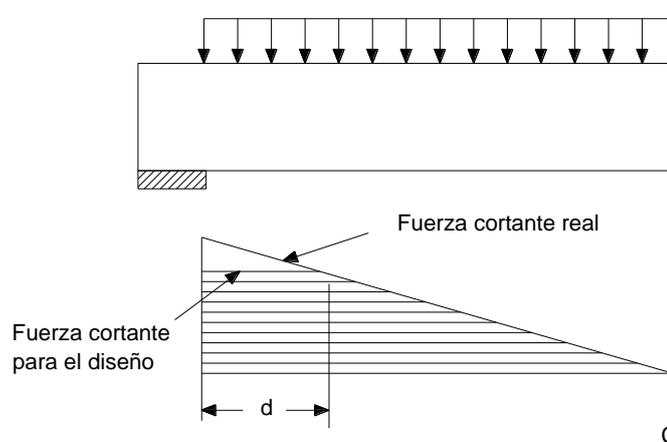
La resistencia nominal estará conformada por los aportes de resistencia nominal al cortante del concreto " V_c " y la resistencia nominal al cortante del acero " V_s ":

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.22)$$

Si la reacción del apoyo induce compresión en el elemento, si las cargas están aplicadas en la parte superior de la viga y no hay cargas concentradas entre la cara del apoyo y una sección ubicada a " d " de ella, entonces las secciones situadas en éste tramo se diseñarán para un cortante último igual al correspondiente a la sección ubicada a " d " del apoyo.

Las cargas distribuidas aplicadas en el tramo AB son transmitidas al apoyo por compresión directa. Por ello, no se consideran para el diseño del refuerzo transversal. (Harmsen, 2002)

Figura 2.8. Diagrama de fuerzas cortantes a una distancia "d". (Adaptado de Harmsen T. 2002)



Resistencia del concreto a la fuerza cortante:

La contribución del concreto en la resistencia a corte para miembros sometidos únicamente a corte y a flexión es:

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.23)$$

Resistencia del acero o refuerzo a la fuerza cortante:

El esfuerzo de fluencia del acero por corte será como máximo 4200 kg/cm² para contrarrestar las grietas diagonales. Blanco A. (2011) clasifica al refuerzo transversal:

- Estribos cerrados perpendiculares al eje del elemento.
- Estribos perpendiculares al eje del elemento y barras dobladas que formen un ángulo de 30° o más con el eje del elemento.
- Espirales.

La contribución del refuerzo en la resistencia a corte cuando se utilice estribos perpendiculares al eje longitudinal del elemento es:

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (2.24)$$

Donde:

A_v : Área del refuerzo por cortante del espaciamiento "S", proporcionada a la suma de las áreas de las ramas de los estribos ubicados en el alma.

2.2.4.2. Refuerzo Mínimo de Corte:

La falla por corte es frágil y debe ser evitada siempre. Por ello, se recomienda colocar una cantidad mínima de refuerzo transversal para brindar mayor seguridad al diseño y para garantizar que el elemento sea capaz de resistir los esfuerzos que se presentan después de producirse el agrietamiento diagonal.

Morales R. (2012) describe el siguiente procedimiento:

1. Si $V_n \leq 0.5 \phi V_c$, entonces no necesita ningún tipo de refuerzo transversal.
2. Si $0.5 \phi V_c \leq V_{ud} \leq \phi V_c$, entonces requiere de un refuerzo transversal mínimo y es el mayor valor de las siguientes equivalencias:

$$A_v \min = 0.2 \sqrt{f'c} b_w \frac{S}{f_{yt}} \quad (2.25)$$

$$A_v \min = 3.5 \frac{b_w S}{f_{yt}} \quad (2.26)$$

Para $S \leq d/2$ y $S \leq 60 \text{ cm}$.

3. Si $V_n \geq \phi V_c$, tenemos:

Si $V_s \leq 1.06 \sqrt{f'c} b_w d$, entonces $S \leq d/2$ v $S \leq 60 \text{ cm}$.

Si $V_s > 1.06 \sqrt{f'c} b_w d$ y $V_s \leq 2.12 \sqrt{f'c} b_w d$,

Entonces $S \leq d/4$ v $S \leq 30 \text{ cm}$.

4. Si $V_s > 2.12 \sqrt{f'c} b_w d$, entonces:

Cambiar sección y/o mejorar calidad de concreto.

2.2.4.3. Límites para el espaciamiento del refuerzo de corte:

La norma E 0.60 de concreto armado en su acápite 11.5.5 especifica que el espaciamiento del refuerzo de cortante colocado perpendicularmente al eje longitudinal del elemento no debe exceder en "d/2", ni a 600 mm:

$$S \leq d/2 \quad (2.27)$$

$$S \leq 60 \text{ cm} \quad (2.28)$$

2.2.4.4. Aporte Máximo de refuerzo transversal solicitado por corte:

El valor máximo que puede tomar " V_s ", es:

$$V_s = 2.12 \sqrt{f'c} b_w d \quad (2.29)$$

De tomar un valor superior a la ecuación (2.29) se debe considerar cambiar sección y/o mejorar calidad de concreto.

2.2.5. REQUISITOS DE RESISTENCIA Y SERVICIO:

La norma de concreto armado E.060 en su capítulo 9 establece que toda sección de los elementos estructurales, la resistencia de diseño “ ϕRn ” deberá ser mayor o igual que la resistencia requerida “ Ru ”, calculadas para las cargas y fuerzas amplificadas en las combinaciones que se estipulan en la norma mencionada:

$$\phi Rn \geq Ru \quad (2.30)$$

2.2.5.1. Resistencia Requerida (U):

La combinación de carga que por lo general se presenta en los diseños de estructuras convencionales, está dada por la carga muerta (CM) y carga viva (CV):

$$U = 1.4 CM + 1.7 CV \quad (2.31)$$

2.2.5.2. Resistencia de Diseño:

Esta resistencia es proporcionada por un elemento, sus conexiones con otros elementos, así como sus secciones transversales, en términos de flexión, carga axial, cortante y torsión, deben tomarse como la resistencia nominal calculada de acuerdo con los requisitos y suposiciones de esta norma, multiplicada por los factores de resistencia que a continuación se mencionan:

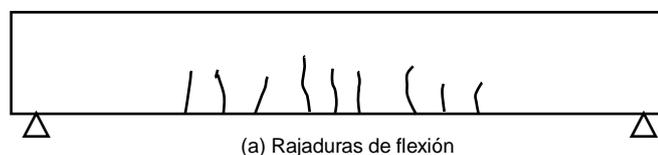
- Flexión sin carga axial: 0.90.
- Cortante y Torsión: 0.85.

Los factores de reducción de resistencia son de suma importancia; ya que al ser utilizados permiten compensar las incertidumbres respecto a la resistencia de los materiales, las inexactitudes en las ecuaciones de diseño, las aproximaciones del análisis y otros.

2.2.6. RAJADURAS DE FLEXIÓN EN VIGAS DE CONCRETO ARMADO:

Harmsen T. (2002). Se presentan en las secciones donde se producen los mayores esfuerzos de flexión, es decir, en el tercio central de la luz de la viga y en los apoyos si se trata de elementos continuos. Son verticales y se inician al borde del elemento. En estas secciones, el efecto de la fuerza cortante es pequeño en comparación con el del momento flector.

Figura 2.9. Rajadura de flexión en vigas de concreto armado. (Adaptado de Harmsen T. 2002)



2.2.7. PREDIMENSIONAMIENTO DE VIGAS:

La norma de concreto armado E. 060 en su acápite 10.4, detalla la distancia entre los apoyos laterales de elementos sometidos a flexión: “La separación entre los apoyos laterales de una viga no debe exceder de 50 veces el menor ancho b del ala o cara en compresión”:

$$\text{Luz máxima entre apoyos} \leq 50 b \quad (2.32)$$

La norma E. 060 en su acápite 9.6.2.1, especifica los peraltes o espesores mínimos de vigas, que a continuación se muestran:

Tabla 2.2. Peralte mínimo en vigas.

	Espesor o peralte mínimo, h			
	Simplemente apoyados	Con un extremo continuo	Ambos extremos continuos	En voladizo
Elementos	Elementos que no soporten o estén ligados a divisiones u otro tipo de elementos no estructurales susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes.			
Losas macizas en una dirección	$l/20$	$l/24$	$l/28$	$l/10$
Vigas o losas nervadas en un dirección	$l/16$	$l/18.5$	$l/21$	$l/8$

Blanco A. (2011) sugiere las siguientes ecuaciones para predimensionamiento de vigas:

$$\text{Peralte de la viga} = (1/10) \text{ a } (1/12) \text{ de la luz libre} \quad (2.33)$$

$$\text{Ancho de la viga} = 0.3 \text{ a } 0.5 \text{ la altura de viga} \quad (2.34)$$

De acuerdo con el ACI 318 - 14, para una viga de sección rectangular con acero solo en tracción, se tiene que:

$$Mn = \frac{Mu}{\phi} = b d^2 w f'c (1 - 0.59w) \quad (2.35)$$

$$\omega = \frac{\rho f_y}{f'_c} \quad (2.5)$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (2.6)$$

Donde:

$f'c$: Resistencia del concreto

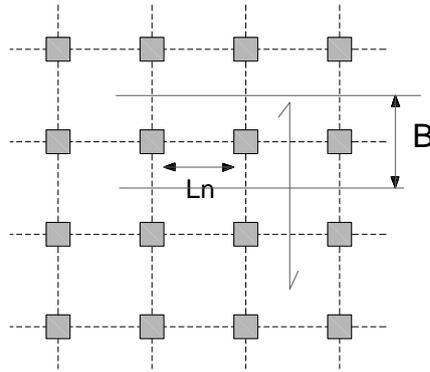
f_y : Resistencia a la tracción del acero de refuerzo

ρ : Cuantía en falla a la tracción.

A_s : Área de acero de refuerzo de la viga.

Luego en la figura 2.10.

Figura 2.10. Vista en planta de la viga analizada. (Adaptado de Morales R. 2012).



El momento flector último de una sección rectangular cualquiera, se expresa:

$$M_u = (W_u B) \frac{L_n^2}{\alpha} \quad (2.36)$$

Donde:

W_u : Carga por unidad de área, en Kg/cm².

L_n : Longitud libre.

B : Dimensión transversal tributaria.

α : Coeficiente de momento.

Igualando las ecuaciones (2.36) y (2.35), se tiene:

$$d = L_n \sqrt{\frac{W_u B}{\alpha \phi f'c b w (1 - 0.59w)}} \quad (2.37)$$

Considerando la sección de momento positivo máximo, asumimos:

$$\alpha = 16 \quad b = B/20$$

$$\phi = 0.9 \quad f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'c = 210 \text{ kg/cm}^2 \quad w = 0.007 * 4200/210 = 0.14$$

$$\rho = 0.007 \quad h = d/1.1 \text{ para un } f.s = 10 \%$$

Reemplazamos estos valores en la ecuación (2.37):

$$h = \frac{L_n}{\left(\frac{4}{\sqrt{W_u}}\right)} \quad (2.38)$$

Donde:

d : Peralte de la viga

L_n : Luz libre de la viga

W_u : Carga por unidad de área

De acuerdo a la norma de concreto armado de E 060 en su capítulo 7.7 detalla el espesor del recubrimiento de concreto para el acero de refuerzo:

Para concreto no expuesto a la intemperie ni en contacto con el suelo:

- Losas, muros, viguetas:

Barras de 1 11/16" y 2 1/4": 40 mm

Barras de 1 3/8" y menores: 20 mm

- Vigas y columnas:

Armadura principal, estribos y espirales: 40 mm

2.2.8. FIBRA DE CARBONO

Ojeda M. (2011) define la fibra de carbono como un material compuesto esencialmente de átomos de carbono, constituido por pequeñas fibras de 50-10 micras (μm) de diámetro. Los átomos de carbono que conforman las fibras de carbono se encuentran entrelazadas entre sí a través de cristales, los cuales están alineados paralelamente al eje longitudinal de la fibra, lo cual le produce a la fibra una alta resistencia en relación a su tamaño. Entre las principales propiedades que poseen las fibras de carbono es que son materiales muy flexibles, son altamente resistentes, son elementos livianos y de baja densidad en comparación al acero, son resistentes a altas temperaturas y baja expansión térmica, poseen un bajo costo de instalación y una rápida puesta en servicio; estos beneficios las hacen muy conocidas en la industria aeronáutica, de la construcción, automovilística, etc.

2.2.9. REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO

Rosero L. (2013) precisa que el reforzamiento es una acción que permite aumentar la capacidad de resistencia mecánica de una parte de la estructura o de la estructura completa. Por otro lado, Moncayo M., et al., (2016) especifica que en ciertas ocasiones se determina que la estructura requiere aumentar su resistencia en función de las demandas reales. En otras ocasiones, las estructuras se someten a eventos excepcionales que provocan daños que deben ser reparados urgentemente. Hay un tipo de reparación que restituye las características de resistencia original de la estructura, pero por limitaciones económicas los dueños deciden elegir reparaciones cosméticas y superficiales, que permiten ver superficialmente la estructura en buen estado, pero desde el punto de vista mecánico, la estructura continúa con daños.

2.2.10. SISTEMA DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL CFRP (CARBON FIBER REINFORCED POLYMER)

Flores L. (2013) señala que, de todos los sistemas de reforzamiento disponibles, en nuestro medio, el que más acogida a tenido por ventajas es el de láminas de fibras de carbono. Una o varias capas de láminas son colocadas alrededor o debajo de las secciones de concreto a reforzar, y junto a un sistema adhesivo epóxico especial, se

logra una total adherencia a la antigua superficie de concreto: el resultado es una capa externa de reforzamiento que ayuda a soportar las cargas del elemento y previene deflexiones excesivas. A este comportamiento se suma su rápida aplicación y bajo costo, obteniendo un sistema único basado en materiales de alta resistencia, con una relación rigidez/peso elevada y muy resistentes a ataques químicos.

Beneficios y Aplicaciones de los Sistemas FRP (Fiber Reinforced Polymer)

Los beneficios se pueden resumir en:

- Peso muy liviano (mínima carga muerta adicional)
- Alta durabilidad, anticorrosivo y bajo mantenimiento.
- Rápida instalación, con el consiguiente ahorro de dinero y tiempo de espera.
- Mínimo incremento de espesor en la geometría del elemento.
- Muy flexible, adaptable a todas las formas de los elementos

Sus aplicaciones más usuales vienen determinadas por:

- Cambios en el uso o cargas en las edificaciones.
- Defectos en el diseño o construcción.
- Cambios en las normas de diseño.
- Daños sísmicos.
- Deflexiones excesivas, etc.

Aplicaciones en vigas

Flores L. (2013). Al aplicarse en vigas, el sistema FRP incrementa sensitivamente la capacidad de resistencia a la flexión y al corte en estos elementos. La resistencia adicional es tal, que una viga agrietada por las cargas a las que ha sido sometida, reforzada de extremo a extremo posteriormente con este sistema, puede llegar a superar su capacidad de carga adicional.

Al aplicar este sistema en la cara del fondo de la viga, en su longitud, incrementamos su resistencia a la flexión, controlando mejor su deflexión, mientras que, si se aplica en las caras laterales, incrementamos su resistencia al corte.

2.2.11. REFORZAMIENTO DE ELEMENTOS SOMETIDOS A FLEXIÓN

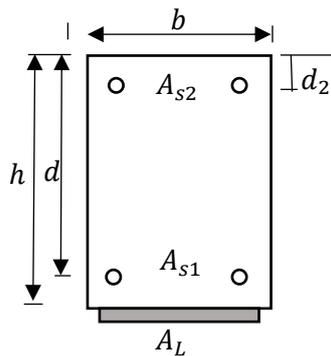
Rosero L. (2013). En el refuerzo de elementos sometidos a esfuerzos de flexión el diseñador debe entender el comportamiento de la sección reforzada, ya que no basta hacer las evaluaciones tradicionales en los límites asociados con la ruptura del concreto o fluencia del acero, sino que se debe considerar los posibles modos de falla relacionados a la adherencia del CFRP y los estados límite de todos los materiales.

El refuerzo con CFRP adherido a la cara tensionada de un elemento de hormigón armado, sometido a flexión, proporciona un incremento en su capacidad resistente; de acuerdo con los estudios y ensayos realizados por diversos autores, se consigue incrementos en la capacidad a flexión entre el 10% y el 160% y tomando en cuenta factores como la ductilidad se registran incrementos entre el 5% y el 40%.

2.2.11.1. ESQUEMA TÍPICO DE REFUERZO A FLEXIÓN USANDO CFRP

Rosero L. (2013). El CFRP es un material que tiene en la dirección en la que se encuentran orientadas las fibras, una alta resistencia a tracción, por lo que al momento de aplicarlo como refuerzo a flexión es importante aprovechar esta característica e instalarlo de tal manera que las fibras sean paralelas a los esfuerzos generados. Es decir, el CFRP en un refuerzo a flexión se coloca bajo los mismos principios que el acero de refuerzo, en las zonas donde existe tracción. Por ejemplo, en una viga simplemente apoyada sometida a una carga distribuida verticalmente hacia abajo, se sabe que la tracción se presenta en la cara inferior de la misma, por lo tanto, se coloca el acero en la cara inferior, de la misma manera si se requiere refuerzo adicional con CFRP, este se adhiere en la cara inferior de la viga para absorber el excedente de momento que el hormigón y el acero son incapaces de resistir.

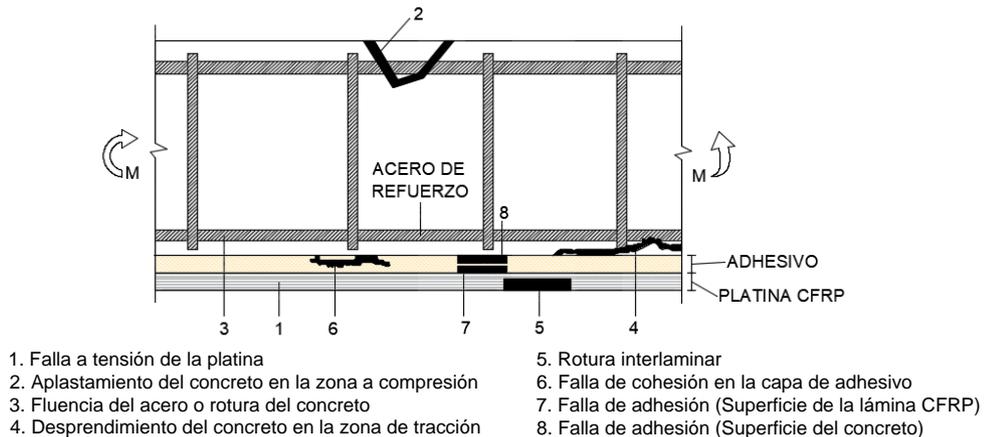
Figura 2.11. Esquema de refuerzo a flexión con CFRP en vigas de concreto armado.
(Adaptado de Rosero L. 2013)



2.2.12. TIPOS DE FALLAS DEL REFORZAMIENTO CON CFRP:

Beltrán A. (2011) menciona que un elemento reforzado con CFRP puede tener varios tipos de falla ya sea una falla que perjudique la capacidad de servicio del elemento y otra falla que sea súbita. A continuación, se presenta un esquema de las posibles fallas que se puedan generar en un elemento reforzado con CFRP.

Figura 2.12. Posibles tipos de fallas de un elemento reforzado con CFRP. (Adaptado de Beltrán A. 2011)



Los tipos de fallas que se describen a continuación, están descritos en la investigación de Beltrán A. (2011):

1. Falla a tensión de la platina: Ocurre cuando la platina o en su defecto la tela alcanza la resistencia a la tensión ($\sigma_{\text{tensión}} = \sigma_{\text{tensión última}}$).
2. Aplastamiento del concreto en la zona de compresión: Se produce cuando el concreto alcanza la máxima deformación a compresión ($\epsilon = 0.003$).
3. Fluencia del acero o rotura del acero: Se presenta cuando se alcanza la máxima deformación por fluencia o su máxima resistencia a la fatiga.
4. Desprendimiento del concreto en la zona de tracción y desprendimiento de la CFRP: Se presenta cuando existe un desplazamiento vertical en la parte inferior de la viga, que se origina por irregularidades en la superficie del concreto o por la inadecuada preparación de la superficie sobre la que se instala la CRFP. De igual manera, por el efecto de la fuerza cortante en las paredes de las fisuras que se encuentran en la viga lo que ocasiona una deflexión local en la CFRP. Lo anterior, indica que al sobrepasar el esfuerzo a tensión del concreto se produce una fisura horizontal en la CFRP que la podría desprender en toda su longitud. También se puede presentar desprendimiento en la zona donde más se concentra los esfuerzos a flexión, lo cual desprendería la fibra en esta zona (Lo anterior se conoce como delaminación). Por último, se puede desgarrar la fibra por efectos de anclaje.
5. Rotura interlaminar: Se presenta cuando la resistencia a cortante es Sobrepasada en la CFRP y esta falla a lo largo de las fibras.
6. Falla de cohesión por la capa de adhesivo: Se produce este tipo de falla cuando el esfuerzo a cortante es demasiado grande o en su defecto por la presencia de burbujas de aire entre la CFRP y el substrato de concreto lo que ocasionaría un desprendimiento o una deficiencia en el sistema estructural.

7. Falla de adhesión en la CFRP: Se puede presentar por la mala adherencia entre la capa de la CFRP y la superficie del concreto.
8. Falla de adhesión en la superficie de concreto: Se presenta por una preparación inadecuada de la superficie de concreto donde se adhiere la fibra.

2.2.13. APLICACIÓN DE FIBRA DE CARBONO EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

El Código que se utiliza como referencia para realizar este documento es el ACI 440.2R-17: Guía para el diseño y construcción de sistemas FRP externamente adherido para refuerzo de estructuras de concreto, publicado por el Instituto Americano del Concreto (ACI); el cual provee una guía para la selección, diseño e instalación de los sistemas FRP de adherencia externa para refuerzo de estructuras de concreto.

El ACI 440.2R-17 menciona que el polímero reforzadas con fibras de carbono (CFRP) surgieron como una alternativa a los materiales tradicionales para reparación y rehabilitación como placas de acero adheridas externamente, postensado externo, aumento de la sección del elemento estructural y confinamiento con placas de acero.

Así mismo, este material tiene ciertas ventajas sobre los otros debido a su alto módulo de elasticidad, su relativo poco espesor, que lo hace a menudo deseable cuando la estética y acceso son consideraciones importantes, también puede ser colocado en lugares donde las técnicas tradicionales son más difíciles de aplicar.

Los ítems 2.2.13.1 - 2.2.13.10 que se presentan a continuación, han sido extraídos de la investigación realizada por Ibáñez C. (2013), los cuales hacen referencia a la Norma ACI 440.2R-17:

2.2.13.1. Consideraciones

El refuerzo con sistemas FRP es bastante efectivo para refuerzos de elementos a flexión y corte. También provee confinamiento adicional, sin embargo, para otros tipos de fallas como corte por punzonamiento y capacidad de soporte de zapatas este sistema no es adecuado.

Los sistemas CFRP pueden ser utilizados para rehabilitar o restaurar la resistencia de un elemento estructural, adaptar o reforzar por completo un elemento estructural para resistir incrementos de cargas debido a cambios de uso de la estructura, o correcciones de errores de diseño o errores de construcción.

Para evaluar el sistema CFRP a utilizar se deben hacer varias pruebas para asegurarse que la estructura donde se pretende utilizar cumple con los requisitos necesarios, como mínimo se debe evaluar lo siguiente de una estructura de concreto:

- Dimensiones existentes del elemento estructural.
- Ubicación, tamaño y causa de fisuras y astillas, fisuras mayores a 0,3 milímetros de ancho deben ser inyectadas con epóxico ya que pueden afectar el desempeño del sistema CFRP.
- Ubicación y cantidad de corrosión en el acero de refuerzo, el cual debe ser reparado antes de aplicar el sistema CFRP.
- Presencia de corrosión activa, ya que este sistema no detiene la corrosión.
- Cantidad y ubicación de acero de refuerzo existente.
- Resistencia a compresión del concreto del elemento estructural in situ, el f'_c debe ser mayor de 17,5 mega pascales (2 500 libras sobre pulgada cuadrada).
- Integridad del concreto, especialmente del concreto de recubrimiento, en todas las áreas donde el sistema FRP será adherido al concreto.
- Ambiente al que será expuesto, temperatura ambiente, exposición al fuego, protección contra vandalismo.

2.2.13.2. Filosofía de diseño

La filosofía de diseño de sistemas CFRP indica que la pérdida de refuerzo CFRP no debe causar la falla del elemento estructural bajo la carga de servicio. Para lograr esto las recomendaciones de diseño se basan en principios de estados límites. Esto establece niveles de seguridad aceptables para la ocurrencia de estados límites de servicio (deflexión excesiva y fisuras) y de estados últimos (falla y fatiga) teniendo que evaluar siempre la resistencia del elemento, posibles modos de falla y los esfuerzos en los materiales. Estos sistemas deben ser diseñados de acuerdo a los requerimientos de resistencia y servicio utilizando factores de carga y esfuerzo del código ACI 318-08 y factores adicionales que reflejan la incertidumbre inherente de los sistemas CFRP comparados con el acero de refuerzo.

Estos límites son puestos para prevenir el colapso de la estructura si el sistema CFRP falla debido a daño por cualquier causa. La premisa básica para su utilización dice que el elemento estructural no reforzado con CFRP debe tener la suficiente resistencia para cierto nivel de carga. En el caso que el sistema CFRP fuera dañado, la estructura será capaz de resistir un nivel de carga razonable sin colapsar.

La resistencia existente de la estructura debe ser suficiente para resistir la carga descrita en la ecuación:

$$\phi R_n \geq 1.1S_{DL} + 0.75S_{LL}$$

Donde:

R_n = Resistencia nominal existente del elemento estructura.

S_{DL} = Efectos de carga muerta nueva.

S_{LL} = Efectos de carga viva nueva.

Esta condición mínima permitirá al elemento estructural mantener la suficiente capacidad estructural hasta que el refuerzo CFRP sea reparado.

2.2.13.3. Refuerzo a flexión

El refuerzo a flexión de CFRP se debe adherir en la cara a tensión del elemento estructural de concreto con las fibras orientadas a lo largo del elemento, esto provee un incremento en la resistencia a flexión. Tomando en cuenta los límites anteriormente descritos el aumento de resistencia es un 40 por ciento.

El diseño del refuerzo a flexión requiere que se cumpla la siguiente ecuación $\phi Mn \geq Mu$ donde ϕMn se refiere al esfuerzo nominal del elemento multiplicado por un factor de reducción ϕ , y Mu se refiere al momento calculado con las cargas factoradas como momentos de carga viva más carga muerta, calculados utilizando factores de reducción de carga del código ACI 318-08. Adicionalmente se utiliza otro factor de reducción, Ψ_f , el cual debe ser aplicado al refuerzo CFRP para mejorar la confiabilidad de la predicción del refuerzo considerando los diferentes tipo de falla observados para el refuerzo con CFRP.

2.2.13.4. Propiedades de los materiales

Las propiedades del material de refuerzo CFRP utilizadas son las reportadas por el fabricante, sabiendo que no toman en cuenta exposición prolongada a diferentes condiciones ambientales a las que se expone el refuerzo CFRP, que pueden reducir las propiedades a tensión y el flujo plástico y resistencia a fatiga de los materiales CFRP, por lo que las propiedades de los materiales deben ser reducidas con base en el tipo de exposición del ambiente para ser utilizados como condiciones iniciales.

Las siguientes ecuaciones deben ser utilizadas para calcular las propiedades de los materiales junto con los factores de la tabla anterior según el tipo de fibra el tipo y de exposición ambiental.

- Resistencia última de diseño a tensión:

$$f_{fu} = C_E * f_{fu}^* \quad (2.39)$$

Donde:

f_{fu} = Resistencia ultima de diseño a tensión.

C_E = Coeficiente de reducción ambiental.

f_{fu}^* = Resistencia ultima del material CFRP según fabricante.

- Deformación Unitaria de ruptura de diseño:

$$\varepsilon_{fu} = C_E * \varepsilon_{fu}^* \quad (2.40)$$

Donde:

ε_{fu} = Deformación de ruptura de diseño del refuerzo CFRP

C_E = Coeficiente de reducción ambiental

ε_{fu}^* = Deformación ultima de ruptura del refuerzo

Debido a la elasticidad lineal los materiales CFRP hasta la falla, el módulo de elasticidad de diseño para refuerzo CFRP unidireccional puede ser determinado por la ley de Hook, ya que no es afectado por las condiciones ambientales de exposición, por lo que será el mismo que da el fabricante. La ecuación que lo define es:

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (2.41)$$

Donde:

E_f = Módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP.

f_{fu} = Resistencia ultima de diseño a tensión.

ε_{fu} = Deformación de ruptura de diseño del refuerzo CFRP.

Tabla 2.3. Factores de reducción ambiental para diferentes sistemas de FRP y condiciones de exposición. (Adaptado de ACI.2R.17)

Condición de Exposición	Tipo de Fibra y resina	Factor de reducción ambiental, C_E
Exposición Interior	Carbono / Epóxico	0.95
	Vidrio / Epóxico	0.75
	Aramida / Epóxico	0.85
Exposición Exterior (puentes, muelles y aparcamientos no cerrados)	Carbono / Epóxico	0.85
	Vidrio / Epóxico	0.65
	Aramida / Epóxico	0.75
Ambientes agresivos (plantas químicas y plantas para el tratamiento residual)	Carbono / Epóxico	0.85
	Vidrio / Epóxico	0.50
	Aramida / Epóxico	0.70

2.2.13.5. Modos de falla del refuerzo

Debido a que la resistencia a flexión de una sección depende del control del modo de falla, es importante saber cómo puede fallar el refuerzo FRP, a continuación, se enumera cada uno:

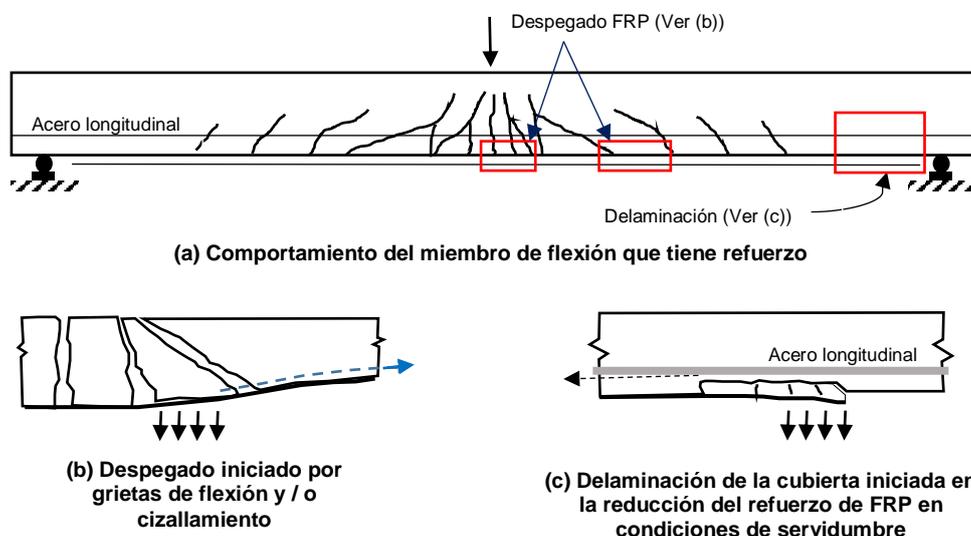
- ✓ Aplastamiento del concreto en compresión antes de que fluya el acero de refuerzo.
- ✓ Fluencia del acero en tensión seguido de la ruptura de la platina de refuerzo FRP.
- ✓ Fluencia del acero en tensión seguido por aplastamiento del concreto.
- ✓ Delaminación del recubrimiento de concreto debido a corte o tensión.
- ✓ Pérdida de adherencia del refuerzo FRP con el substrato del concreto.

Se asume que el aplastamiento del concreto ocurre si la deformación a compresión en el concreto alcanza su mínima deformación utilizable ($\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 0.003$). Se asume que la rotura de la lámina FRP ocurre si la deformación en el FRP alcanza su deformación de rotura de diseño ($\epsilon_f = \epsilon_{fu}$) antes de que el concreto alcance su mínima deformación utilizable.

La delaminación del recubrimiento puede ocurrir si la fuerza del CFRP no puede ser soportada por el concreto. Este comportamiento también se conoce como pérdida de adherencia, sin tener en cuenta el plano donde la falla se propaga en la región CFRP-adhesivo-substrato, según se ve en la figura 2.11.

Lejos de la sección donde el refuerzo CFRP externamente adherido termina, el modo de falla gobernante debe ser pérdida de adherencia, figura 2.11. (b).

Figura 2.13. Pérdida de adherencia y delaminación. (Adaptado de ACI.2R.17)



Para prevenir el desprendimiento de la lámina FRP debe tenerse en cuenta una limitación en el nivel de deformación desarrollado en la lámina. La ecuación (4.29) suministra una expresión para un coeficiente dependiente de adherencia, κ_m .

$$\kappa_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360000} \right) \leq 0.90 & nE_f t_f \leq 180000 \text{ N/mm} \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90000}{nE_f t_f} \right) \leq 0.90 & nE_f t_f > 180000 \text{ N/mm} \end{cases} \quad (2.42)$$

Donde:

κ_m = Coeficiente dependiente de adherencia.

ε_{fu} = Deformación de ruptura de diseño del refuerzo CFRP.

n = Número de capas del refuerzo CFRP.

E_f = Módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP.

t_f = Espesor nominal de una capa de refuerzo CFRP.

El término κ_m , es un factor no mayor a 0.90 que puede ser multiplicado por la deformación a rotura de la lámina FRP para llegar a una limitación en la deformación con el fin de prevenir el desprendimiento. El número de capas, n , usadas en la ecuación es el número de capas de refuerzo a flexión FRP colocadas a lo largo del elemento donde está siendo calculado el momento resistente. Esta expresión reconoce que las láminas con mayor rigidez son más propensas a la delaminación. De esta manera, a medida que la rigidez de la lámina se incrementa, la limitación a la deformación se hace más severa.

2.2.13.6. Nivel Efectivo de deformación en el Refuerzo FRP

Es importante determinar el nivel de la deformación unitaria del refuerzo CFRP en su estado el límite último. Debido a que la deformación del material CFRP es lineal elástico hasta su falla, el grado de deformación unitaria en el refuerzo CFRP determina el nivel de esfuerzo que puede desarrollar el refuerzo CFRP. La deformación unitaria máxima que logrará el refuerzo CFRP es determinada, ya sea por el grado de deformación del refuerzo CFRP al momento que el concreto falle por aplastamiento, el punto donde el refuerzo CFRP se rompa o el punto donde el refuerzo CFRP pierde adherencia con el concreto.

La deformación efectiva del refuerzo CFRP en su estado límite último se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_u \frac{h-c}{c} - \varepsilon_{bi} \leq \kappa_m \varepsilon_{fu} \quad (2.43)$$

$$\varepsilon_u = 0.003$$

Donde:

ε_{fe} = Deformación efectiva del refuerzo CFRP alcanzada en la falla.

ε_u = Deformación unitaria del concreto.

h = Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión.

c = Distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro.

ε_{bi} = Deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP.

κ_m = Coeficiente dependiente de adherencia.

ε_{fu} = Deformación de ruptura de diseño del refuerzo CFRP.

La deformación máxima que puede tener el refuerzo CFRP, antes que la sección falle por flexión se obtiene por la siguiente ecuación:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (2.44)$$

Donde:

f_{fe} = Esfuerzo efectivo en el refuerzo CFRP alcanzado en la sección al momento de la falla.

E_f = Módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP.

ε_{fe} = Def. efectiva en el refuerzo CFRP alcanzado al momento de falla.

2.2.13.7. Ductilidad

Hay que recordar que el uso de refuerzo CFRP externamente adherido para refuerzo a flexión reduce la ductilidad original del elemento estructural, lo cual puede ser ignorado en algunos casos. Sin embargo, en casos que la pérdida de ductilidad sea considerable ésta debe ser considerada.

Para elementos de concreto reforzado una ductilidad adecuada es alcanzada si la deformación unitaria del acero en el punto que el concreto falla por aplastamiento, o falla el refuerzo CFRP, incluyendo delaminación o pérdida de adherencia, es por lo menos 0,005 según la definición de una sección controlada por tensión de acuerdo al ACI 318, pues se basa en esa filosofía, por lo que se debe utilizar el factor de reducción ϕ que se define en la siguiente ecuación:

$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{para } \varepsilon_t \geq 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0.005 \\ 0.65 & \text{para } \varepsilon_t < \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (2.45)$$

Donde:

ϕ = Factor de reducción de resistencia según ACI 318.

ε_t = Deformación unitaria del acero en tensión.

ε_{sy} = Deformación unitaria del acero correspondiente al punto de fluencia.

Esta ecuación fija el factor de reducción en 0,90 para secciones dúctiles, 0,65 para secciones frágiles donde el acero no fluye y provee una transición lineal para el factor de reducción entre los dos extremos.

2.2.13.8. Capacidad de Servicio

Para evitar deformaciones inelásticas en el concreto reforzado con refuerzo externo CFRP, se debe evitar que el acero interno de refuerzo fluya bajo las cargas de servicio, especialmente en elementos expuestos a cargas cíclicas. El esfuerzo en el acero debe ser limitado al 80 por ciento de su resistencia a la fluencia según la ecuación:

$$f_{s,s} \leq 0.80 f_y \quad (2.46)$$

Donde:

$f_{s,s}$ = Esfuerzo en acero de refuerzo con cargas de servicio.

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo.

Y el esfuerzo a compresión del concreto debe estar limitado al 45 por ciento de su resistencia a la compresión según la ecuación:

$$f_{c,s} \leq 0.45 f'_c \quad (2.47)$$

Donde:

$f_{c,s}$ = Esfuerzo de compresión del concreto en condición de servicio.

f'_c = Resistencia a compresión del concreto.

Este tipo de material está sujeto a falla por flujo plástico, por lo que se debe revisar el nivel de esfuerzos en el refuerzo CFRP cuando está sujeto a esfuerzos constantes o bajo esfuerzos cíclicos. Según investigaciones se ha determinado que la fibra de carbono resiste aproximadamente 0,9 veces su resistencia última antes tener un problema de falla por flujo plástico.

2.2.13.9. Límites de esfuerzo de rotura por fluencia plástica y fatiga

Los esfuerzos de rotura por fluencia plástica o fatiga del elemento reforzado con CFRP deben ser verificados; ya que los niveles de esfuerzo están dentro de un rango de respuesta elástica dentro del elemento, los esfuerzos pueden ser calculados mediante un análisis elástico.

2.2.13.10. Límites de esfuerzos de rotura por fluencia plástica

Para evitar la falla de un elemento reforzado con CFRP por fluencia plástica del mismo reforzamiento, los límites de esfuerzo deben ser impuestos al refuerzo en fibra de carbono.

Según investigaciones, la fibra de vidrio, la aramida y la fibra de carbono pueden soportar 0.30, 0.47 y 0.91 veces sus resistencias últimas, antes de que fallen por fluencia plástica; el anterior esfuerzo debe estar limitado según la siguiente ecuación para mantener un nivel de seguridad

$$F_{f,s} \geq f_{f,s} \quad (2.48)$$

Donde:

$F_{f,s}$ = Esfuerzo límite de rotura por fluencia plástica.

$f_{f,s}$ = Esfuerzo en la CFRP.

Tabla 2.4. *Momento sostenido más esfuerzos límites de cargas cíclicas de servicio. (Adaptado de ACI.2R.17)*

Tipo de esfuerzo	CFRP
Momento sostenido más límite de esfuerzo cíclico	$0.55f_{fu}$

Donde:

f_{fu} = Esfuerzo de diseño ultimo a tensión del refuerzo CFRP.

2.2.14. APLICACIÓN DE LA NORMATIVA ACI 440.2R-17 EN UNA SECCIÓN RECTANGULAR REFORZADA A FLEXIÓN

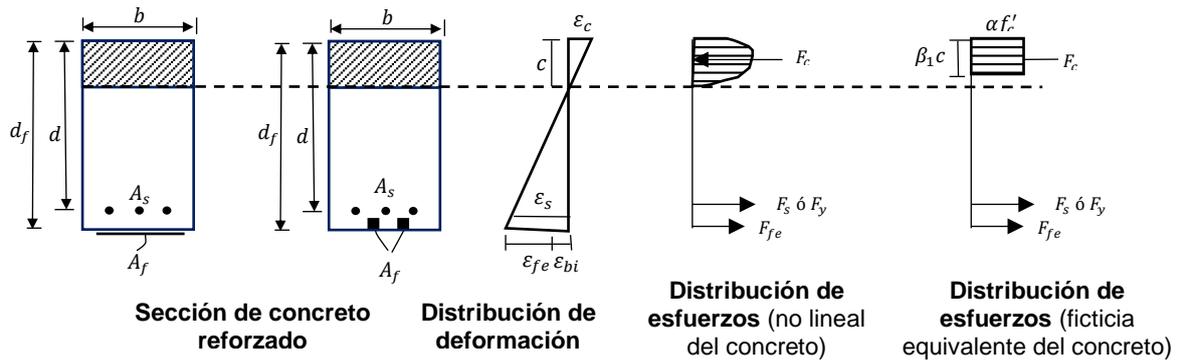
Los ítems 2.2.14.1 - 2.2.14.6 que se presentan a continuación, han sido tomados de la investigación realizada por Ibáñez C. (2013), los cuales hacen referencia a las consideraciones de la Norma ACI 440.2R-17, para el reforzamiento estructural a flexión:

2.2.14.1. RESISTENCIA ÚLTIMA.

El procedimiento de cálculo utilizado para llegar a la resistencia última debe satisfacer la compatibilidad de deformación y el equilibrio de fuerzas y debe considerar el modo de falla que gobierna, muchos procedimientos de cálculo pueden derivarse para satisfacer estas condiciones, el procedimiento de cálculo que se presenta el método de prueba y error.

En la siguiente figura mostrada se presenta la deformación interna y la distribución de esfuerzos para una sección rectangular bajo flexión en el estado limite último.

Figura 2.14. Distribución de esfuerzos y para la sección rectangular. (Adaptado de ACI.2R.17)



El procedimiento del método de prueba y error se aplica para la sección rectangular, que se asumirá una profundidad para el eje neutro “c”; calculando el nivel de deformación en cada material utilizando compatibilidad de deformación; calculando el nivel de esfuerzo asociado en cada material; y verificando el equilibrio de fuerzas internas. Si las fuerzas internas resultantes no se equilibran, la profundidad del eje neutro debe ser refinada y el procedimiento repetido.

2.2.14.2. CÁLCULO DEFORMACIÓN UNITARIA DEL FRP Y ACERO:

Para cualquier profundidad asumida del eje neutro, c ; el nivel de deformación en el refuerzo FRP puede ser calculado con la siguiente ecuación ya antes estudiado y re-escrita a continuación por conveniencia. Esta ecuación considera el modo de falla que gobierna para la profundidad del eje neutro asumida.

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{h - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq k_m \epsilon_{fu} \quad (2.49)$$

Donde:

ϵ_{fe} = Deformación efectiva del refuerzo CFRP alcanzada en la falla.

ϵ_{cu} = Deformación unitaria del concreto.

h = Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión.

c = Distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro.

ϵ_{bi} = Deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP.

κ_m = Coeficiente dependiente de adherencia.

ϵ_{fu} = Deformación de ruptura de diseño del refuerzo CFRP.

Si el primer término de la ecuación prevalece tiene como consecuencia que el aplastamiento del concreto controla la falla a flexión de la sección. Pero si el segundo término es el que prevalece, la falla en el CFRP sea rotura o desprendimiento, controla la falla a flexión de la sección.

Ya determinado el nivel de deformación del CFRP, el nivel de deformación del acero no pre-esforzado, se puede calcular basándonos en el concepto de compatibilidad de deformación.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{h - c} \right) \quad (2.50)$$

Verificación:

$$\varepsilon_s > 0.005$$

Donde:

ε_s = Deformación del acero de refuerzo CFRP.

ε_{fe} = Deformación efectiva del refuerzo CFRP.

ε_{bi} = Deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP.

h = Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión.

d = Distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo CFRP.

c = Distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro.

2.2.14.3. CÁLCULO DEL ESFUERZO EFECTIVO DEL FRP Y ACERO:

Ya habiendo calculado su nivel de deformación, el nivel de esfuerzo efectivo en el refuerzo FRP puede ser encontrado a partir del nivel de deformación en el FRP, asumiendo un perfecto comportamiento elástico.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (2.51)$$

Donde:

f_{fe} = Esfuerzo efectivo del refuerzo CFRP en la sección de falla.

E_f = Módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP.

ε_{fe} = Deformación efectiva del refuerzo CFRP.

Al igual también podremos encontrar el esfuerzo en el acero asumiendo un comportamiento elasto-plástico y a la vez debe de cumplir que este valor debe ser inferior o igual al esfuerzo de fluencia del acero.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (2.52)$$

Donde:

f_s = Esfuerzo del acero de refuerzo.

E_s = Módulo de elasticidad a tensión del acero de refuerzo.

ε_s = Deformación del acero de refuerzo.

f_y = Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo.

2.2.14.4. VERIFICACIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD

Con los niveles de deformación y esfuerzos en el refuerzo de CFRP y del acero determinados por la profundidad del eje neutro asumida, el equilibrio de las fuerzas internas puede ser verificado con la siguiente ecuación.

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f'c \beta_1 b} \quad (2.53)$$

Donde:

c = Distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro.

A_s = Área de acero de refuerzo.

f_s = Esfuerzo del acero de refuerzo.

A_f = Área de refuerzo CFRP.

A_f = Esfuerzo efectivo del refuerzo CFRP en la sección de falla.

γ = Factor del $f'c$ para calcular intensidad del rectángulo equivalente de esfuerzos de concreto.

$f'c$ = Resistencia a compresión del concreto.

β_1 = Proporción entre la profundidad del bloque rectangular equivalente de esfuerzos y la profundidad del eje neutro.

b = Ancho de la cara a compresión del elemento.

Los términos γ y β_1 en la ecuación mostrada, son parámetros que definen un bloque de esfuerzo rectangular en el concreto equivalente a la distribución real no lineal de esfuerzos. Si el aplastamiento del concreto es el modo de falla que controla (antes o después de la fluencia del acero), γ y β_1 pueden ser tomados como los valores asociados con el bloque de esfuerzos de Whitney ($\gamma = 0.85$ y β_1 según la Sección 10.2.7.3 de ACI 318).

La profundidad del eje neutro se encuentra al satisfacer de manera simultánea las cinco ecuaciones anteriores, esto establece un equilibrio interno de fuerzas y una compatibilidad de deformaciones unitarias. Para resolver la profundidad asumida del eje neutro, c , debe de coincidir con la profundidad del eje neutro calculada. Si coinciden los dos valores del eje neutro la profundidad correcta ha sido alcanzada, si no coinciden se asume otro valor de profundidad de eje neutro y se repiten estos pasos hasta que el valor de la profundidad de eje neutro asumida coincida con la profundidad del eje neutro calculada.

Una vez encontrado la profundidad del eje neutro, c , se procede a calcular la resistencia nominal a flexión de la sección reforzada externamente con CFRP utilizando la ecuación:

Momento nominal resistente por parte del acero:

$$M_{ns} = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2.54)$$

Momento nominal resistente por parte del FRP:

$$M_{nf} = A_f f_{fc} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2.55)$$

Momento nominal resistente del sistema FRP:

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + \Psi_f M_{nf}] \quad (2.56)$$

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \Psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2.57)$$

Donde:

M_n = Resistencia nominal a flexión.

A_s = Área de acero de refuerzo.

f_s = Esfuerzo del acero de refuerzo.

d = Distancia desde la fibra extrema a compresión hacia el centroide del refuerzo a tensión.

c = Distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro.

β_1 = Proporción entre la profundidad del bloque rectangular equivalente.

Ψ_f = Factor de reducción de resistencia del refuerzo CFRP para flexión.

A_f = Área del refuerzo CFRP.

f_{fe} = Esfuerzo efectivo del refuerzo CFRP en la sección de falla.

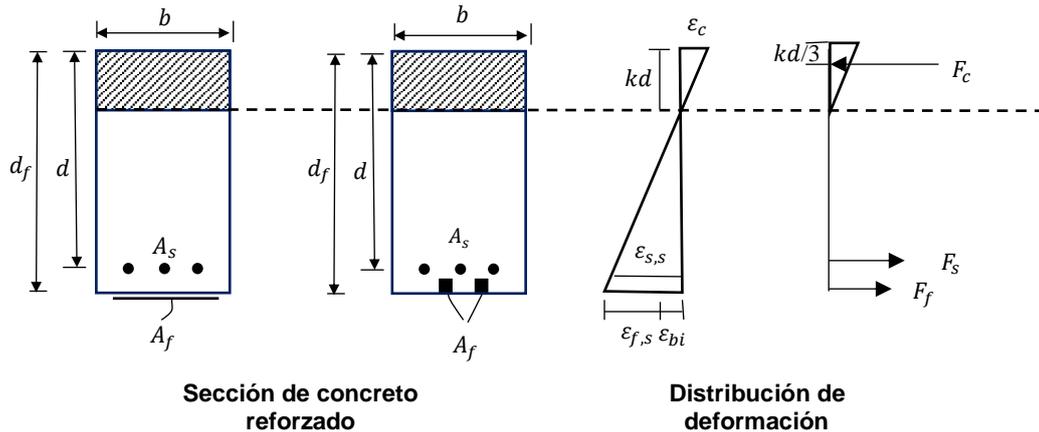
h = Altura del elemento.

Un factor de reducción adicional Ψ_f , es aplicado a la contribución de la resistencia a flexión del refuerzo FRP. Se recomienda un factor $\Psi_f = 0.85$. Este factor se aplica para reflejar incertezas inherentes en los sistemas CFRP comparados con el acero de refuerzo y el concreto preesforzado. Este factor fue calculado en base a evaluaciones estadísticas de variabilidad en las propiedades mecánicas, predicciones en ensayos a escala natural y aplicaciones en campo.

2.2.14.5. ESFUERZO EN EL ACERO BAJO CARGAS DE SERVICIO:

El nivel de esfuerzo en el refuerzo de acero puede ser calculado con base en un análisis elástico fisurado de la sección de concreto reforzado con refuerzo CFRP.

Figura 2.15. Esfuerzos y deformaciones de la sección con CFRP. (Adaptado de ACI.2R.17)



$$f_f = E_f \varepsilon_f$$

$$f_s = E_s \varepsilon_s$$

$$c = k_d$$

$$\frac{\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}}{h - k_d} = \frac{\varepsilon_s}{d - k_d}$$

$$\varepsilon_f + \varepsilon_{bi} = \frac{\varepsilon_s}{d - k_d} (h - k_d)$$

Tomando momentos en el punto que actúa la fuerza a compresión se debe de considerar un momento de servicio y el momento que proporciona la fibra se tiene la siguiente ecuación:

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{\left[A_s E_s \left(h - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(h - kd \right) \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right]} \quad (2.58)$$

Donde:

$f_{s,s}$ = Esfuerzo en el acero de refuerzo bajo cargas de servicio.

M_s = Momento de servicio de la sección.

ε_{bi} = Deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP.

A_f = Área de refuerzo CFRP.

E_f = Módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP.

h = Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión.

k = Proporción entre la profundidad del eje neutro y de la profundidad del refuerzo medido desde la fibra extrema a compresión.

d = Distancia desde la fibra extrema a compresión hacia el centroide del refuerzo a tensión.

E_s = Módulo de elasticidad del acero de refuerzo.

A_s = Área de acero de refuerzo.

El esfuerzo del acero bajo cargas de servicio calculado en la anterior ecuación debe compararse con los límites de Capacidad de Servicio.

$$f_s \leq 0.80 f_y \quad (2.59)$$

Cálculo del esfuerzo en CFRP debido a cargas de servicio. Este esfuerzo se calcula utilizando la ecuación:

$$f_{f,s} = f_{s,s} * \left(\frac{E_f}{E_s}\right) \left(\frac{h - kd}{d - kd}\right) - \varepsilon_{bi} E_f \quad (2.60)$$

Donde:

$f_{f,s}$ = Esfuerzo en el refuerzo CFRP dentro del rango elástico.

$f_{s,s}$ = Esfuerzo en el acero de refuerzo bajo cargas de servicio.

E_f = Módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP.

E_s = Módulo de elasticidad del acero de refuerzo.

h = Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión.

k = Proporción entre la profundidad del eje neutro y de la profundidad del refuerzo medido desde la fibra extrema a compresión.

d = Distancia desde la fibra extrema a compresión hacia el centroide del refuerzo a tensión.

ε_{bi} = Deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP.

Esta ecuación da el esfuerzo en el refuerzo CFRP bajo un momento aplicado dentro del rango de respuesta elástica del elemento estructural. Este esfuerzo debe cumplir con el límite impuesto por la ecuación:

$$f_{f,s} < \text{Momento sostenido más esfuerzo límite cíclico}$$

Donde:

$f_{f,s}$ = Esfuerzo en el refuerzo CFRP dentro del rango elástico

Este método es el que describe el código ACI 440.2R-17 para diseño con refuerzo CFRP, el cual se utilizará más adelante en esta investigación.

2.2.14.6. Longitud de desarrollo

Rosero L. (2013) señala que en muchas pruebas de laboratorio muestran que los elementos reforzados a flexión con Sika CarboDur, fallan por despegue de la lámina en zonas cercanas al final del refuerzo, por lo que es necesario tener una cierta longitud de adherencia para asegurar que la lámina no se despegue.

De acuerdo al ACI.2R.17, la longitud de anclaje debe exceder el valor dado por la siguiente expresión:

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n * E_f * t_f}{\sqrt{f'c}}} \quad (2.61)$$

Donde:

l_{df} = Longitud de anclaje.

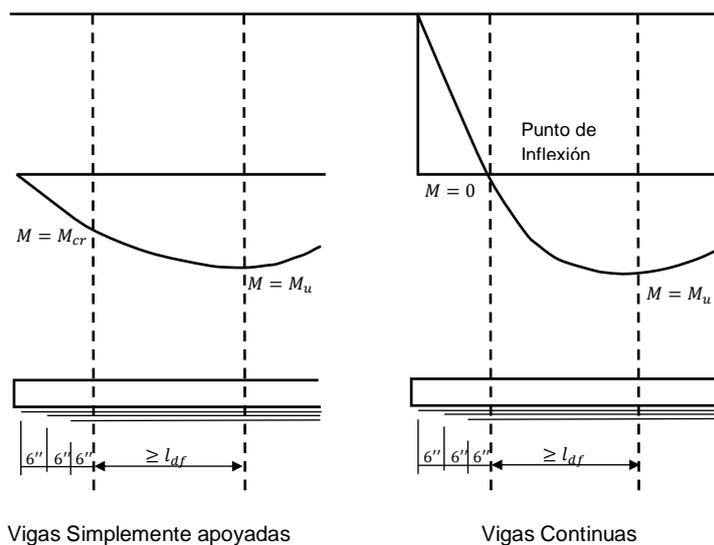
n = Número de capas del refuerzo CFRP.

E_f = Módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP.

t_f = Espesor nominal de una capa de refuerzo CFRP.

$f'c$ = Resistencia a compresión del concreto.

Figura 2.16. Longitud de anclaje. (Adaptado de ACI.2R.17)



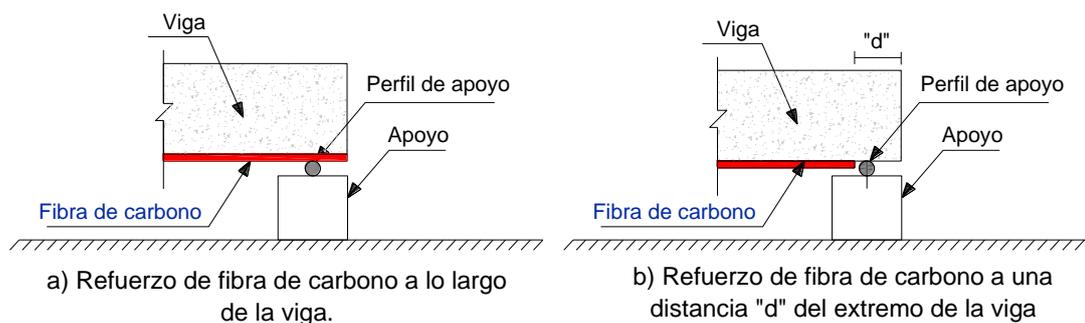
Rosero L. (2013). Para vigas continuas, el Sika CarboDur debe terminar en el punto de inflexión donde los esfuerzos son mínimos y para vigas simplemente apoyadas, las platinas y tejidos de Sika CarboDur deben extenderse a lo largo de toda la luz para terminar tan cerca a los apoyos como sea posible.

2.2.15. EFECTO DE LA FIBRA DE CARBONO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO

González, O.; et al. (2002), realizaron el estudio de este tema para lo cual ensayaron vigas de concreto armado simplemente apoyadas y sub-ensamblajes viga- columna reforzadas con fibras de carbono.

En las vigas simplemente apoyadas reforzadas con fibras de carbono consideraron dos tipos: la primera en la que el refuerzo estaba a lo largo de la viga y la segunda cuando el refuerzo se encontraba a una cierta distancia "d" del extremo de la viga, como se muestra en la Figura 2.17.

Figura 2.17. Detalle de apoyo en los elementos reforzados con Fibra de carbono (Adaptado de González, O.; et al., 2002)



De los ensayos realizados a las vigas simplemente apoyadas dieron como resultado que:

El principal efecto del anclaje mecánico es el mecanismo de falla, ya que en los elementos en los que se proporcionó dicho anclaje, el mecanismo de falla fue por ruptura de la fibra de carbono, mientras que en los elementos a los que no se les proporcionó el anclaje mecánico, exhibió una falla por adherencia de la fibra de carbono.

Además, mencionan que se presenta una disminución considerable de la capacidad de deformación del elemento, con el refuerzo con fibra de carbono esta disminución está acompañada de un mecanismo de falla frágil y explosivo, no obstante, hace que el acero de refuerzo fluya. Observaron además un cambio en los patrones de agrietamiento para los elementos con refuerzo de fibra de carbono, ya que en dichos elementos se generaron grietas por cortante debidos a un aumento en los esfuerzos cortantes en el elemento, producidos por el alto valor de la fuerza horizontal que se genera en la fibra.

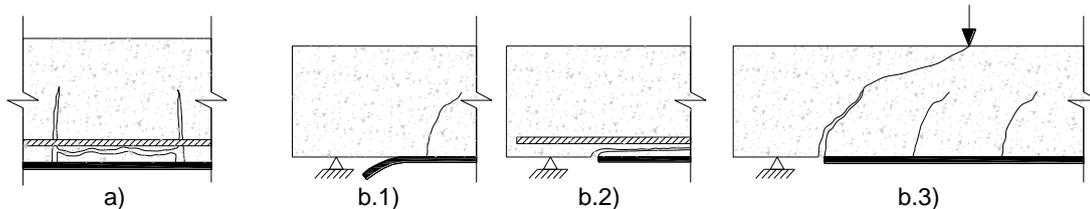
Por otro lado, en los ensayos de sub-ensamblajes viga- columna reforzadas dieron como resultado un mecanismo de falla similar a las vigas simplemente apoyadas reforzadas a una distancia "d", es decir que presentaron una falla por adherencia de la fibra de carbono.

Finalmente, los autores concluyeron que: el uso de la fibra de carbono permite incrementar la resistencia a flexión de secciones de concreto reforzado, siempre y cuando se asegure que la fibra desarrolle toda su capacidad, para lo cual es necesario colocar algún dispositivo de anclaje en la sección de la unión viga –columna. Así mismo señalan que la disminución de la capacidad de deformación en los elementos reforzados con fibra de carbono puede tener un alto impacto en la capacidad de deformación global de la estructura lo cual puede influir de manera decisiva en la estimación de las fuerzas sísmicas a las que puede verse sujeta durante eventos sísmicos intensos.

2.2.16. DESPRENDIMIENTO PREMATURO DE LA LÁMINAS DE FIBRAS DE CARBONO

Oller, E.; et al. (2013), El refuerzo a flexión mediante la adhesión de laminados de polímeros reforzados con fibras presenta como principal desventaja, el desprendimiento prematuro del refuerzo debido a la presencia de fisuras intermedias o a la concentración de tensiones en el extremo del laminado (Figura 2.18). Esta rotura prematura suele producirse en el concreto, por ser el material más débil a tracción de la interfase concreto-adhesivo-laminado.

Figura 2.18. Desprendimiento prematuro del laminado CFRP (Adaptado de Oller, E., Marí, A., Bellido, L. 2013)



a) Debido a fisuración intermedia, b) en el extremo del laminado (b.1 arrancando fina capa recubrimiento, b.2 arrancando recubrimiento hasta armadura pasiva, b.3 formando fisura de cortante).

El modo de rotura prematuro más habitual es el debido a la presencia de fisuras intermedias de flexión y/o cortante a lo largo de la luz. El aumento de la sollicitación, una vez fisurada la pieza, lleva a la aparición de microfisuras en la interfase laminado-concreto, y al conectarse éstas, se forma una fisura a lo largo de la misma que finalmente conduce al desprendimiento del refuerzo. Este desprendimiento se suele iniciar en las zonas más solicitadas de la pieza y se transmite de forma brusca y repentina hacia el extremo del laminado.

El desprendimiento del extremo del laminado se debe a la concentración de tensiones generadas por la discontinuidad producida por la presencia del refuerzo, y depende básicamente de la longitud y rigidez del mismo. En función de las características de la viga y del refuerzo, la fisura se propaga bien a lo largo de la interfase más cercana al laminado arrancando una fina capa del hormigón del recubrimiento, bien a lo largo de la armadura pasiva traccionada, o bien formando una fisura de cortante desde el extremo del laminado (Figura 1). Este modo de rotura no debe aparecer si el laminado se encuentra suficientemente anclado extendiéndose hacia la zona de apoyos o mediante la aplicación de sistemas mecánicos.

El dimensionamiento del laminado FRP como refuerzo a flexión se debe realizar teniendo en cuenta el posible desprendimiento prematuro del mismo. Por lo cual se empezaron a desarrollar modelos y formulaciones teóricas. Sin embargo, el avance en

el estudio de este modo de rotura prematuro ha mostrado que dicho fallo se puede explicar mediante mecánica de fractura no lineal.

La mayor parte de modelos que tratan de evitar el desprendimiento prematuro del laminado debido al efecto de fisuración intermedia se basan en la limitación de la deformación o tensión del laminado o del incremento de tracción entre dos fisuras consecutivas, y son pocos los métodos que limitan los esfuerzos actuantes, procedimiento más intuitivo desde el punto de vista del proyectista.

Por ello, Oller, E.; et al. (2013), presentaron un método de dimensionamiento del refuerzo que evita el desprendimiento del laminado basado en un diagrama de interacción cortante-flector asociado a la fuerza máxima que se puede transmitir entre fisuras consecutivas. La limitación del esfuerzo rasante entre laminado y soporte resulta esencial puesto que el desprendimiento del refuerzo está ligado a la formación de una fisura en la interfase cuando se alcanza el rasante último. Normalmente, este fallo suele ocurrir cuando ha plastificado la armadura en la fisura más solicitada.

2.2.17. ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A FLEXIÓN:

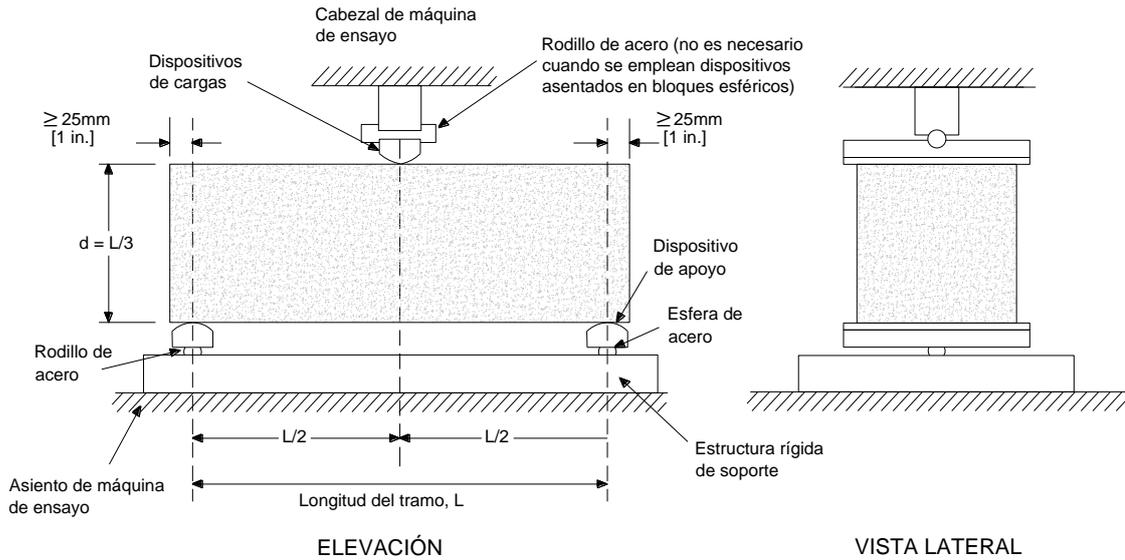
La norma NTP 339.079 (2012), describe el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas en el centro del tramo, el cual consiste en aplicar una carga en el centro de la luz de la viga hasta que ocurra su falla para determinar la resistencia a la flexión y la deformación de cada viga, de acuerdo al rango de velocidades que estipula esta norma.

Para realizar el ensayo a flexión de las vigas de concreto armado, la NTP 339.079 indica lo siguiente:

- Se deberá emplear un bloque de aplicación de carga y dos bloques de soporte del espécimen. La carga deberá aplicarse perpendicularmente a la cara superior de la viga de manera tal que se evite toda excentricidad, como se muestra en la figura 2.15
- Todos los aparatos para la determinación de la resistencia a la flexión con carga en el centro del tramo deberán ser similares a los presentados en la figura 2.15 y deberá mantener constante la distancia entre apoyos y la posición del bloque central de carga, con respecto a los bloques de soporte con una tolerancia de ± 1 mm.
- La dirección de las reacciones deberá ser paralelas a la dirección de la carga aplicada en todo momento mientras se realice la prueba.

El procedimiento de ensayo a flexión se detalla en la NTP. 339.079-2012.

Figura 2.19. Dispositivo adecuado para la prueba de flexión. (Adaptado de NTP 339.079)



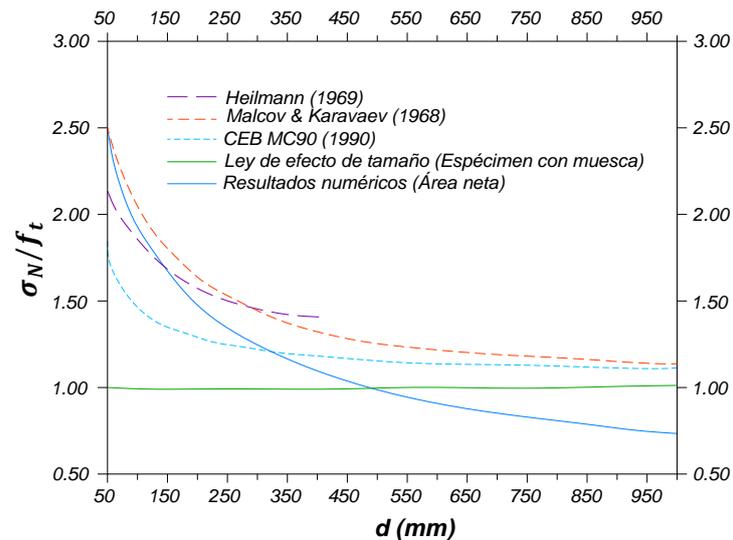
2.2.18. EFECTO DE ESCALA

Ríos, R.; Riera, J. (2004) precisa que el efecto de escala o efecto de tamaño corresponde a una disminución de la resistencia a medida que se incrementa el tamaño de un elemento, esto sucede debido a que las propiedades mecánicas de los materiales de ingeniería se determinan frecuentemente mediante pruebas de laboratorio en modelos a escalas reducidas, pero en la práctica las dimensiones de los elementos estructurales son a menudo mucho más grandes.

Eligehausen, R.; Ozbolt, J. (1995) señalan que existen dos tipos principales de leyes de escalado teórico para estructuras de concreto. El primer tipo se deriva esencialmente de la mecánica de fractura elástica lineal (LEFM), la mecánica de fractura no lineal, el modelo de grieta cohesiva o consideraciones simples de balance de energía entre la liberación de energía estructural y la capacidad de consumo de energía del concreto estos enfoques tratan con una sola grieta y un supuesto a priori sobre un defecto inicial constante o proporcionalmente escalado. Sin embargo, para el concreto y las estructuras de concreto armado, el supuesto de crecimiento de una sola grieta no es realista, es decir, en la mayoría de las estructuras siempre existe más de una grieta.

Así mismo mencionan que la resistencia a la flexión y al corte de un elemento disminuye al aumentar la altura de la muestra y que este efecto de tamaño puede explicarse bien por la mecánica de la fractura.

Figura 2.20. Resistencia a la flexión relativa en función de la profundidad del miembro (Adaptado de Eligehausen, R.; Ozbolt, J. 1995).



(σ_N : Tensión Nominal; f_t : Resistencia a la tensión; d : Profundidad del espécimen)

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- **Adherencia:** Capacidad de agarre entre materiales distintos, considerando la fricción entre los mismos. (Astorga, A.; Rivero, P., p3)
- **Agregado:** Llamados también áridos; conjunto de partículas de origen natural o artificial, que pueden ser tratados o elaborados, y cuyas dimensiones están comprendidas entre los límites fijados por la NTP. (NTP 400.011, p2)
- **Carga:** Fuerzas u otras acciones que resulten del peso de los materiales de construcción, ocupantes y sus pertenencias, efectos del medio ambiente, movimientos diferenciales y cambios dimensionales restringidos. (NTE E 020, p1).
- **Concreto:** Mezcla de cemento portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos. (NTE E 060, p26).
- **Concreto armado:** Concreto estructural reforzado con no menos de la cantidad mínima de acero. (NTE E 060, p26).
- **Deformación:** Cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo. (Astorga, A.; Rivero, P., p24)
- **Deformación Unitaria:** Es la deformación de la longitud por unidad de longitud. (Astorga, A.; Rivero, P., p24)
- **Deflexión:** Deformación que sufre un elemento por el efecto de las flexiones internas. La deflexión hace referencia al grado en el que un elemento estructural se desplaza bajo la aplicación de una fuerza. (Astorga, A.; Rivero, P., p24)

- **Ductilidad:** Capacidad de soportar grandes deformaciones sin pérdida significativa de su resistencia. (Morales, R., p. 209)
- **Eje neutro:** Superficie material curva de una viga deformada por flexión, que separa la zona comprimida de la zona traccionada. (Astorga, A.; Rivero, P., p25)
- **Esfuerzo:** Fuerzas internas de un elemento, que resisten las cargas externas y se oponen a la deformación que éstas le ocasionan. Los esfuerzos pueden ser de compresión, de tracción, de corte, de flexión o de torsión; según el tipo de fuerza a la que se oponen. (Astorga, A.; Rivero, P., p26)
- **Flexión:** Tipo de esfuerzo que incluye tracción y compresión, pero en lugar de actuar a lo largo de la dirección en que se aplican las fuerzas, como sucede con la tracción y compresión, lo hace cambiando la dirección de ellas. La flexión es un mecanismo propio de las vigas, que con la acción de su propio peso y cualquier carga adicional existente, inciden fuerzas perpendiculares que producen una deformación en la pieza que tiende a curvarse hacia abajo. (Astorga, A.; Rivero, P., p26)
- **Módulo de elasticidad:** Relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente, para esfuerzos de tracción o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material. (NTE E 060, p28)
- **Momento Flector:** Momento de fuerza resultante de una distribución de tensiones sobre una sección transversal de una viga flexionada que es perpendicular al eje longitudinal a lo largo del que se produce la flexión. (Astorga, A.; Rivero, P., p35)
- **Relación Modular:** Relación entre los módulos de elasticidad del acero y del concreto. (Harmsen T, 2017).
- **Reforzamiento:** Se define como el aumento de secciones o adición de materiales nuevos que aumenten la capacidad resistente de los elementos estructurales y de la estructura en su conjunto. (Moncayo, et al., 2016)
- **Resistencia de diseño:** Resistencia nominal multiplicada por el factor de reducción de resistencia ϕ que corresponda. (NTE E 060, p29)
- **Resistencia Nominal:** Resistencia de un elemento o una sección transversal calculada con las disposiciones e hipótesis del método de diseño por resistencia, antes de aplicar el factor de reducción de resistencia. (NTE E 060, p29)
- **Resistencia Requerida:** Resistencia que un elemento o una sección transversal debe tener para resistir las cargas amplificadas o los momentos y fuerzas internas correspondientes combinadas. (NTE E 060, p29)

- **Sika® CarboDur®:** Sistema de refuerzo a base de polímeros reforzados con fibra carbono (CFRP). Es un sistema de refuerzo para concreto armado o estructuras de acero y metal. Este sistema está compuesto por láminas de refuerzo resistentes a la corrosión, reforzadas con fibra de carbono (CFRP) y el adhesivo especial Sikadur®-30. (Sika® CarboDur®, p1)
- **Sikadur®-30:** Mortero adhesivo de 2 componentes a base de resinas epóxicas, exento de solventes y tixotrópico. (Sikadur®-30, p1)
- **Viga:** Miembro sometido principalmente a flexión y cortante, con o sin fuerza axial o de torsión. Las vigas en pórticos resistentes a momentos que forman parte del sistema resistente ante fuerzas laterales son miembros predominantemente horizontales. (ACI 318 – 14, p48).

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN:

3.1.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN:

País : Perú
Departamento : Cajamarca
Provincia : Cajamarca
Distrito : Cajamarca

La investigación se realizó en el Laboratorio de Mecánica de Suelos en el edificio 1 B y en el Laboratorio de Ensayo de Materiales "Carlos Esparza Díaz" en el edificio 1 C de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, en la Av. Atahualpa N°1050. Ubicados en las coordenadas UTM: 776604.14E, 9207012.95N zona 17 de acuerdo al DATUM WGS 84.

Figura 3.1. Ubicación geográfica del lugar de investigación (Google Maps)



3.1.2. ÉPOCA DE LA INVESTIGACIÓN:

La presente investigación se realizó desde el mes de agosto del 2018 hasta el mes de diciembre del 2018.

3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN:

3.2.1. TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN:

- **Tipo:** Aplicada.
- **Nivel:** Descriptivo.
- **Diseño:** Experimental.
- **Método:** Cuantitativo.

3.2.2. POBLACIÓN DE ESTUDIO:

La población de estudio fue 20 vigas de concreto armado.

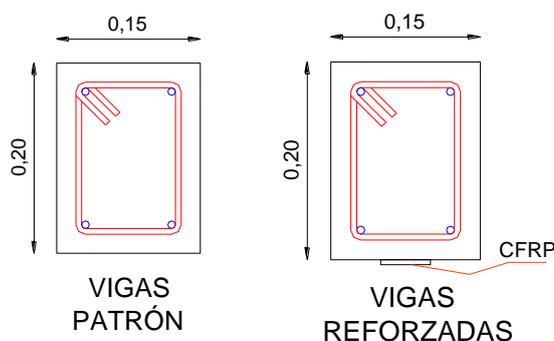
3.2.3. MUESTRA:

Para la presente investigación se realizaron 20 vigas de concreto armado de sección rectangular para los ensayos a flexión de los cuales 10 vigas fueron reforzadas con una lámina de fibra de carbono (Sika® CarboDur® S512). A continuación, se detalla las muestras:

Tabla 3.1 Detalle de Muestras

TIPO	f'_c (kg/cm ²)	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	NOMENCLATURA
Vigas Tipo I	210	Vigas Patrón	5	V210 - # - P
		Vigas Reforzadas	5	V210 - # - R
Vigas Tipo II	280	Vigas Patrón	5	V280 - # - P
		Vigas Reforzadas	5	V280 - # - R
TOTAL			20	

Figura 3.2. Secciones de las Vigas



3.2.4. UNIDAD DE ANÁLISIS:

La unidad de análisis es la viga de concreto armado de 1.20 m x 0.15 m x 0.20 m.

3.2.5. UNIDAD DE OBSERVACIÓN:

El momento flector máximo y deflexión máxima que soporta los diferentes tipos de vigas.

3.2.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS:

Técnica: Se utilizó la observación directa para la recolección de datos.

Instrumentos: Se usaron fichas de observación las cuales facilitaron el registro de datos. Además, se usaron grabaciones de video y fotografías para la documentación de datos.

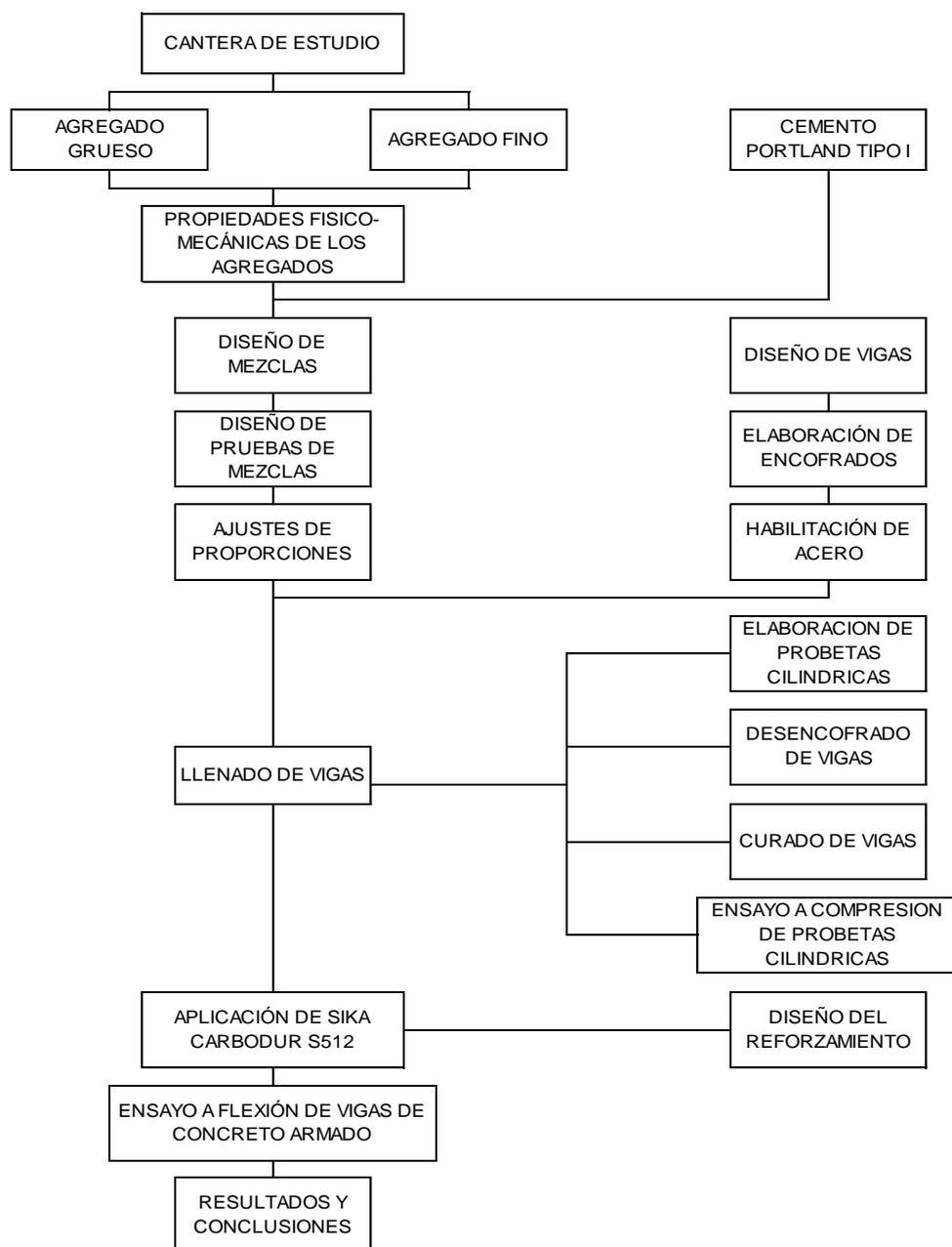
3.2.7. EQUIPOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Se utilizó un deformímetro calibrado a 0.01m para las lecturas de deflexiones; también se usó un nivel láser marca Bosch y papel milimetrado como alternativa de registro de deformaciones. Además, se utilizó un vernier para la medición del ancho de la grieta principal en las vigas.

3.3. PROCEDIMIENTO:

A continuación, se presenta un diagrama de flujo del procedimiento realizado en la presente investigación:

Figura 3.3. Diagrama de flujo del procedimiento realizado en la investigación.



3.3.1. CANTERA DE ESTUDIO:

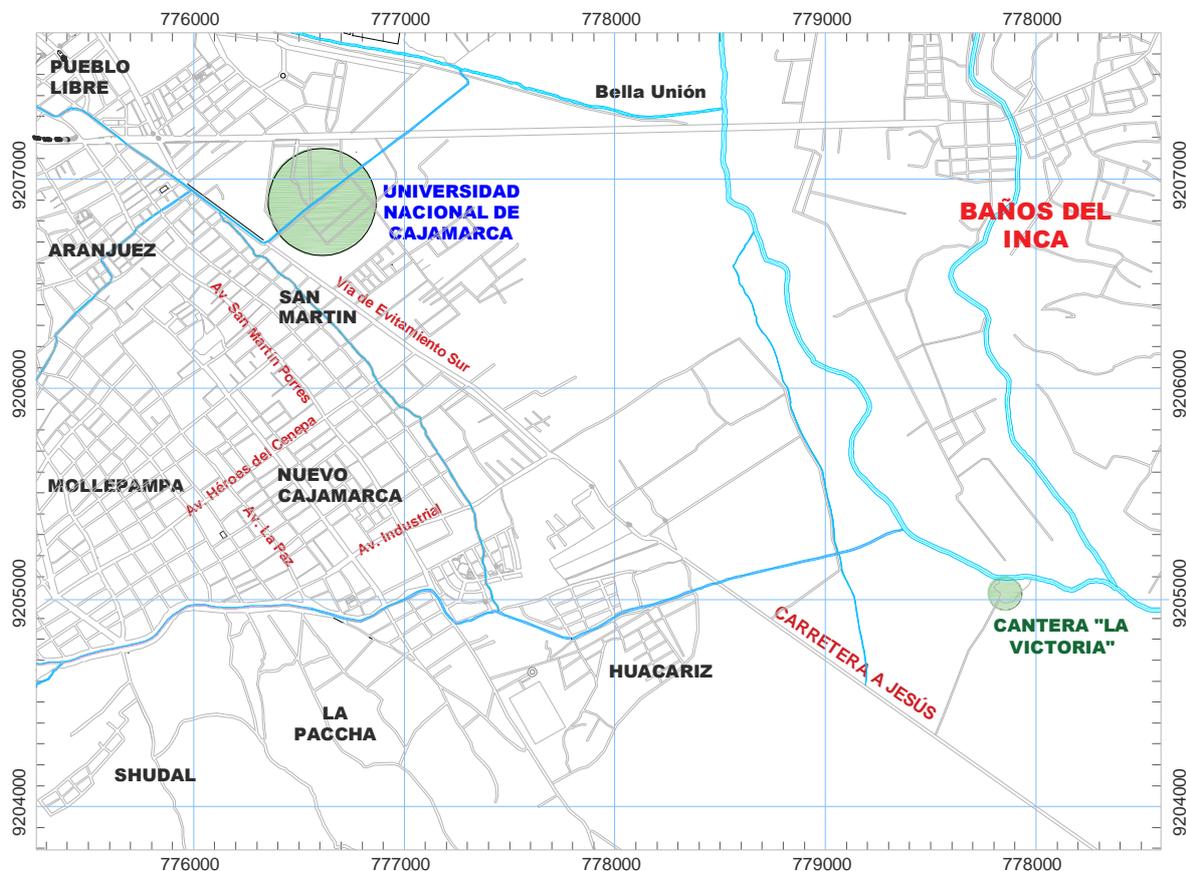
Para el presente trabajo de investigación, se ha utilizado agregados de la cantera “La Victoria”, ya que es una de las canteras principales con la cual se abastece la ciudad de Cajamarca para la ejecución de obras.

Ubicación:

La Cantera “La Victoria” se encuentra ubicada en el Km 4+300 de la carretera Cajamarca – Jesús, a la altura del Fundo La Victoria de la Universidad Nacional de Cajamarca. Geográficamente se encuentra entre los paralelos $7^{\circ}11'04''$ y $7^{\circ}11'07''$ de latitud sur y los meridianos $78^{\circ}27'53''$ y $78^{\circ}27'59''$ de longitud oeste, y con coordenadas UTM; E 779854.37, N 9205018.09

A continuación, se presenta el plano de ubicación de la cantera “La Victoria”.

Figura 3.4. Plano de Ubicación de la Cantera “La Victoria” Km 4+300 de la carretera Cajamarca – Jesús



Geología:

La zona de la cantera “La Victoria” es de depósitos aluviales, según la carta geológica nacional, caracterizada por acumulaciones de material no consolidado, producto de la desintegración de basamento rocoso en zonas alejadas, con diferentes grados de transporte, que se han depositado en el lecho del río.

Los materiales aluviales localizados en el Río Cajamarquino en la cual se ubica la cantera La Victoria, están constituidos por clastos subangulosos a redondeados de diferente litología (cuarcitas, areniscas, calizas), así como la matriz arenosa suelta y que constituyen fuentes de extracción de materiales agregados usados en la industria de la construcción.

3.3.2. AGREGADO FINO:

El agregado fino cumple con la norma NTP 400.011 y con el requisito granulométrico especificado en la norma NTP 400.037.

3.3.3. AGREGADO GRUESO:

Este agregado también cumple con la norma NTP 400.011 y con los husos granulométricos especificados en la norma NTP 400.037.

3.3.4. CEMENTO PORTLAND TIPO I:

El cemento Portland elegido para la presente investigación es el tipo I ya que es de uso general y no se cuenta con restricciones o requisitos de propiedades especiales, este cumple con la norma NTP 334.009; sus especificaciones técnicas se indican en el anexo V.

3.3.5. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LOS AGREGADOS:

Las propiedades físico - mecánicas del agregado grueso y agregado fino se realizaron en concordancia a los procedimientos descritos en las normas NTP y ASTM. Los resultados de estos ensayos se muestran en el anexo II. A continuación, se describe cada uno de ellos:

3.3.5.1. Análisis granulométrico:

De acuerdo a la NTP 400.012, versión 2013 y la norma ASTM C 136; de este ensayo se logró obtener los siguientes datos:

- **Módulo de Finura de los Agregados:** Es la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados en el ensayo de granulométrico de los agregados, de los tamices 1 1/2", 3/4", 3/8", N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50 y N° 100; divididos entre 100.
- **Tamaño Máximo:** Es el que corresponde al menor tamiz por el que pasa toda la muestra de agregado grueso. (NTP 400.037, 2014).
- **Tamaño máximo Nominal:** Es el que corresponde al menor tamiz de la serie utilizada que produce el primer retenido ente 5 % y 10 %. (NTP 400.037, 2014).

3.3.5.2. Contenido de partículas finas que pasa la malla N° 200:

El procedimiento está reglamentado en la NTP 400.018, versión 2013 y la norma ASTM C 117. Se deberá calcular en contenido de partículas finas que pasa la malla N°200 del agregado grueso y del agregado fino y no debe ser más del 1 % y 5 % respectivamente (de acuerdo a la norma NTP 400.037, 2014).

3.3.5.3. Peso Unitario de los Agregados:

Siguiendo la NTP 400.017, versión 2011 y la norma ASTM C 29. Para determinar el peso unitario suelto y compactado. Es un valor útil sobre todo para hacer las transformaciones de pesos a volúmenes y viceversa teniendo en cuenta que puede ser suelto o compactado.

3.3.5.4. Contenido de Humedad:

Haciendo guía a la NTP 339.185, versión 2013 y la norma ASTM C 566. La cantidad de agua superficial retenida por la partícula, su influencia está en la mayor o menor cantidad de agua necesaria en la mezcla. Es de gran importancia conocer el contenido de humedad de los agregados justo antes de ser mezclados para obtener concreto, debido a que el agua de diseño deberá ser corregida por el aporte de agua de los agregados que presentan antes de ser combinados. (Torre A., 2004).

3.3.5.5. Densidad y Absorción del agregado fino:

Obedeciendo a la NTP 400.022, versión 2013 y la norma ASTM C 128, para determinar la densidad secada al horno, densidad saturada superficialmente seca, la densidad aparente y la absorción del agregado fino por el método gravimétrico.

3.3.5.6. Densidad y Absorción del agregado grueso:

En cumplimiento con la NTP 400.021, versión 2013 y la norma ASTM C 127, para determinar la densidad secada al horno, densidad saturada superficialmente seca, la densidad aparente y la absorción del agregado grueso.

3.3.6. DISEÑO DE MEZCLAS:

Luego de determinar las características físico - mecánicas de los agregados se procedió a realizar el diseño de mezcla, para la presente investigación se utilizó el método de Módulo de Finura de la Combinación de los Agregados para determinar la adecuada cantidad de los componentes del concreto y así obtener una resistencia de diseño o requerida de 210 kg/cm² y 280kg/cm². Para lograr una adecuada dosificación de los elementos del concreto, se debe realizar un diseño de mezcla de prueba para luego ajustar las proporciones del concreto.

Procedimiento:

A continuación, se presenta la secuencia para el diseño de mezcla por el método de Módulo de Finura de la Combinación de los Agregados descritos por Rivva E. (2014):

1. Estudio de las especificaciones requeridas.
2. Definición de la resistencia promedio a Compresión
3. Elección del asentamiento
4. Determinación tamaño máximo nominal del agregado (TMN)
5. Estimación cantidad de aire
6. Estimación contenido de agua
7. Estimación de la relación agua/cemento
8. Determinación de material cementante
9. Determinación del módulo de fineza de la combinación de agregados
10. Determinación de agregado grueso
11. Determinación de agregado fino
12. Determinación de los pesos secos de los agregados
13. Determinación de los valores de diseño
14. Corrección por humedad de los agregados
15. Ajuste del diseño de mezcla
16. Determinación de los materiales integrantes de la unidad cúbica de concreto

3.3.7. DISEÑO DE VIGAS:

El diseño de las vigas se realizó según los criterios de la norma NTE E. 060 de concreto armado del Reglamento Nacional de Edificaciones. Sin embargo, en el predimensionamiento de la viga según los criterios tomados las dimensiones calculadas no eran las adecuadas ya que la viga cuenta con una luz entre apoyos pequeña por lo que se tuvo que elegir dimensiones que facilitarían la trabajabilidad en la habilitación del acero.

3.3.8. ENCOFRADO DE VIGAS:

El encofrado de las vigas se elaboró con triplay de 9mm de espesor, en total 20 moldes con la sección ya calculada; la parte superior de los encofrados ha sido rigidizado con cintas de triplay longitudinal del mismo espesor para evitar alabeos del triplay durante el vaciado del concreto. Además, se aplicará aceite como desmoldante en los laterales y fondo del encofrado.

3.3.9. HABILITACIÓN DE ACERO:

El refuerzo longitudinal como el refuerzo transversal cumplen con los requerimientos mínimos establecidos por las normas ASTM 615 y E 0.60, se utilizaron barras de acero de 8 mm para acero longitudinal y 6 mm para acero transversal.

Se habilitaron las varillas pertenecientes y también se realizó el doblado y gancho de los estribos en concordancia con las especificaciones del diseño de vigas, amarrados con alambre N° 16.

3.3.10. LLENADO DE VIGAS:

El llenado de las vigas se realizó de acuerdo a los diseños de mezclas ya determinados anteriormente y solo se corrigió por el nuevo contenido de humedad de los agregados tanto para un $f'c=210\text{kg/cm}^2$ y un $f'c=280\text{kg/cm}^2$; posteriormente se comenzó a vaciar concreto a los moldes de las vigas en capas de 10 cm para luego ser compactadas por un vibrador de cabezal de 28 mm hasta llegar a la altura deseada de la viga.

Del vaciado de concreto se corroboró el asentamiento deseado de acuerdo a la NTP 339.035 o la norma ASTM C 143; al igual que se elaboraron 3 probetas cilíndricas para ser ensayadas a los 28 días de acuerdo a la NTP 339.034.

3.3.11. CURADO:

El curado de las vigas de concreto armado al igual que los testigos cilíndricos de concreto fueron curados de acuerdo a la NTP 339.183, para que el concreto logre alcanzar sus propiedades mecánicas deseadas.

3.3.12. DESENCOFRADO DE LAS VIGAS:

Las vigas fueron desencofradas al día siguiente del vaciado del concreto, se evitó en lo posible dañar el concreto recién endurecido. Posteriormente se procedió a con el curado respectivo.

3.3.13. APLICACIÓN DE SIKA CARBODUR S512:

Dos días previos a cumplir los 28 días, la superficie inferior de las 10 vigas a reforzar se limpió de manera que no quedó residuos de partículas libre. Luego se realizó la mezcla de los dos componentes del adhesivo Sikadur®-30, previo a ello se agitó bien dichos componentes en sus envases; se añadió el compuesto B al compuesto A y para el mezclado se utilizó una mezcladora manual eléctrica a baja velocidad (máximo 500 rpm) durante tres minutos hasta obtener una apariencia uniforme, evitando incorporar aire.

Posteriormente con una espátula, se aplicó con cuidado el adhesivo Sikadur®-30 bien mezclado al substrato correctamente preparado con una capa de aproximadamente 1 mm, así mismo aplicamos a la lámina CarboDur® una capa de 1 a 2 mm del adhesivo empleando una espátula.

Luego la lámina CarboDur® S512 fue colocada en la superficie de concreto y usando un rodillo se logró presionar la lámina contra el material epóxico hasta que el adhesivo se salga por ambos lados del laminado, finalmente se eliminó el exceso de adhesivo epóxico.

Ya secado el adhesivo Sikadur®-30 se verificó que la lámina CarboDur® S512 no presente burbujas golpeando suavemente.

3.3.14. ENSAYO A FLEXIÓN:

A los 28 días de edad del concreto, éste llega a su resistencia de diseño, por lo que se procedió a ensayar a flexión las vigas en la máquina de ensayo universal de 100 Tn de acuerdo a la NTP 339.079. Para lo cual se utilizó dos perfiles de acero estructural indeformable de 70 cm de altura, que sirvieron como apoyos de las vigas.

3.4. TRATAMIENTO, ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS:

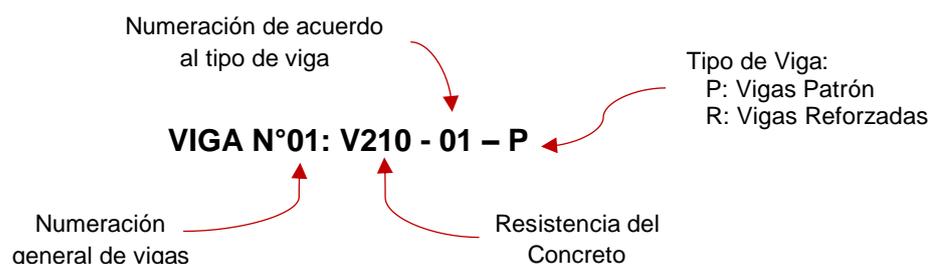
3.4.1. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS:

El tratamiento y análisis de los datos obtenidos en los ensayos a flexión de cada viga de concreto armado, se realiza a través de tablas y gráficos en los cuales se hizo una evaluación o análisis comparativo y correlacional de cada tipo de viga en la presente investigación; de acuerdo a los objetivos y a la comprobación de la hipótesis.

3.4.2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS:

A continuación, se muestran los resultados del ensayo a flexión de las 20 vigas de concreto armado:

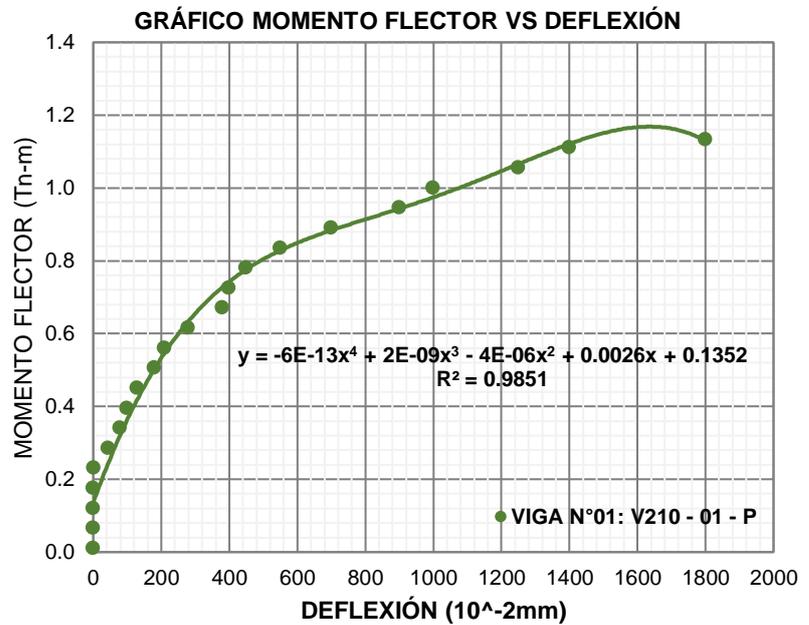
Nomenclatura:



3.4.2.1. Viga N°01: V210-01-P

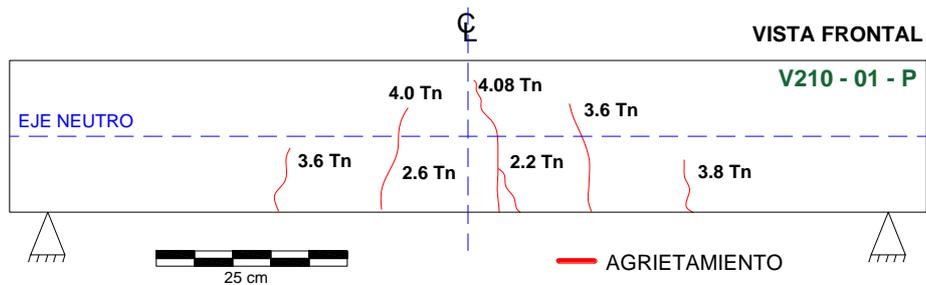
Tabla 3.2. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 01.

VIGA N°01: V210 - 01 - P		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	2
1.0	0.286	45
1.2	0.341	80
1.4	0.396	100
1.6	0.451	130
1.8	0.506	180
2.0	0.561	210
2.2	0.616	280
2.4	0.671	380
2.6	0.726	400
2.8	0.781	450
3.0	0.836	550
3.2	0.891	700
3.4	0.946	900
3.6	1.001	1000
3.8	1.056	1250
4.0	1.111	1400
4.08	1.133	1800



En la figura 3.5 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 01, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

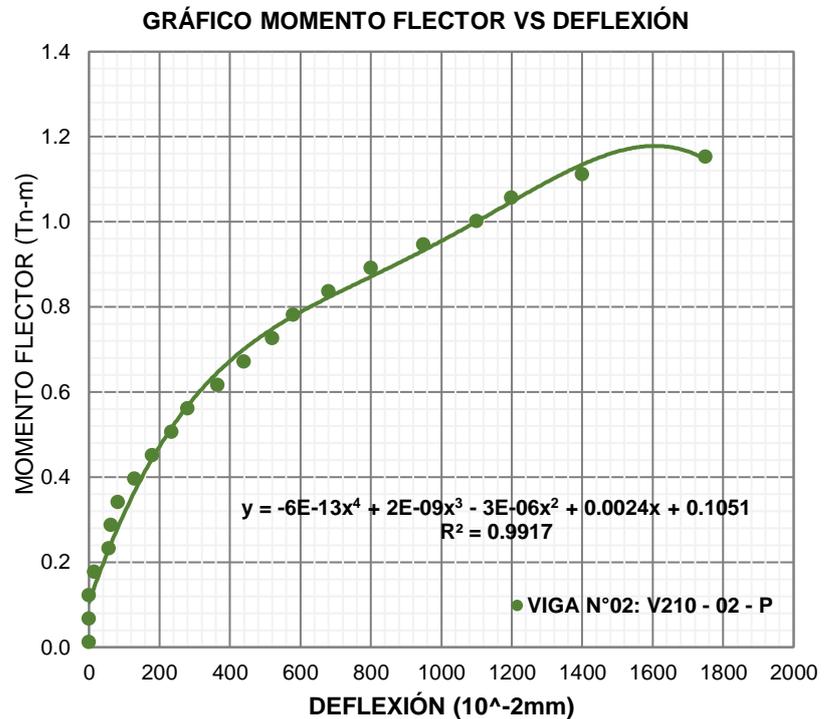
Figura 3.5. Esquema de agrietamiento viga N°01



3.4.2.2. Viga N°02: V210-02-P

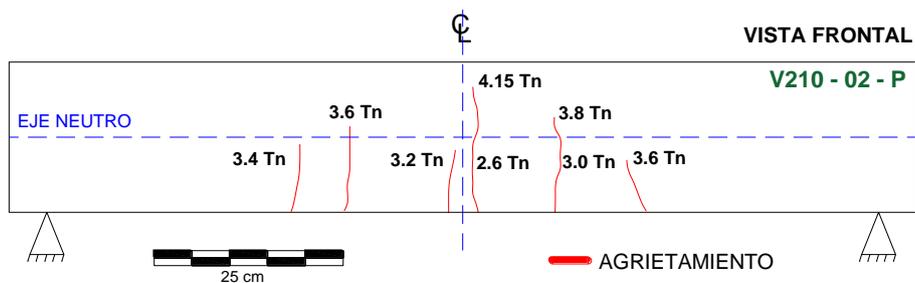
Tabla 3.3. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 02.

VIGA N°02: V210 - 02 - P		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	15
0.8	0.231	56
1.0	0.286	62
1.2	0.341	82
1.4	0.396	130
1.6	0.451	180
1.8	0.506	235
2.0	0.561	280
2.2	0.616	365
2.4	0.671	440
2.6	0.726	520
2.8	0.781	580
3.0	0.836	680
3.2	0.891	800
3.4	0.946	950
3.6	1.001	1100
3.8	1.056	1200
4.0	1.111	1400
4.15	1.152	1750



En la figura 3.6 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 02, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

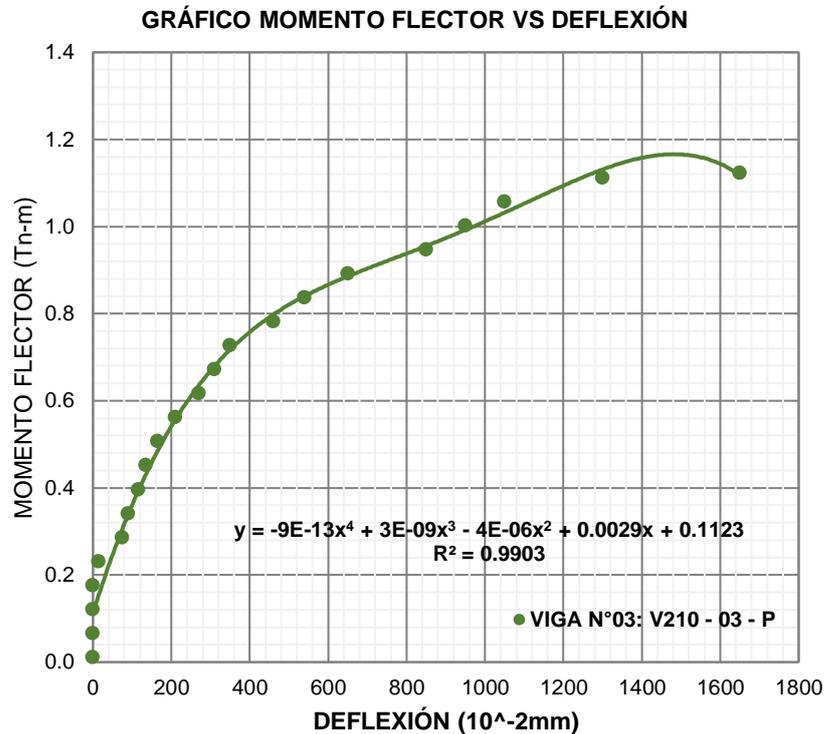
Figura 3.6. Esquema de agrietamiento viga N°02



3.4.2.3. Viga N°03: V210-03-P

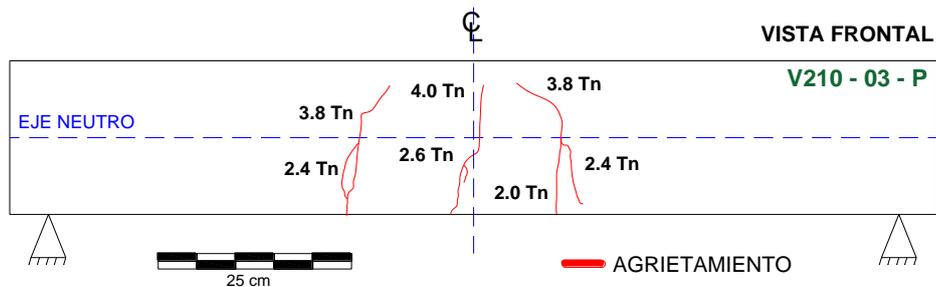
Tabla 3.4. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 03.

VIGA N°03: V210 - 03 - P		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLECCIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	15
1.0	0.286	75
1.2	0.341	90
1.4	0.396	115
1.6	0.451	135
1.8	0.506	165
2.0	0.561	210
2.2	0.616	270
2.4	0.671	310
2.6	0.726	350
2.8	0.781	460
3.0	0.836	540
3.2	0.891	650
3.4	0.946	850
3.6	1.001	950
3.8	1.056	1050
4.0	1.111	1300
4.04	1.122	1650



En la figura 3.7 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 03, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

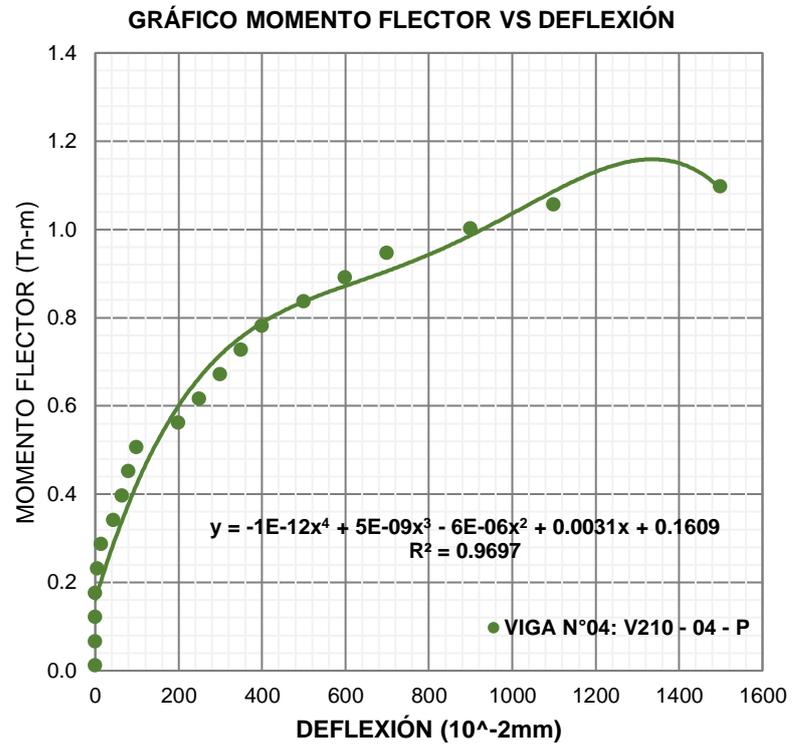
Figura 3.7. Esquema de agrietamiento viga N°03



3.4.2.4. Viga N°04: V210-04-P

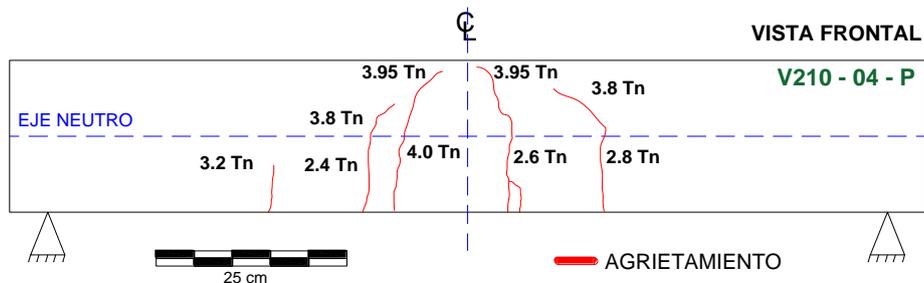
Tabla 3.5. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 04.

VIGA N°04: V210 - 04 - P		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	5
1.0	0.286	15
1.2	0.341	44
1.4	0.396	65
1.6	0.451	80
1.8	0.506	100
2.0	0.561	200
2.2	0.616	250
2.4	0.671	300
2.6	0.726	350
2.8	0.781	400
3.0	0.836	500
3.2	0.891	600
3.4	0.946	700
3.6	1.001	900
3.8	1.056	1100
3.95	1.097	1500



En la figura 3.8 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 04, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

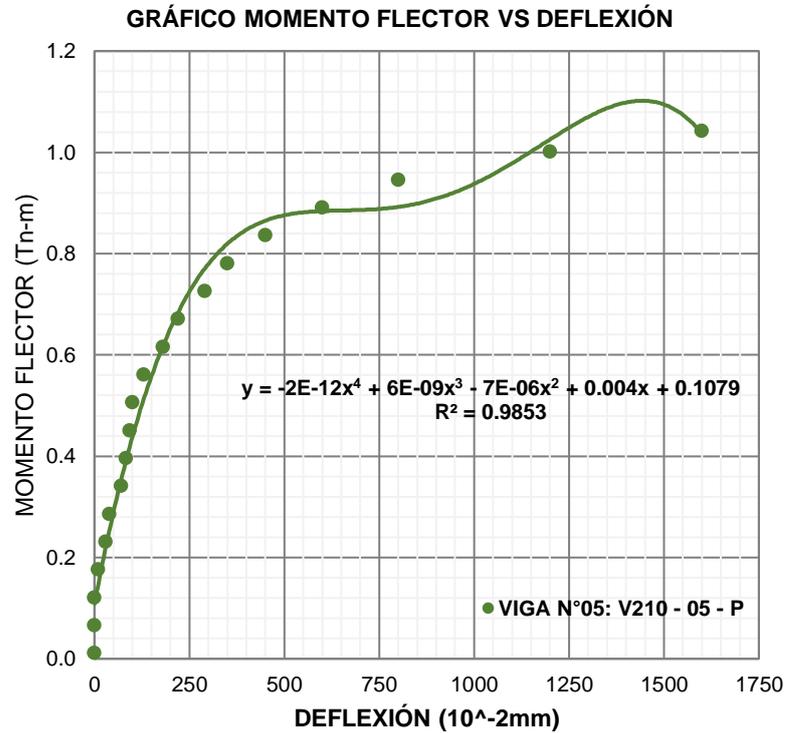
Figura 3.8. Esquema de agrietamiento viga N°04



3.4.2.5. Viga N°05: V210-05-P

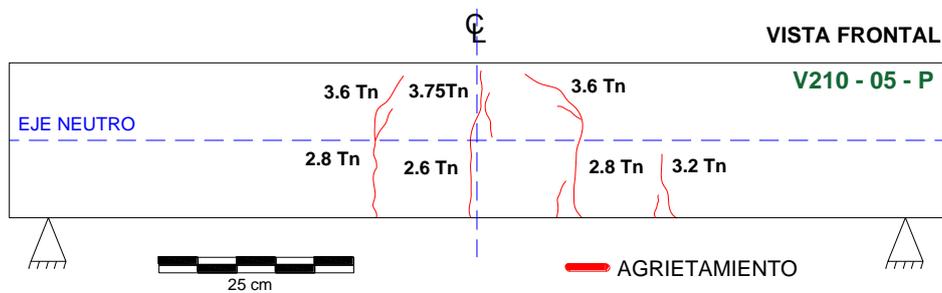
Tabla 3.6. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 05.

VIGA N°05: V210 - 05 - P		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLECCIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	10
0.8	0.231	30
1.0	0.286	40
1.2	0.341	70
1.4	0.396	83
1.6	0.451	93
1.8	0.506	100
2.0	0.561	130
2.2	0.616	180
2.4	0.671	220
2.6	0.726	290
2.8	0.781	350
3.0	0.836	450
3.2	0.891	600
3.4	0.946	800
3.6	1.001	1200
3.75	1.042	1600



En la figura 3.9 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 05, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

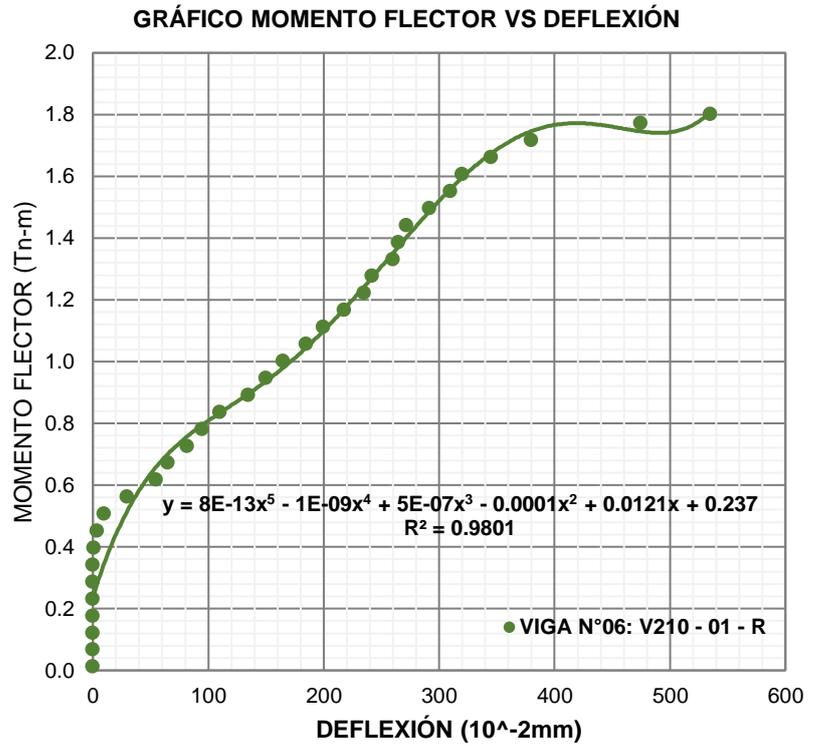
Figura 3.9. Esquema de agrietamiento viga N°05



3.4.2.6. Viga N°06: V210-01-R

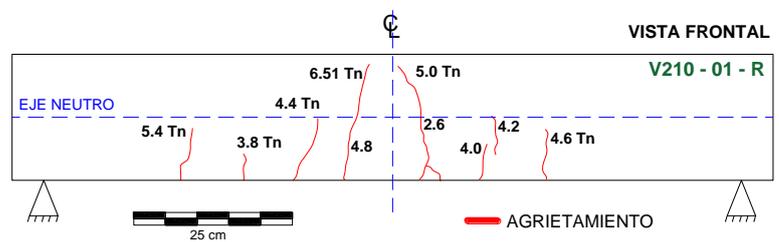
Tabla 3.7. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 06.

VIGA N°06: V210 - 01 - R		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	0
1.0	0.286	0
1.2	0.341	0
1.4	0.396	1
1.6	0.451	4
1.8	0.506	10
2.0	0.561	30
2.2	0.616	55
2.4	0.671	65
2.6	0.726	82
2.8	0.781	95
3.0	0.836	110
3.2	0.891	135
3.4	0.946	150
3.6	1.001	165
3.8	1.056	185
4.0	1.111	200
4.2	1.166	218
4.4	1.221	235
4.6	1.276	242
4.8	1.331	260
5.0	1.386	265
5.2	1.441	272
5.4	1.496	292
5.6	1.551	310
5.8	1.606	320
6.0	1.661	345
6.2	1.716	380
6.4	1.771	475
6.51	1.801	535



En la figura 3.10 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 06, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

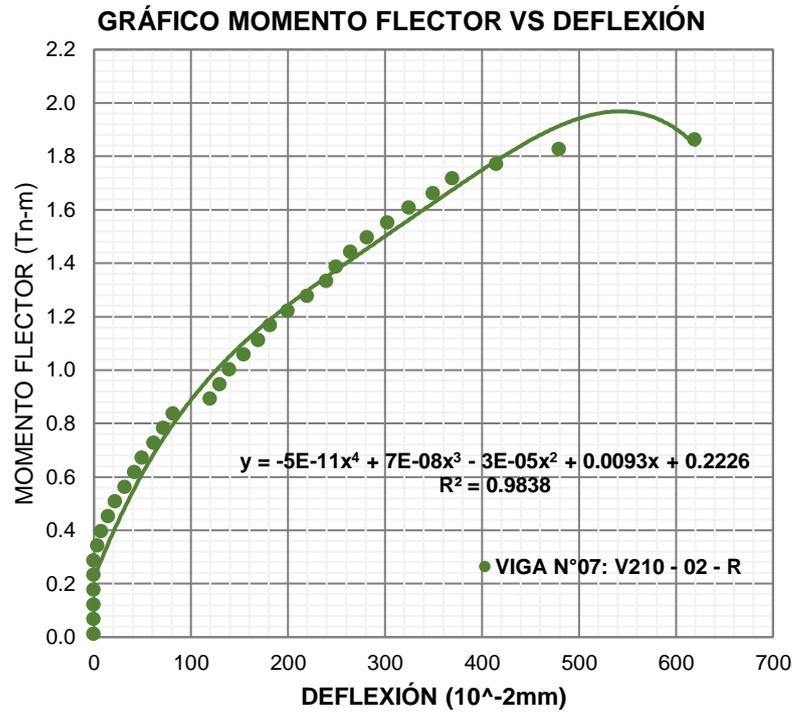
Figura 3.10. Esquema de agrietamiento viga N°06



3.4.2.7. Viga N°07: V210-02-R

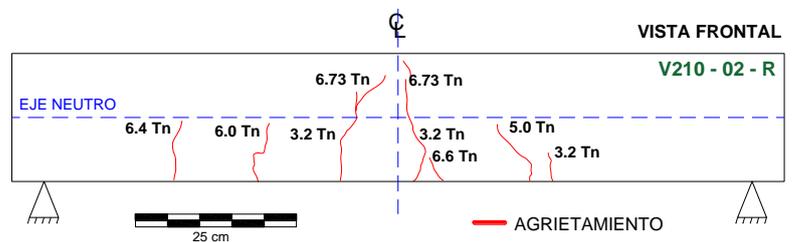
Tabla 3.8. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 07.

VIGA N°07: V210 - 02 - R		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLECCIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	0
1.0	0.286	0
1.2	0.341	4
1.4	0.396	8
1.6	0.451	15
1.8	0.506	22
2.0	0.561	32
2.2	0.616	42
2.4	0.671	50
2.6	0.726	62
2.8	0.781	72
3.0	0.836	82
3.2	0.891	120
3.4	0.946	130
3.6	1.001	140
3.8	1.056	155
4.0	1.111	170
4.2	1.166	182
4.4	1.221	200
4.6	1.276	220
4.8	1.331	240
5.0	1.386	250
5.2	1.441	265
5.4	1.496	282
5.6	1.551	303
5.8	1.606	325
6.0	1.661	350
6.2	1.716	370
6.4	1.771	415
6.6	1.826	480
6.73	1.862	620



En la figura 3.11 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 07, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

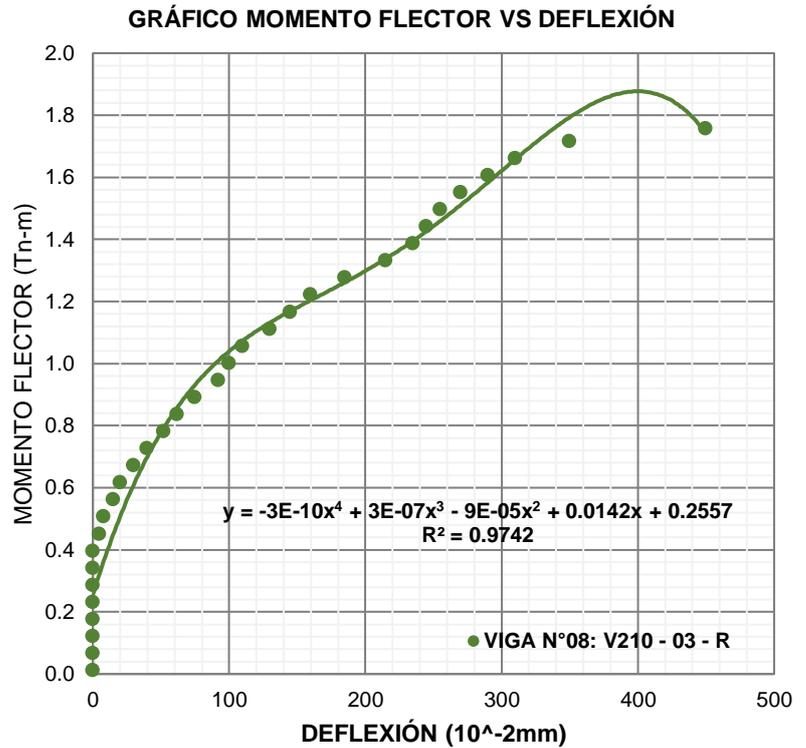
Figura 3.11. Esquema de agrietamiento viga N°07



3.4.2.8. Viga N°08: V210-03-R

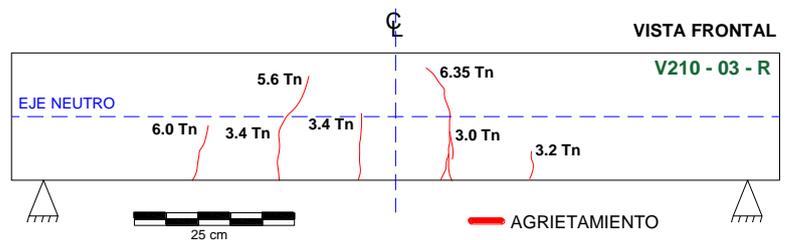
Tabla 3.9. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 08.

VIGA N°08: V210 - 03 - R		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	0
1.0	0.286	0
1.2	0.341	0
1.4	0.396	0
1.6	0.451	5
1.8	0.506	8
2.0	0.561	15
2.2	0.616	20
2.4	0.671	30
2.6	0.726	40
2.8	0.781	52
3.0	0.836	62
3.2	0.891	75
3.4	0.946	92
3.6	1.001	100
3.8	1.056	110
4.0	1.111	130
4.2	1.166	145
4.4	1.221	160
4.6	1.276	185
4.8	1.331	215
5.0	1.386	235
5.2	1.441	245
5.4	1.496	255
5.6	1.551	270
5.8	1.606	290
6.0	1.661	310
6.2	1.716	350
6.35	1.757	450



En la figura 3.12 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 08, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

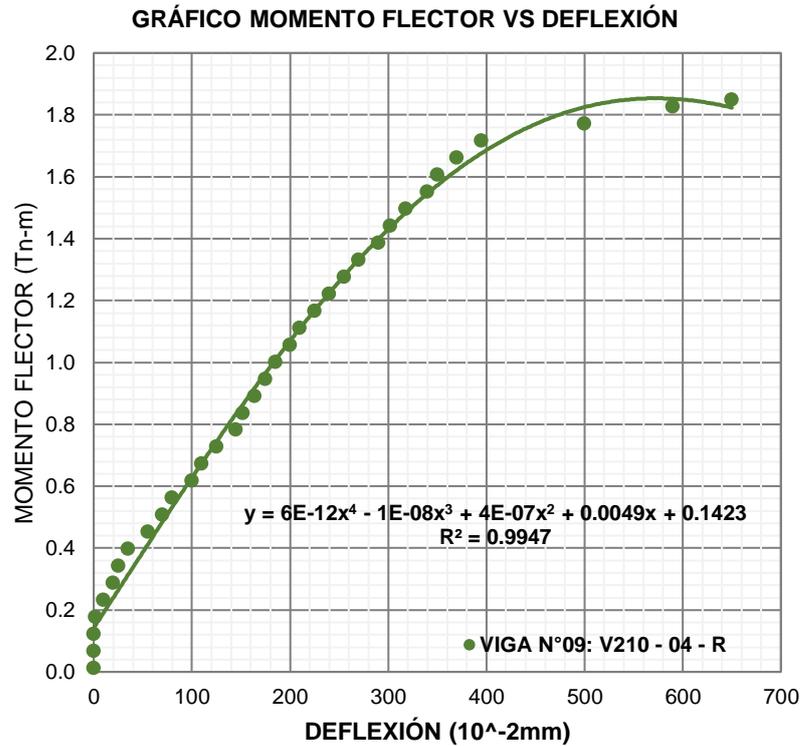
Figura 3.12. Esquema de agrietamiento viga N°08



3.4.2.9. Viga N°09: V210-04-R

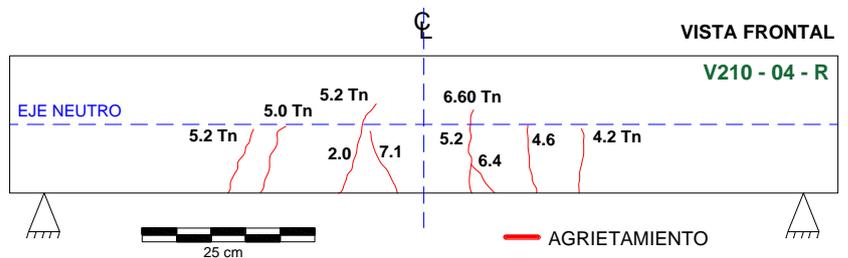
Tabla 3.10. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 09.

VIGA N°09: V210 - 04 - R		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	2
1.0	0.286	15
1.2	0.341	35
1.4	0.396	55
1.6	0.451	68
1.8	0.506	85
2.0	0.561	92
2.2	0.616	100
2.4	0.671	110
2.6	0.726	125
2.8	0.781	145
3.0	0.836	152
3.2	0.891	164
3.4	0.946	175
3.6	1.001	185
3.8	1.056	200
4.0	1.111	210
4.2	1.166	225
4.4	1.221	240
4.6	1.276	255
4.8	1.331	270
5.0	1.386	290
5.2	1.441	302
5.4	1.496	318
5.6	1.551	340
5.8	1.606	350
6.0	1.661	370
6.2	1.716	395
6.4	1.771	500
6.6	1.826	590
6.68	1.848	650



En la figura 3.13 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 09, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

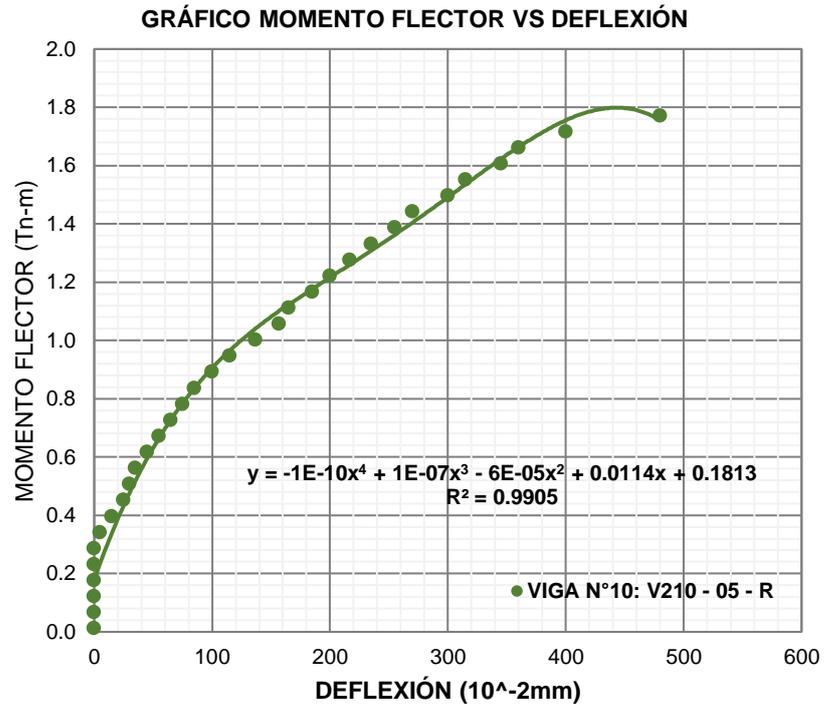
Figura 3.13. Esquema de agrietamiento viga N°09



3.4.2.10. Viga N°10: V210-05-R

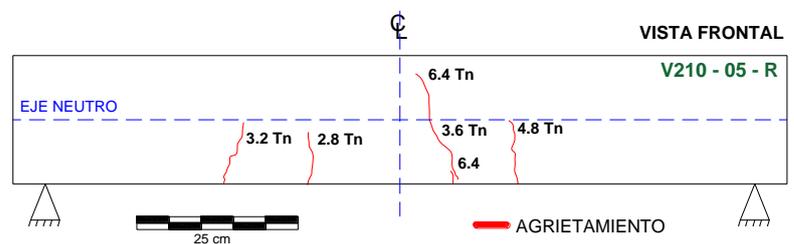
Tabla 3.11. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 10.

VIGA N°10: V210 - 05 - R		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLECCIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	0
1.0	0.286	0
1.2	0.341	5
1.4	0.396	15
1.6	0.451	25
1.8	0.506	30
2.0	0.561	35
2.2	0.616	45
2.4	0.671	55
2.6	0.726	65
2.8	0.781	75
3.0	0.836	85
3.2	0.891	100
3.4	0.946	115
3.6	1.001	137
3.8	1.056	157
4.0	1.111	165
4.2	1.166	185
4.4	1.221	200
4.6	1.276	217
4.8	1.331	235
5.0	1.386	255
5.2	1.441	270
5.4	1.496	300
5.6	1.551	315
5.8	1.606	345
6.0	1.661	360
6.2	1.716	400
6.4	1.771	480



En la figura 3.14 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 10, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

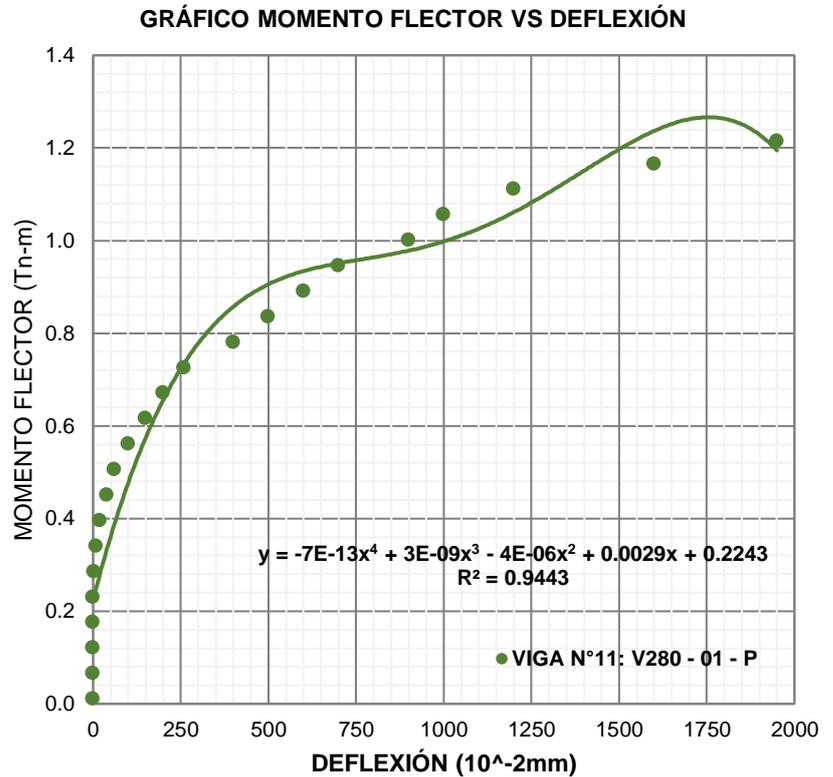
Figura 3.14. Esquema de agrietamiento viga N°10



3.4.2.11. Viga N°11: V280-01-P

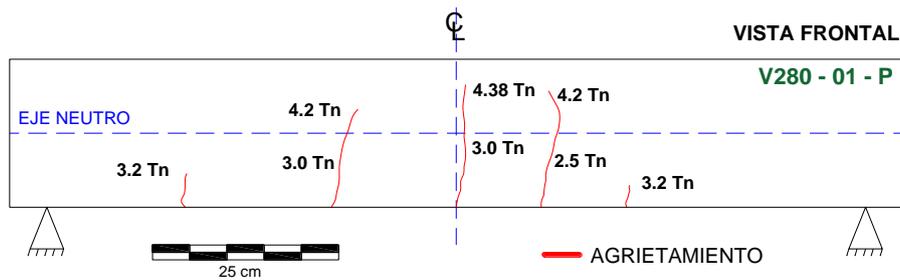
Tabla 3.12. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 11

VIGA N°11: V280 - 01 - P		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	0
1.0	0.286	2
1.2	0.341	8
1.4	0.396	20
1.6	0.451	40
1.8	0.506	60
2.0	0.561	100
2.2	0.616	150
2.4	0.671	200
2.6	0.726	260
2.8	0.781	400
3.0	0.836	500
3.2	0.891	600
3.4	0.946	700
3.6	1.001	900
3.8	1.056	1000
4.0	1.111	1200
4.2	1.166	1600
4.38	1.215	1950



En la figura 3.15 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 11, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

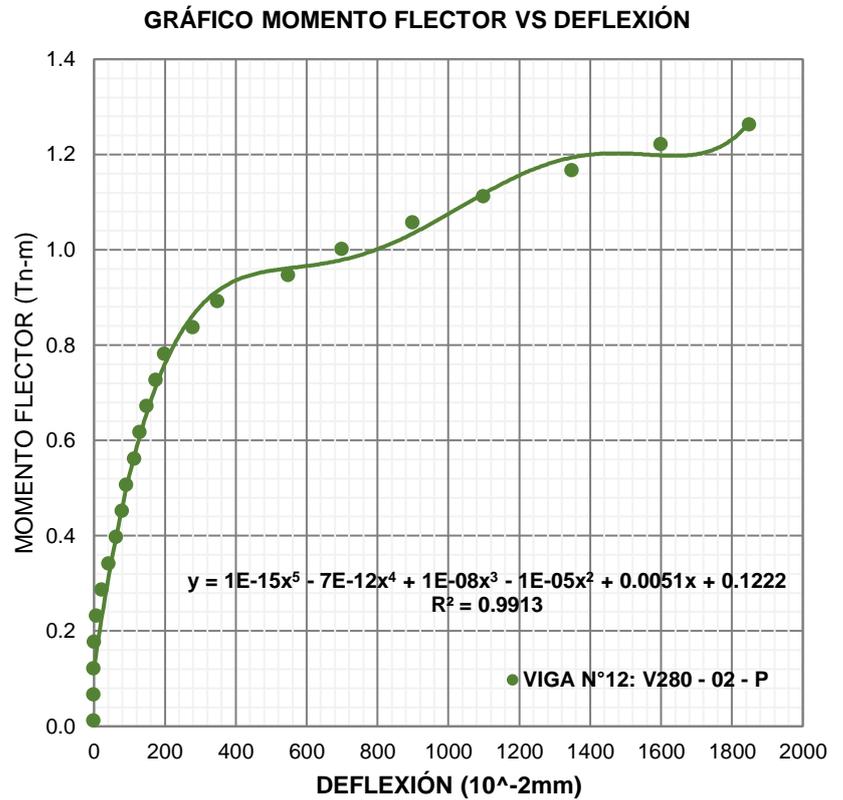
Figura 3.15. Esquema de agrietamiento viga N°11



3.4.2.12. Viga N°12: V280-02-P

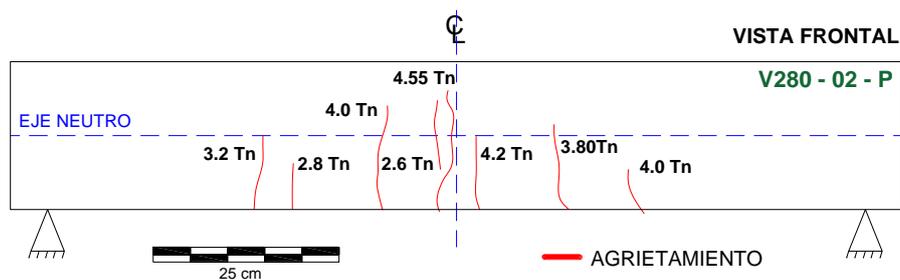
Tabla 3.13. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 12

VIGA N°12: V280 - 02 - P		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	2
0.8	0.231	8
1.0	0.286	23
1.2	0.341	42
1.4	0.396	64
1.6	0.451	80
1.8	0.506	92
2.0	0.561	115
2.2	0.616	130
2.4	0.671	150
2.6	0.726	175
2.8	0.781	200
3.0	0.836	280
3.2	0.891	350
3.4	0.946	550
3.6	1.001	700
3.8	1.056	900
4.0	1.111	1100
4.2	1.166	1350
4.4	1.221	1600
4.55	1.262	1850



En la figura 3.16 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 12, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

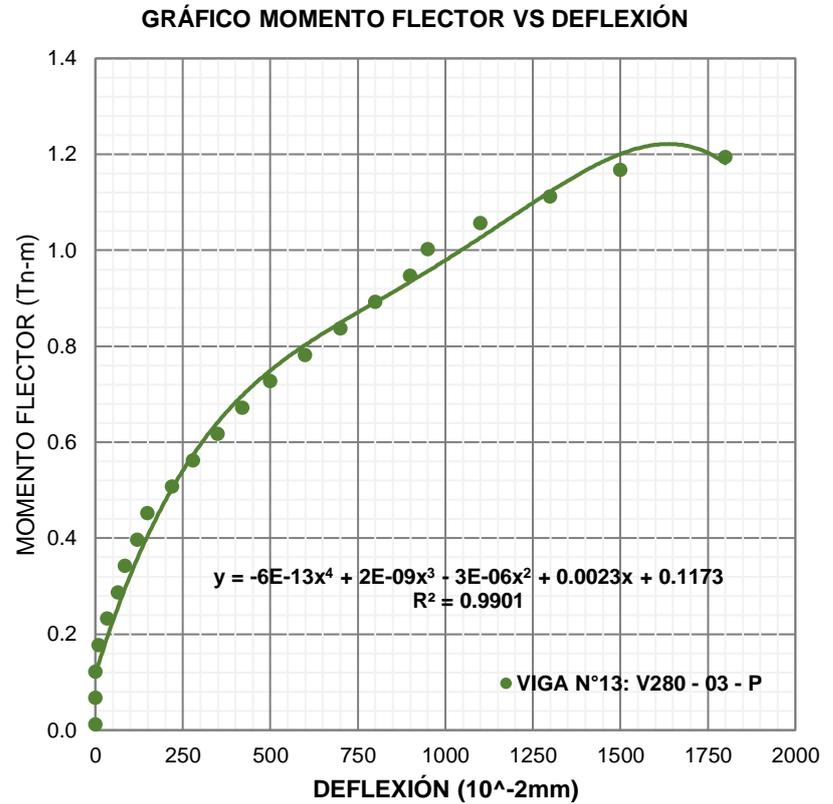
Figura 3.16. Esquema de agrietamiento viga N°12



3.4.2.13. Viga N°13: V280-03-P

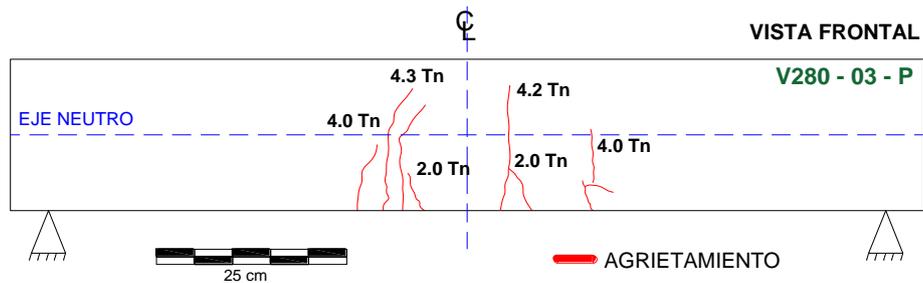
Tabla 3.14. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 13.

VIGA N°13: V280 - 03 - P		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLECCIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	10
0.8	0.231	35
1.0	0.286	65
1.2	0.341	85
1.4	0.396	120
1.6	0.451	150
1.8	0.506	220
2.0	0.561	280
2.2	0.616	350
2.4	0.671	420
2.6	0.726	500
2.8	0.781	600
3.0	0.836	700
3.2	0.891	800
3.4	0.946	900
3.6	1.001	950
3.8	1.056	1100
4.0	1.111	1300
4.2	1.166	1500
4.3	1.193	1800



En la figura 3.17 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 13, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

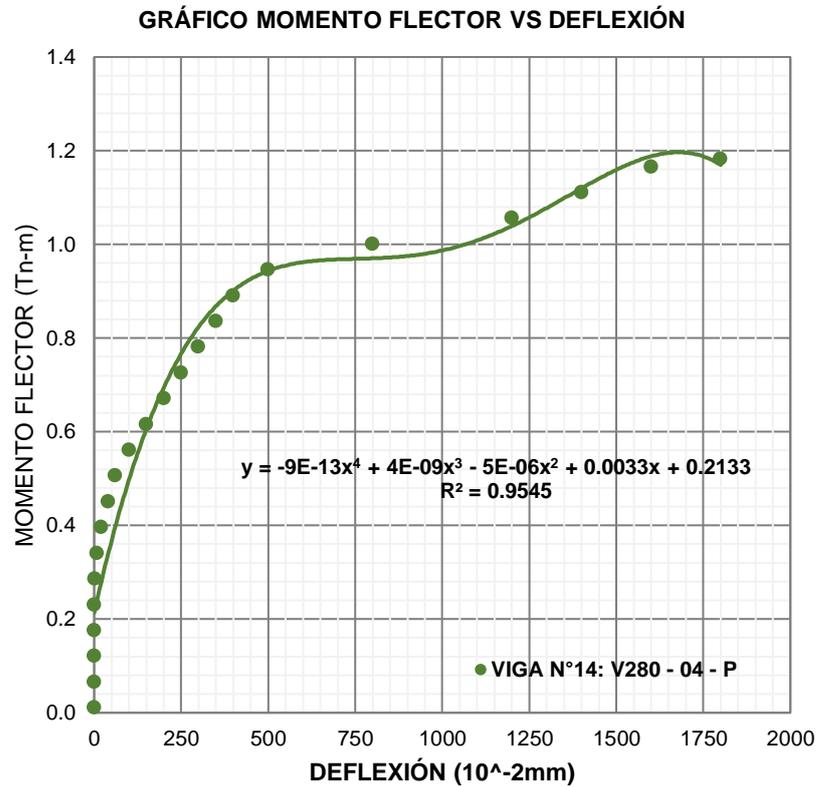
Figura 3.17. Esquema de agrietamiento viga N°13



3.4.2.14. Viga N°14: V280-04-P

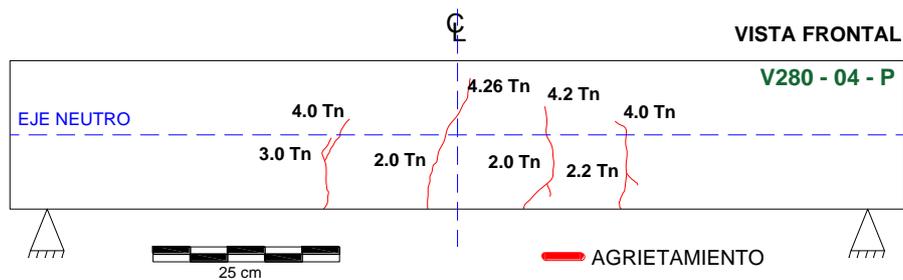
Tabla 3.15. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 14.

VIGA N°14: V280 - 04 - P		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLECCIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	0
1.0	0.286	2
1.2	0.341	8
1.4	0.396	20
1.6	0.451	40
1.8	0.506	60
2.0	0.561	100
2.2	0.616	150
2.4	0.671	200
2.6	0.726	250
2.8	0.781	300
3.0	0.836	350
3.2	0.891	400
3.4	0.946	500
3.6	1.001	800
3.8	1.056	1200
4.0	1.111	1400
4.2	1.166	1600
4.26	1.182	1800



En la figura 3.18 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 14, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

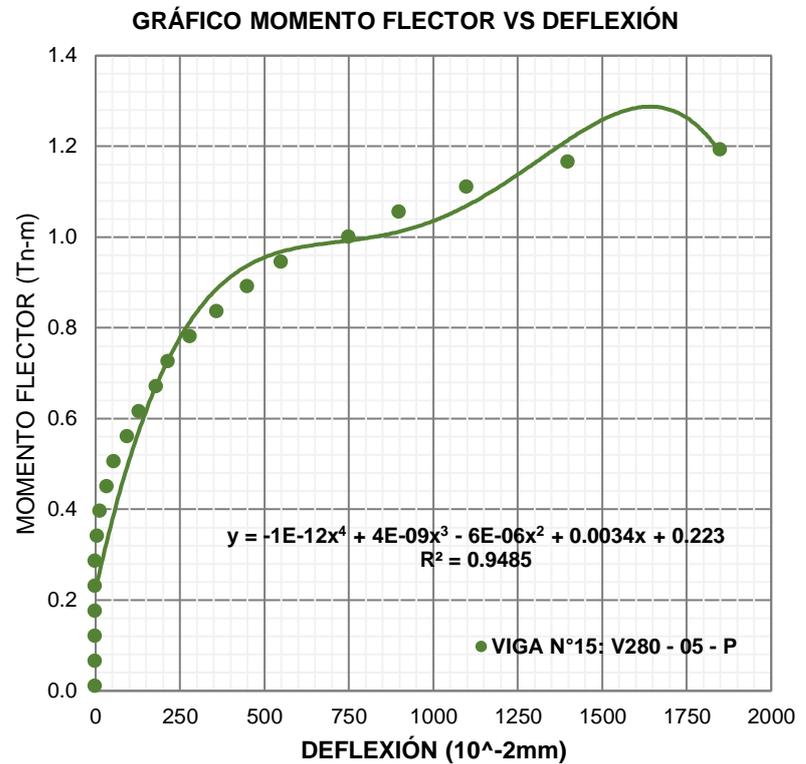
Figura 3.18. Esquema de agrietamiento viga N°14



3.4.2.15. Viga N°15: V280-05-P

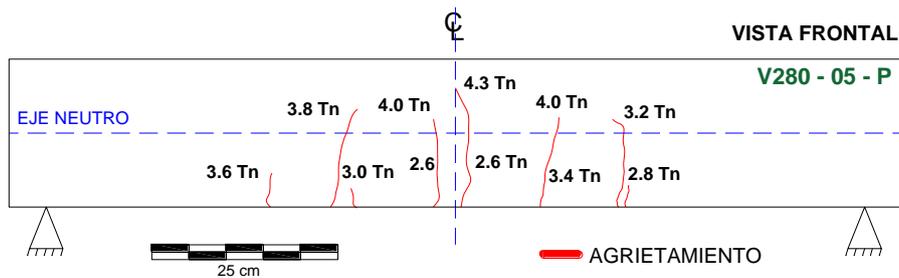
Tabla 3.16. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 15.

VIGA N°15: V280 - 05 - P		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLECCIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	0
1.0	0.286	0
1.2	0.341	6
1.4	0.396	14
1.6	0.451	35
1.8	0.506	55
2.0	0.561	95
2.2	0.616	130
2.4	0.671	180
2.6	0.726	215
2.8	0.781	280
3.0	0.836	360
3.2	0.891	450
3.4	0.946	550
3.6	1.001	750
3.8	1.056	900
4.0	1.111	1100
4.2	1.166	1400
4.30	1.193	1850



En la figura 3.19 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 15, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

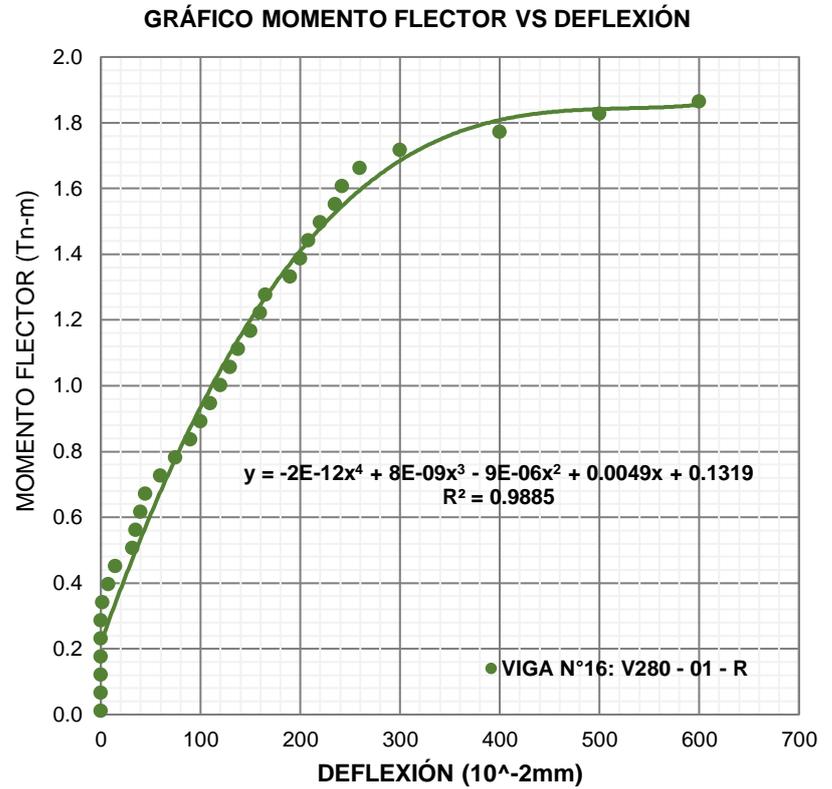
Figura 3.19. Esquema de agrietamiento viga N°15



3.4.2.16. Viga N°16: V280-01-R

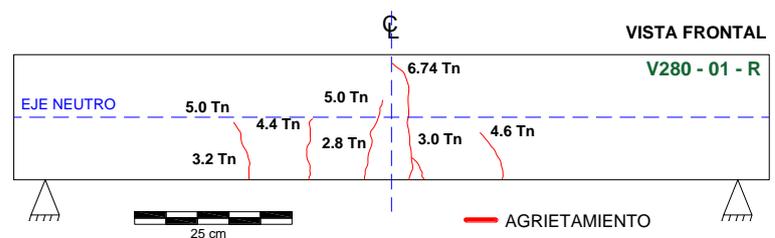
Tabla 3.17. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 16

VIGA N°16: V280 - 01 - R		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	0
1.0	0.286	0
1.2	0.341	2
1.4	0.396	8
1.6	0.451	15
1.8	0.506	32
2.0	0.561	35
2.2	0.616	40
2.4	0.671	45
2.6	0.726	60
2.8	0.781	75
3.0	0.836	90
3.2	0.891	100
3.4	0.946	110
3.6	1.001	120
3.8	1.056	130
4.0	1.111	138
4.2	1.166	150
4.4	1.221	160
4.6	1.276	165
4.8	1.331	190
5.0	1.386	200
5.2	1.441	208
5.4	1.496	220
5.6	1.551	235
5.8	1.606	242
6.0	1.661	260
6.2	1.716	300
6.4	1.771	400
6.6	1.826	500
6.74	1.864	600



En la figura 3.20 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 16, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

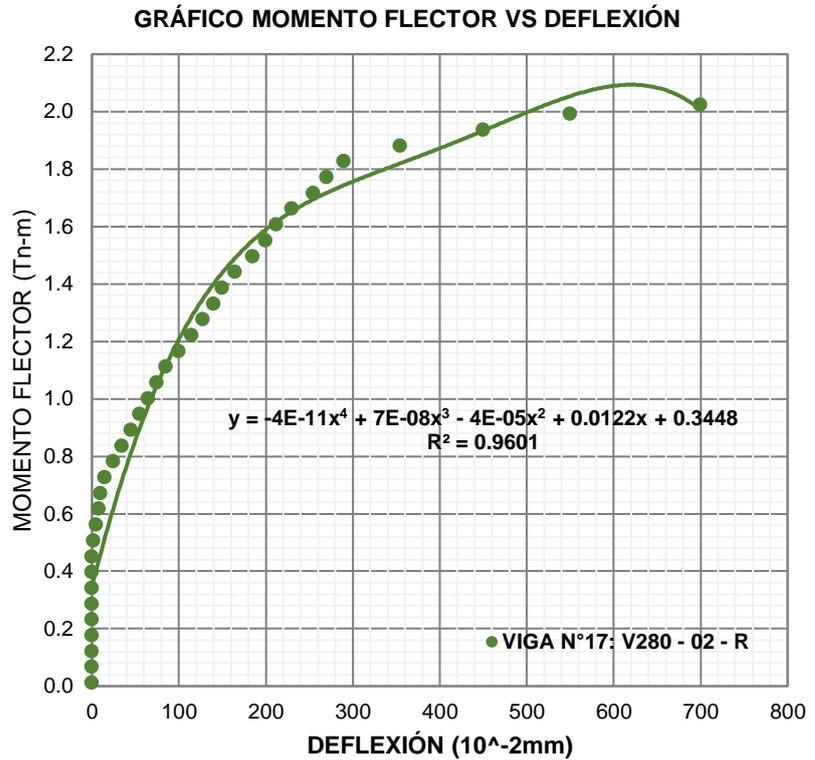
Figura 3.20. Esquema de agrietamiento viga N°16



3.4.2.17. Viga N°17: V280-02-R

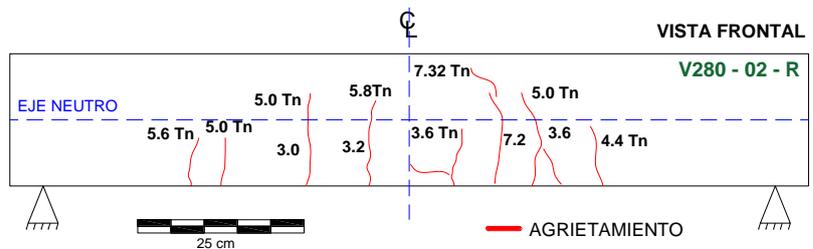
Tabla 3.18. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 17

VIGA N°17: V280 - 02 - R		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	0
1.0	0.286	0
1.2	0.341	0
1.4	0.396	0
1.6	0.451	0
1.8	0.506	2
2.0	0.561	5
2.2	0.616	8
2.4	0.671	10
2.6	0.726	15
2.8	0.781	25
3.0	0.836	35
3.2	0.891	45
3.4	0.946	55
3.6	1.001	65
3.8	1.056	75
4.0	1.111	85
4.2	1.166	100
4.4	1.221	115
4.6	1.276	128
4.8	1.331	140
5.0	1.386	150
5.2	1.441	165
5.4	1.496	185
5.6	1.551	200
5.8	1.606	212
6.0	1.661	230
6.2	1.716	255
6.4	1.771	270
6.6	1.826	290
6.8	1.881	355
7.0	1.936	450
7.2	1.991	550
7.32	2.024	700



En la figura 3.21 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 17, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

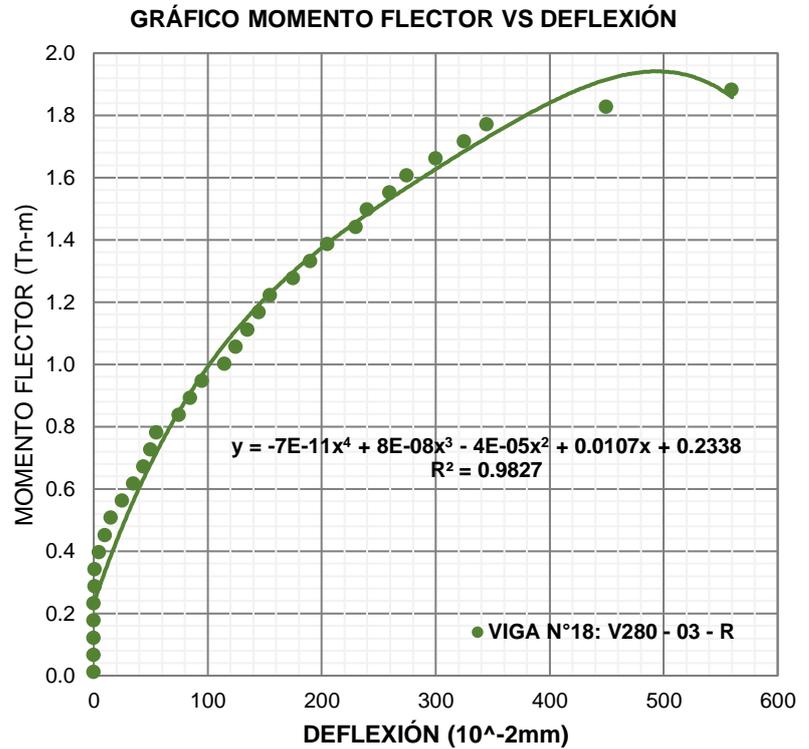
Figura 3.21. Esquema de agrietamiento viga N°17



3.4.2.18. Viga N°18: V280-03-R

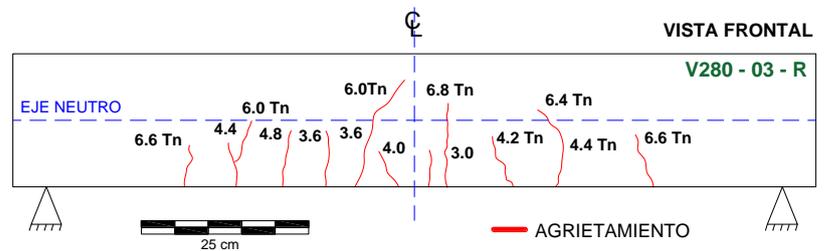
Tabla 3.19. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 18

VIGA N°18: V280 - 03 - R		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	0
1.0	0.286	1
1.2	0.341	1
1.4	0.396	5
1.6	0.451	10
1.8	0.506	15
2.0	0.561	25
2.2	0.616	35
2.4	0.671	44
2.6	0.726	50
2.8	0.781	55
3.0	0.836	75
3.2	0.891	85
3.4	0.946	95
3.6	1.001	115
3.8	1.056	125
4.0	1.111	135
4.2	1.166	145
4.4	1.221	155
4.6	1.276	175
4.8	1.331	190
5.0	1.386	205
5.2	1.441	230
5.4	1.496	240
5.6	1.551	260
5.8	1.606	275
6.0	1.661	300
6.2	1.716	325
6.4	1.771	345
6.6	1.826	450
6.8	1.881	560



En la figura 3.22 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 18, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

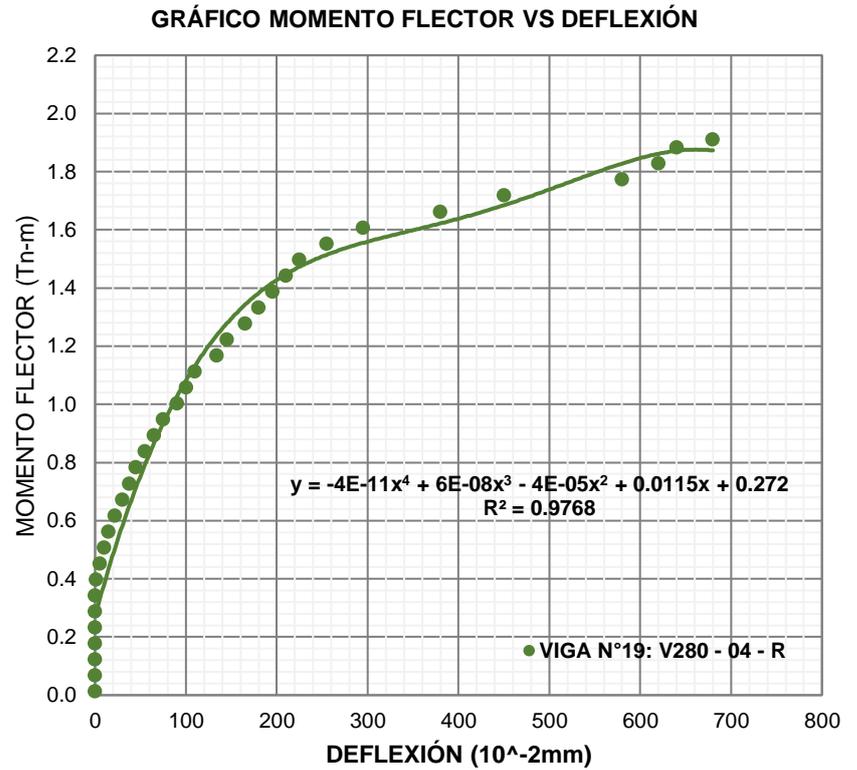
Figura 3.22. Esquema de agrietamiento viga N°18



3.4.2.19. Viga N°19: V280-04-R

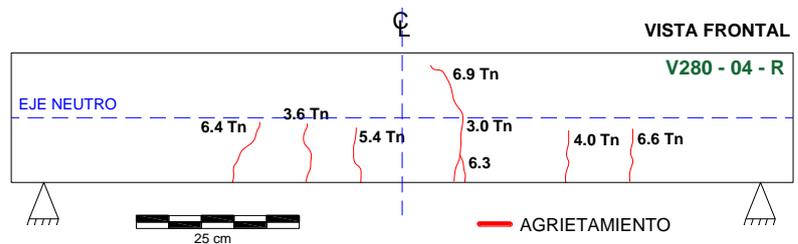
Tabla 3.20. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 19.

VIGA N°19: V280 - 04 - R		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLECCIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	0
1.0	0.286	0
1.2	0.341	0
1.4	0.396	1
1.6	0.451	5
1.8	0.506	10
2.0	0.561	15
2.2	0.616	22
2.4	0.671	30
2.6	0.726	38
2.8	0.781	45
3.0	0.836	55
3.2	0.891	65
3.4	0.946	75
3.6	1.001	90
3.8	1.056	100
4.0	1.111	110
4.2	1.166	134
4.4	1.221	145
4.6	1.276	165
4.8	1.331	180
5.0	1.386	195
5.2	1.441	210
5.4	1.496	225
5.6	1.551	255
5.8	1.606	295
6.0	1.661	380
6.2	1.716	450
6.4	1.771	580
6.6	1.826	620
6.8	1.881	640
6.9	1.908	680



En la figura 3.23 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 19, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

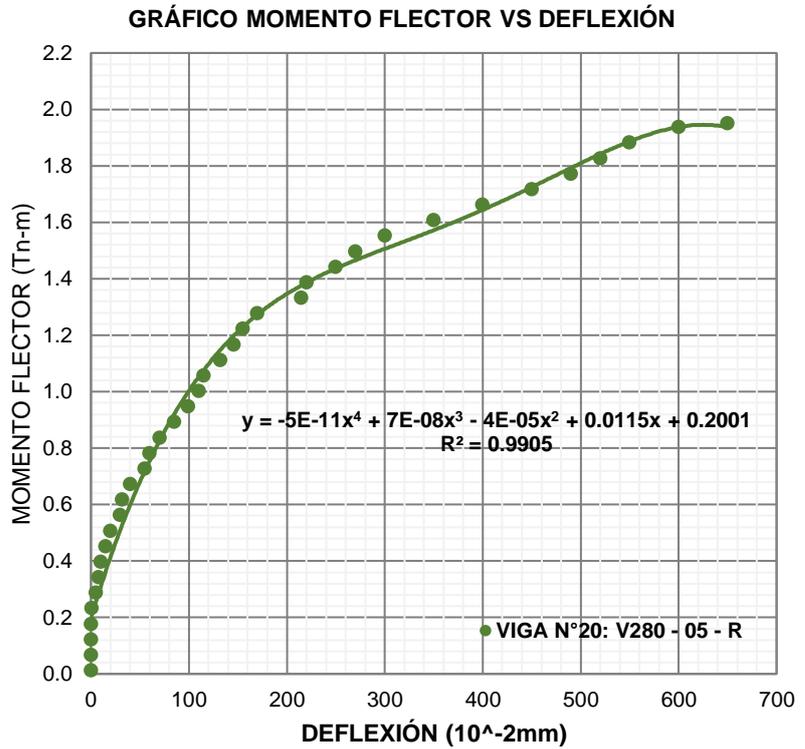
Figura 3.23. Esquema de agrietamiento viga N°19



3.4.2.20. Viga N°20: V280-05-R

Tabla 3.21. Resultados del ensayo a flexión: Viga N° 20.

VIGA N°20: V280 - 05 - R		
CARGA (Tn)	MOMENTO FLECTOR (Tn-m)	DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)
0	0.011	0
0.2	0.066	0
0.4	0.121	0
0.6	0.176	0
0.8	0.231	1
1.0	0.286	5
1.2	0.341	8
1.4	0.396	10
1.6	0.451	15
1.8	0.506	20
2.0	0.561	30
2.2	0.616	32
2.4	0.671	40
2.6	0.726	55
2.8	0.781	60
3.0	0.836	70
3.2	0.891	85
3.4	0.946	99
3.6	1.001	110
3.8	1.056	115
4.0	1.111	132
4.2	1.166	146
4.4	1.221	155
4.6	1.276	170
4.8	1.331	215
5.0	1.386	220
5.2	1.441	250
5.4	1.496	270
5.6	1.551	300
5.8	1.606	350
6.0	1.661	400
6.2	1.716	450
6.4	1.771	490
6.6	1.826	520
6.8	1.881	550
7.0	1.936	600
7.05	1.950	650



En la figura 3.24 se muestra el esquema de agrietamiento de la viga N° 20, así mismo se detalla la carga en el que se produce dicha grieta:

Figura 3.24. Esquema de agrietamiento viga N°20

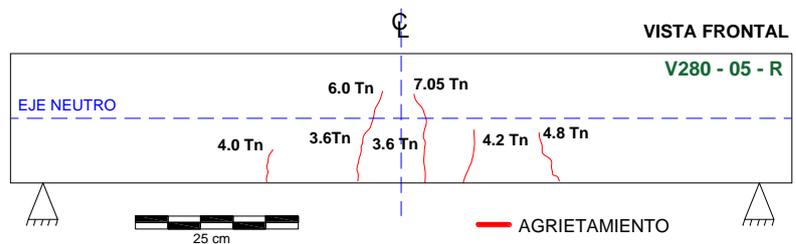


Figura 3.25. Momento Flector vs Deflexión Vigas Patrón Tipo I

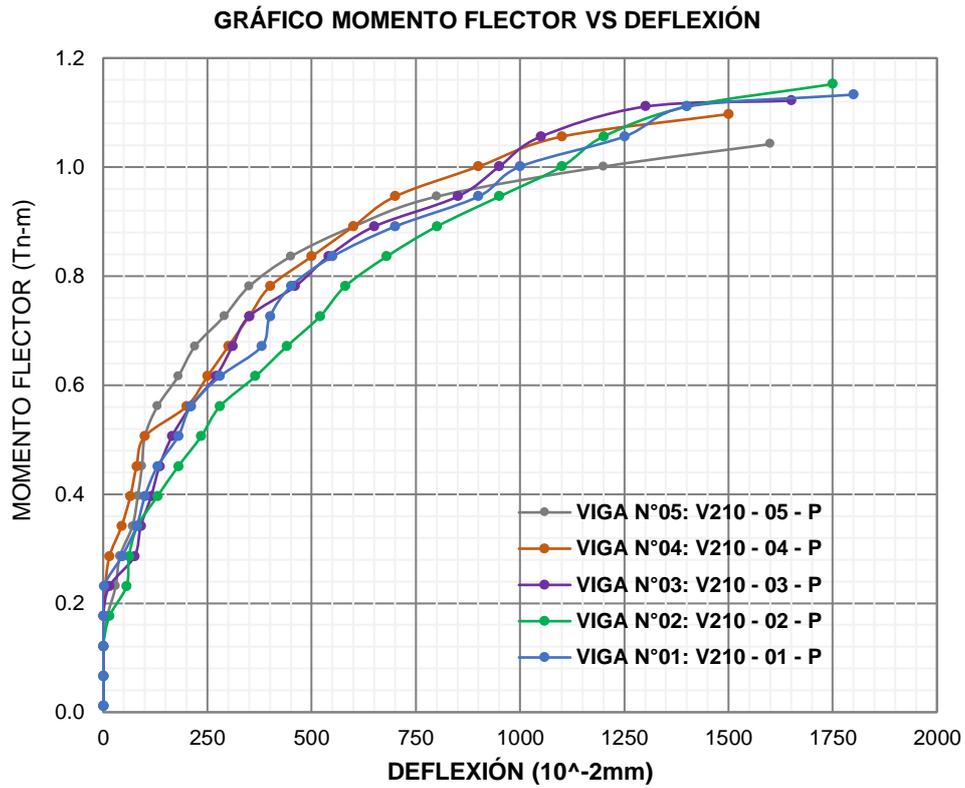


Figura 3.26. Momento Flector vs Deflexión Vigas Reforzadas Tipo I

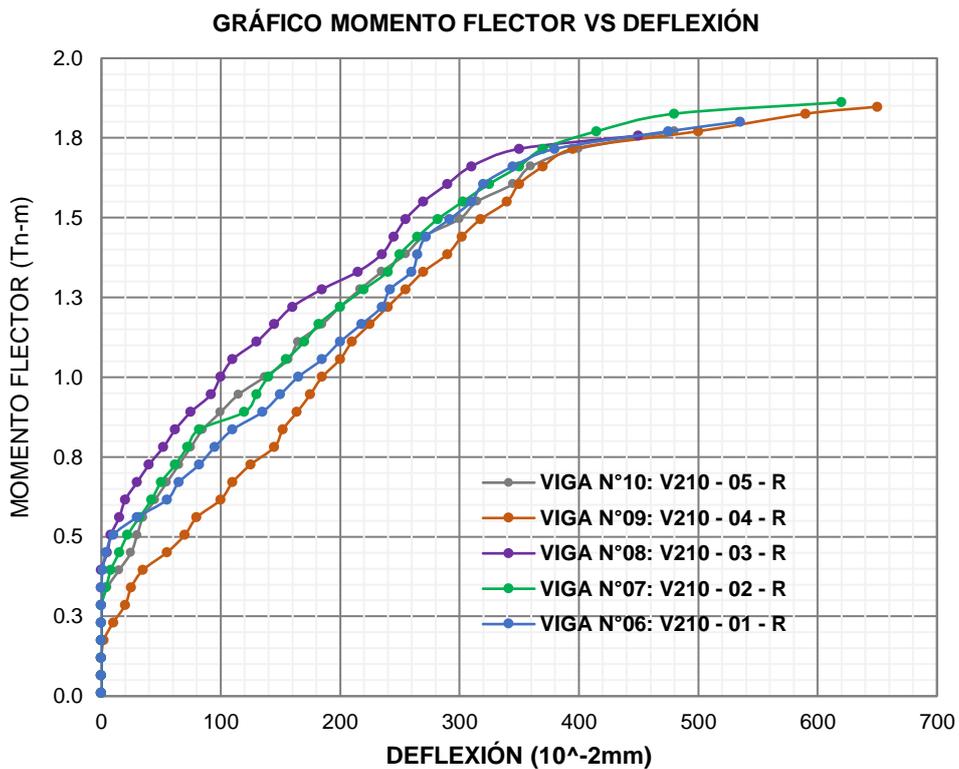


Figura 3.27. Momento Flector vs Deflexión Vigas Patrón Tipo II

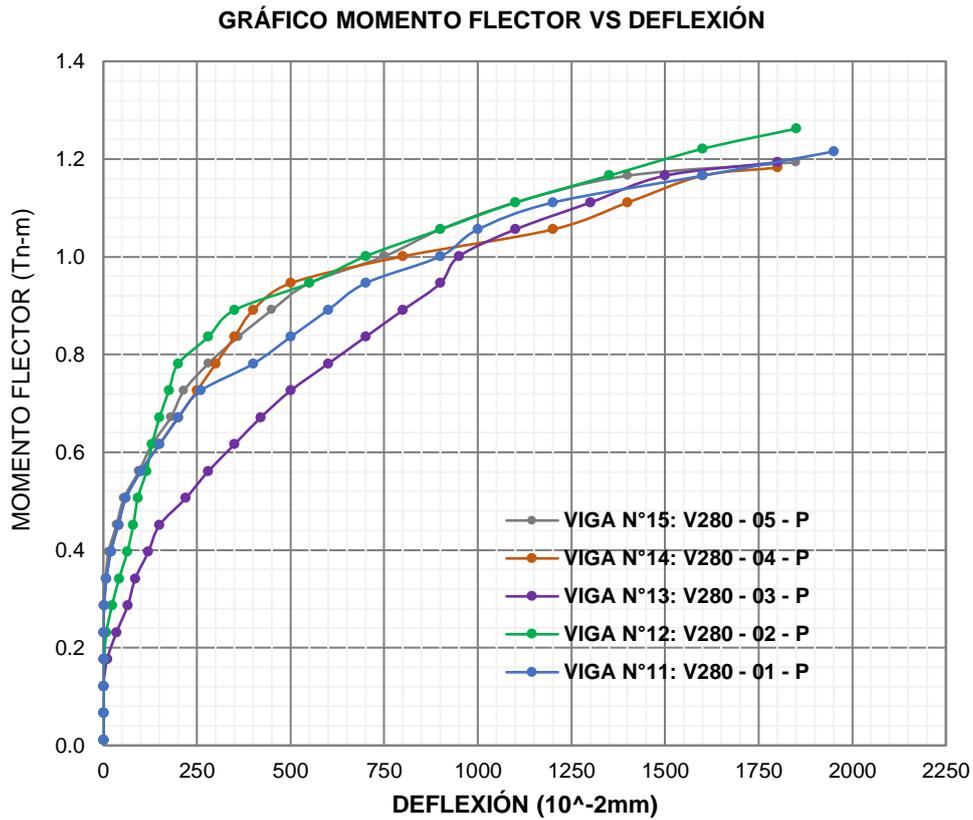
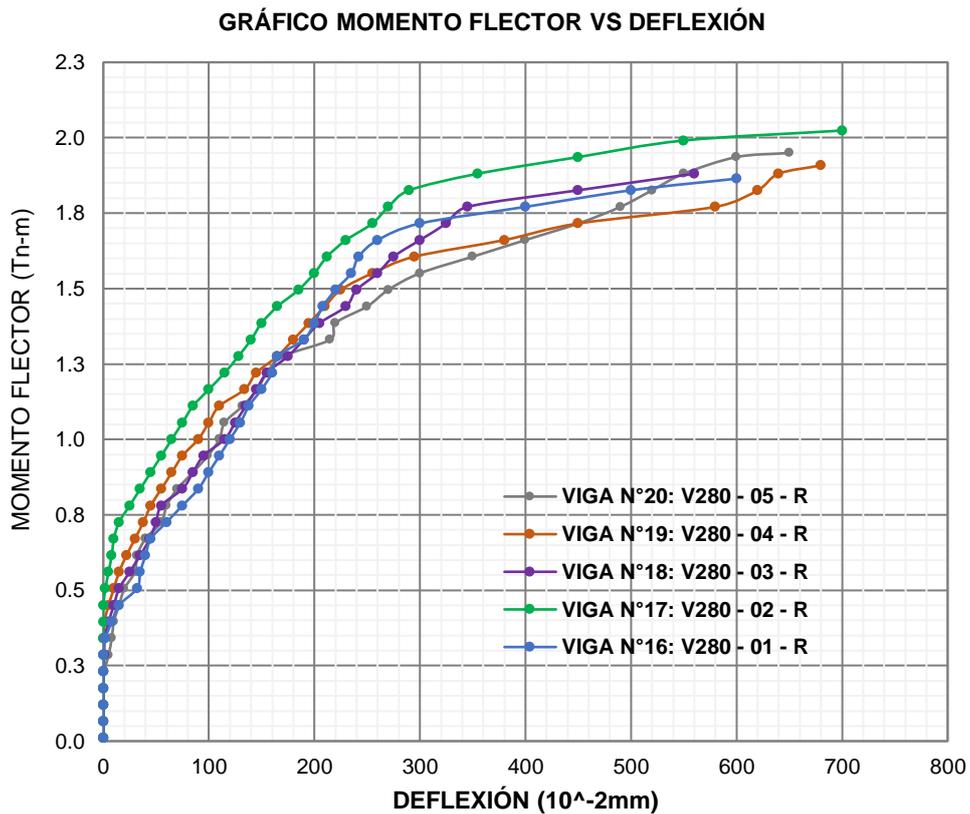


Figura 3.28. Momento Flector vs Deflexión Vigas Reforzadas Tipo II



3.4.2.21. Comparación de Carga Máxima

Tabla 3.22. Resumen de cargas máxima de vigas

TIPO DE VIGA	f ^c (kg/cm ²)	DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	MOMENTO ULTIMO (Tn-m)	PROMEDIO DE MOM. (Tn-m)	CARGA ULTIMA (Tn)	PROMEDIO DE CARGA (Tn)	INCREMENTO DE CARGA (%)
Vigas Tipo I	210	VIGAS PATRÓN	VIGA N°01: V210 - 01 - P	1.133	1.11	4.08	3.99	100%
			VIGA N°02: V210 - 02 - P	1.152		4.15		
			VIGA N°03: V210 - 03 - P	1.122		4.04		
			VIGA N°04: V210 - 04 - P	1.097		3.95		
			VIGA N°05: V210 - 05 - P	1.042		3.75		
		VIGAS REFORZADAS	VIGA N°06: V210 - 01 - R	1.801	1.81	6.51	6.53	163.6%
			VIGA N°07: V210 - 02 - R	1.862		6.73		
			VIGA N°08: V210 - 03 - R	1.757		6.35		
			VIGA N°09: V210 - 04 - R	1.848		6.68		
			VIGA N°10: V210 - 05 - R	1.771		6.40		
Vigas Tipo II	280	VIGAS PATRÓN	VIGA N°11: V280 - 01 - P	1.215	1.21	4.38	4.36	100%
			VIGA N°12: V280 - 02 - P	1.262		4.55		
			VIGA N°13: V280 - 03 - P	1.193		4.30		
			VIGA N°14: V280 - 04 - P	1.182		4.26		
			VIGA N°15: V280 - 05 - P	1.193		4.30		
		VIGAS REFORZADAS	VIGA N°16: V280 - 01 - R	1.864	1.93	6.74	6.96	159.8%
			VIGA N°17: V280 - 02 - R	2.024		7.32		
			VIGA N°18: V280 - 03 - R	1.881		6.80		
			VIGA N°19: V280 - 04 - R	1.908		6.90		
			VIGA N°20: V280 - 05 - R	1.950		7.05		

*Considerando el valor carga máxima promedio de las vigas patrón como el 100 %, obtenemos una comparación en porcentaje respecto a vigas reforzadas.

Figura 3.29. Momento último vs tipo de viga.

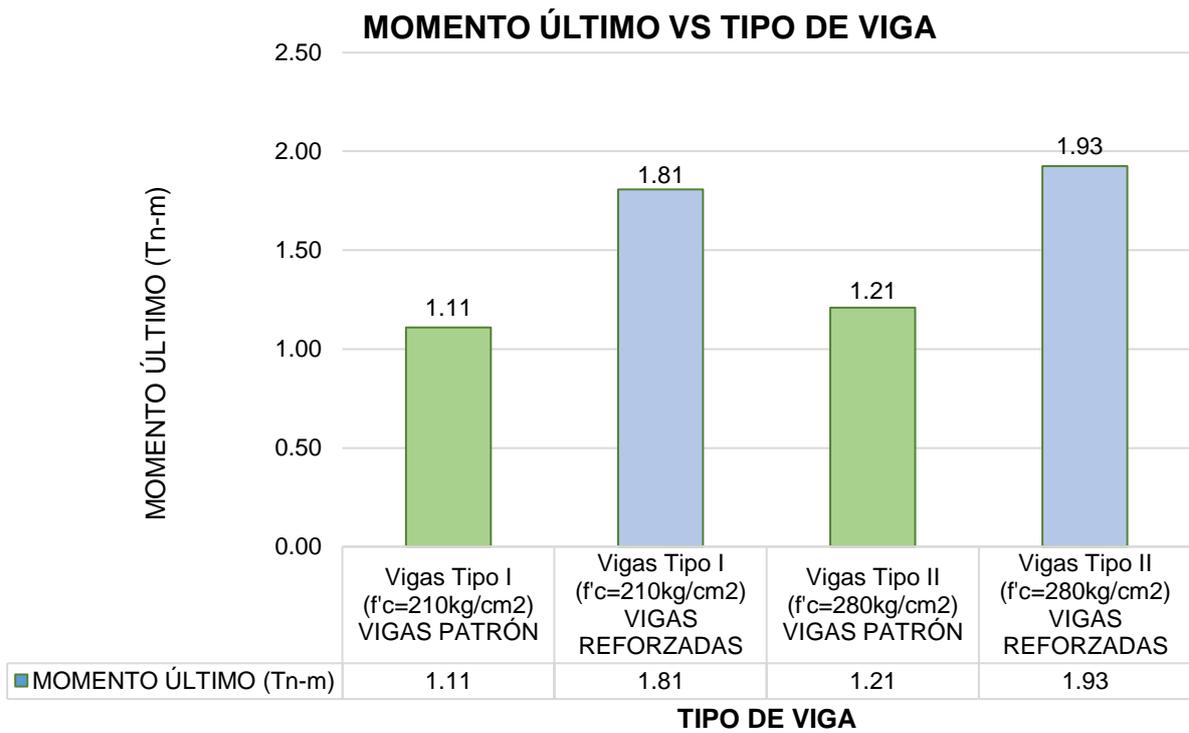


Figura 3.30. Carga ultima vs número de viga

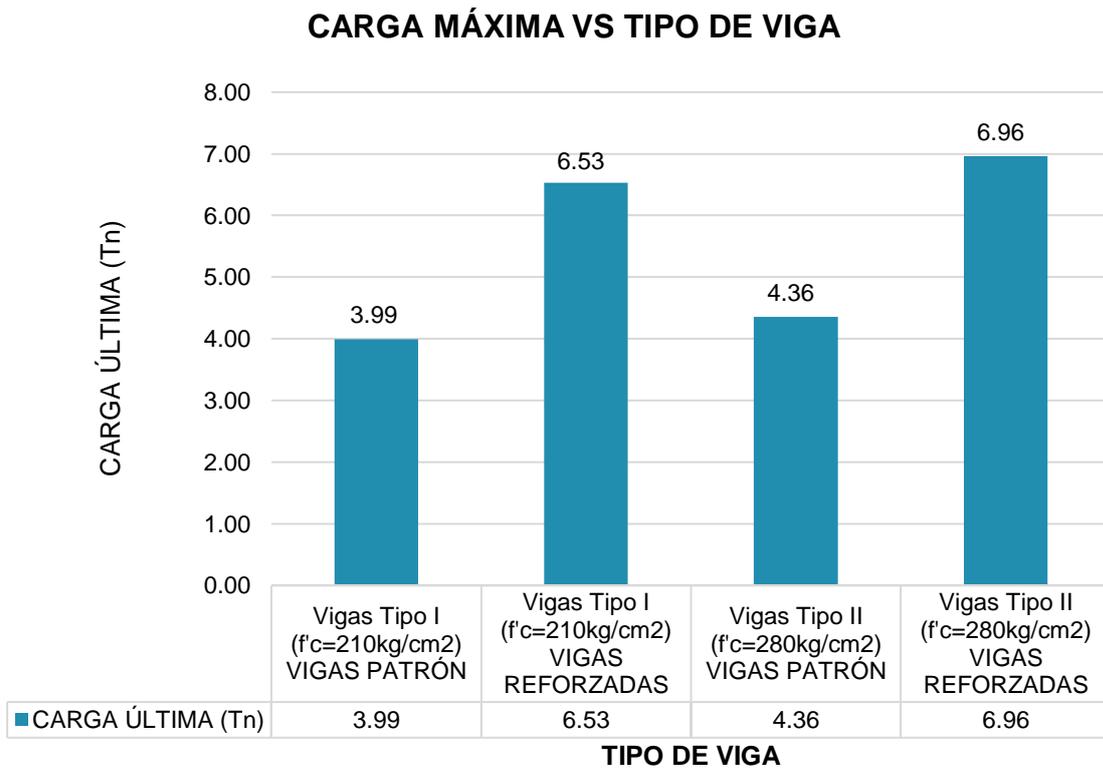
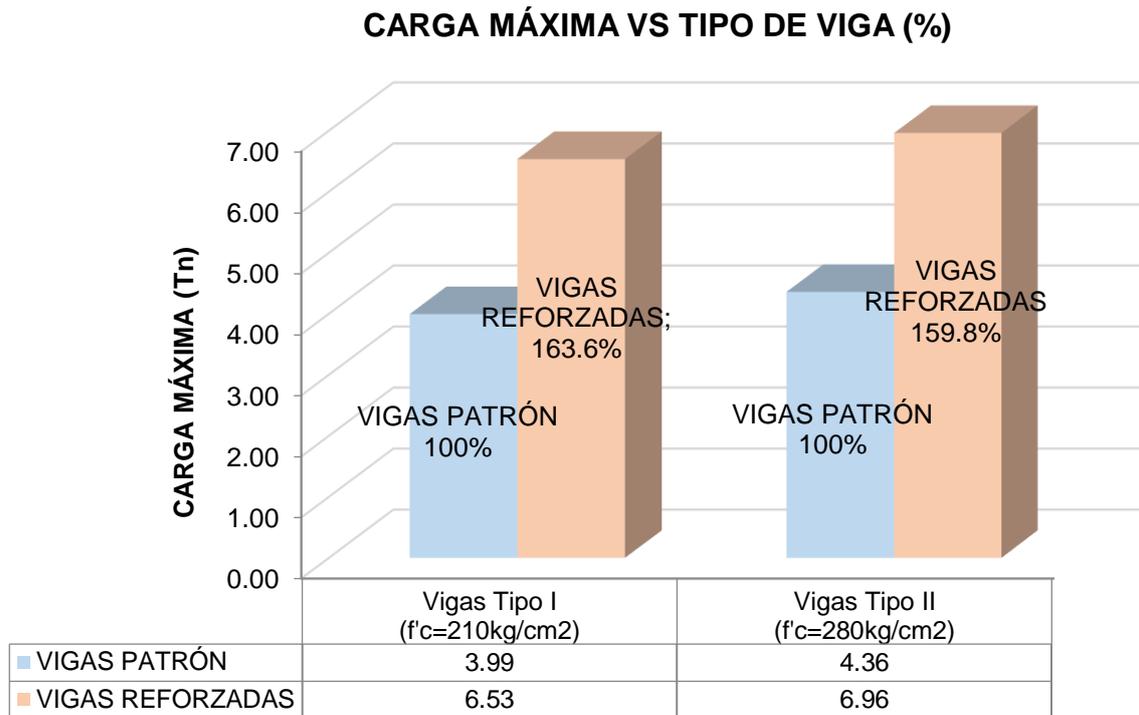


Figura 3.31. Carga máxima vs Viga Tipo I



Considerando el valor carga máxima promedio de las vigas patrón como el 100 %, obtenemos una comparación en porcentaje respecto a vigas reforzadas.

Figura 3.32. Incremento de carga vs tipo de viga

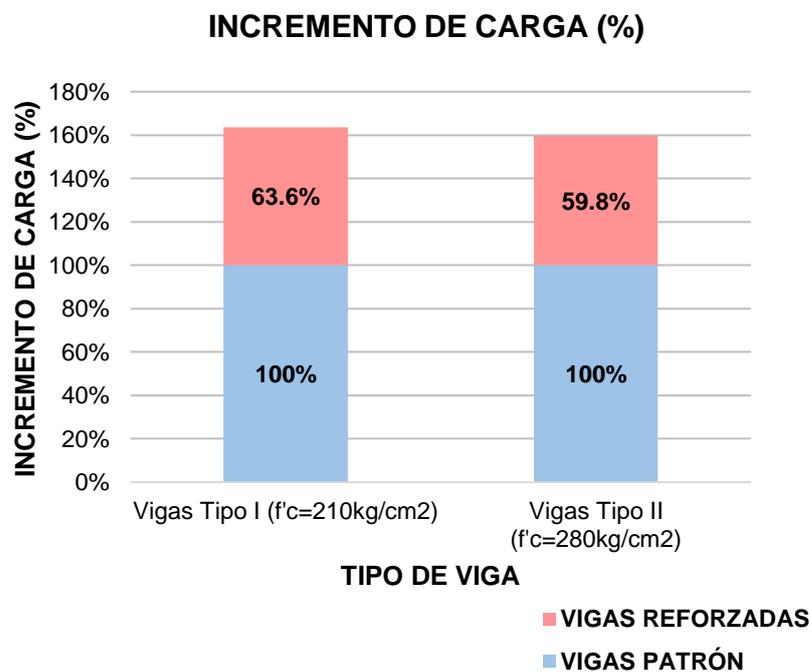


Figura 3.33. Comparación de cargas en las vigas reforzadas con CFRP (TN).

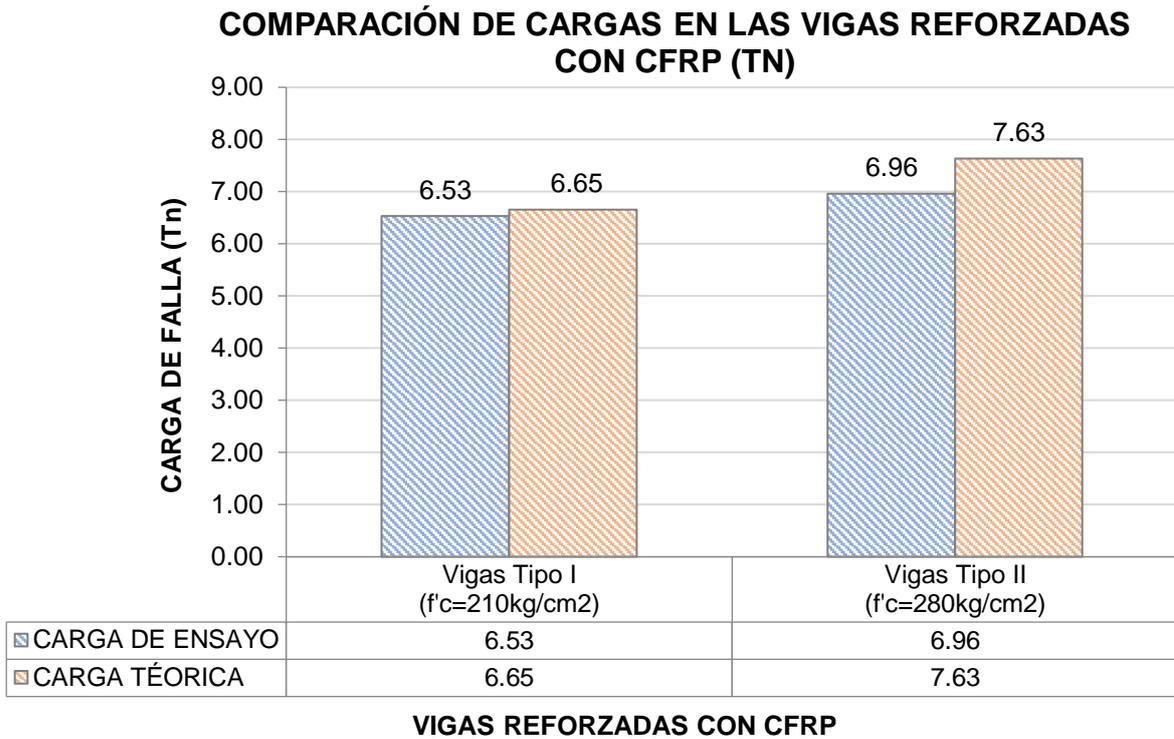
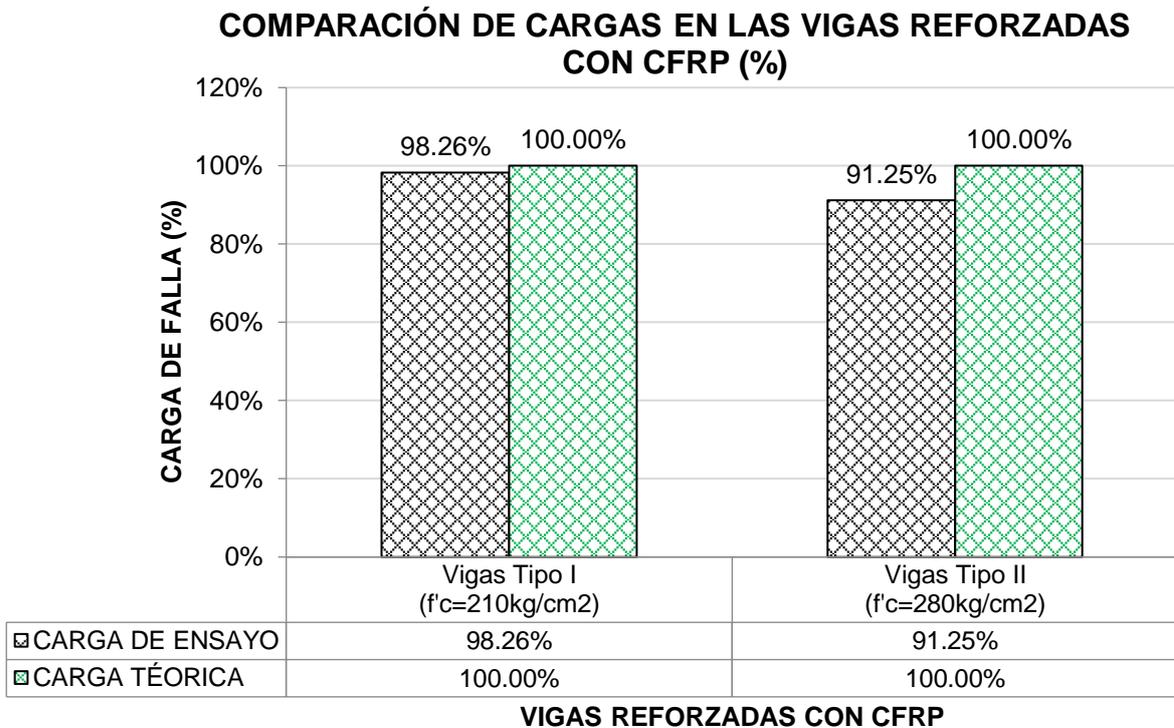


Figura 3.34. Comparación de cargas en las vigas reforzadas con CFRP (%).



Considerando el valor carga teórica de las vigas reforzadas con CFRP como el 100%, obtenemos una comparación en porcentaje respecto a la carga de ensayo.

Tabla 3.23. Deflexión máxima y ancho de fisura de las vigas

TIPO DE VIGA	f'c (kg/cm2)	DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA	DEFLECCIÓN MÁXIMA (mm)	PROMEDIO DEFLECCIÓN (mm)	ANCHO DE FISURA (mm)	PROMEDIO FISURA (mm)
Vigas Tipo I	210	VIGAS PATRÓN	VIGA N°01: V210 - 01 - P	18.0	16.80	4.0	3.96
			VIGA N°02: V210 - 02 - P	18.5		4.3	
			VIGA N°03: V210 - 03 - P	16.5		3.7	
			VIGA N°04: V210 - 04 - P	15.0		4.0	
			VIGA N°05: V210 - 05 - P	16.0		3.8	
		VIGAS REFORZADAS	VIGA N°06: V210 - 01 - R	5.4	5.47	2.1	2.18
			VIGA N°07: V210 - 02 - R	6.2		2.0	
			VIGA N°08: V210 - 03 - R	4.5		2.1	
			VIGA N°09: V210 - 04 - R	6.5		2.4	
			VIGA N°10: V210 - 05 - R	4.8		2.3	
Vigas Tipo II	280	VIGAS PATRÓN	VIGA N°11: V280 - 01 - P	19.5	18.30	3.8	4.06
			VIGA N°12: V280 - 02 - P	17.5		4.0	
			VIGA N°13: V280 - 03 - P	18.0		4.3	
			VIGA N°14: V280 - 04 - P	18.0		4.0	
			VIGA N°15: V280 - 05 - P	18.5		4.2	
		VIGAS REFORZADAS	VIGA N°16: V280 - 01 - R	6.0	6.38	2.2	2.20
			VIGA N°17: V280 - 02 - R	7.0		2.4	
			VIGA N°18: V280 - 03 - R	5.6		2.0	
			VIGA N°19: V280 - 04 - R	6.8		2.3	
			VIGA N°20: V280 - 05 - R	6.5		2.1	

Figura 3.35. Deflexión máxima vs número de viga

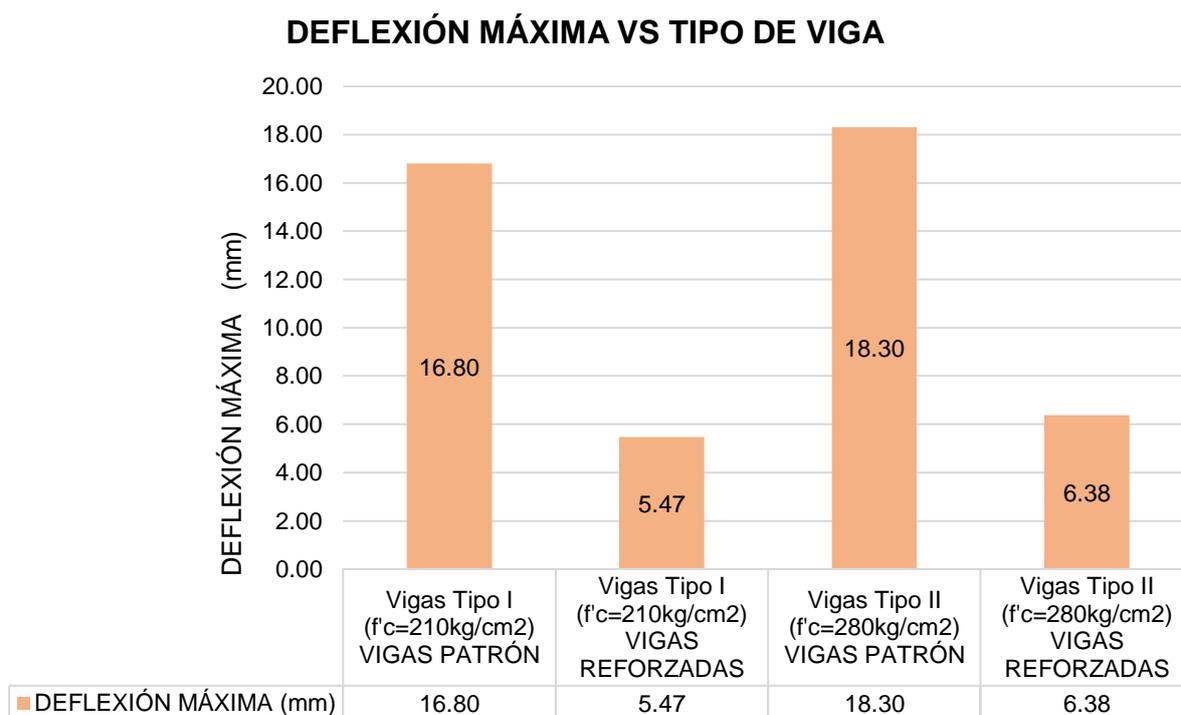
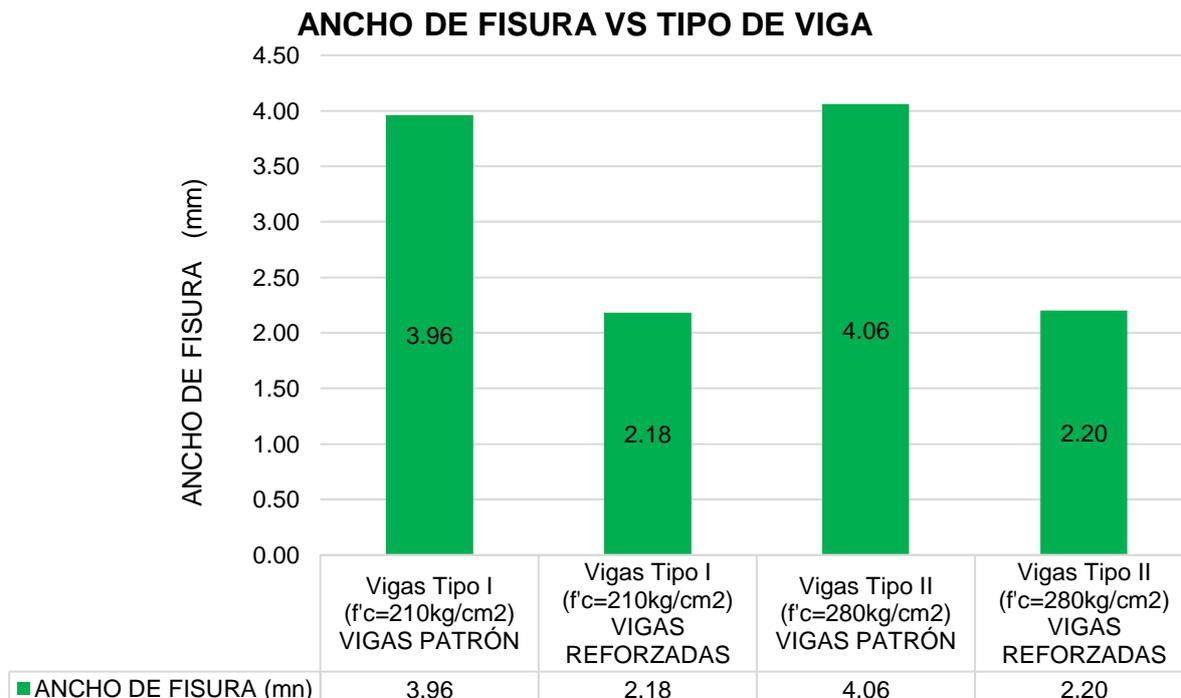


Figura 3.36. Ancho de fisura vs número de viga



CAPÍTULO IV.
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS:

Resultados de los ensayos a Flexión:

Viga N°01 (V210-01-P): Es una viga patrón de un $f'c=210\text{kg/cm}^2$, según la tabla 3.2 presenta una carga última de 4.08 Tn, un momento flector de 1.133 Tn-m y una deflexión máxima de 18 mm indicando que es una falla dúctil. La figura 3.5 muestra el esquema de agrietamiento, lo cual es un agrietamiento típico de rajaduras por flexión además de ser simétrica. La grieta principal surge al lado derecho del centro de la viga, iniciándose con una carga de 2.2 Tn y llegando a 4.0Tn; adicional a esta grieta aparecen 2 más a ambos lados del centro de la viga, de las cuales las más cercanas al centro logran sobrepasar el eje neutro mientras que los 2 restantes quedan debajo de eje para una carga de 3.8Tn.

Viga N°02 (V210-02-P): Es una viga patrón de un $f'c=210\text{kg/cm}^2$, según la tabla 3.3 presenta una carga última de 4.15 Tn, un momento flector de 1.152 Tn-m y una deflexión máxima de 17.5 mm indicando que es una falla dúctil. La figura 3.6 muestra el esquema de agrietamiento, lo cual es un agrietamiento típico de rajaduras por flexión. La grieta principal surge al centro de la viga, iniciándose con una carga de 2.6 Tn y llegando a 4.15Tn; además aparecen grietas cercanas al centro de la viga para cargas de 3.4Tn, 3.6Tn y 3.8Tn que llegan a sobrepasar el eje neutro de la viga, mientras que las grietas restantes se sitúan debajo del eje neutro.

Viga N°03 (V210-03-P): Según la tabla 3.4 esta viga patrón de un $f'c=210\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 4.04 Tn, un momento flector de 1.122 Tn-m y una deflexión máxima de 16.5 mm además se aprecia que es una falla dúctil. La figura 3.7 muestra el esquema de agrietamiento, lo cual es un agrietamiento típico de rajaduras por flexión. La grieta principal surge al centro de la viga, iniciándose con una carga de 2.6 Tn y llegando a 4.0Tn; además se presenta una grieta a cada lado del centro de la viga iniciándose en 2.4Tn hasta 3.8Tn y ambas se ubican encima del eje neutro.

Viga N°04 (V210-04-P): Según la tabla 3.5 esta viga patrón de un $f'c=210\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 3.95 Tn, un momento flector de 1.097 Tn-m y una deflexión máxima de 15 mm además se aprecia que es una falla dúctil. La figura 3.8 muestra el esquema de agrietamiento, lo cual es un agrietamiento típico de rajaduras por flexión. La grieta principal surge al lado derecho de la viga iniciándose en 2.6Tn hasta 3.95Tn. De todas las grietas 4 sobrepasan el eje neutro mientras que una se queda debajo del eje neutro.

Viga N°05 (V210-05-P): Según la tabla 3.6 esta viga patrón de un $f'c=210\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 3.75 Tn, un momento flector de 1.042 Tn-m y una deflexión máxima de 16 mm además se aprecia que es una falla dúctil. La figura 3.9 muestra el esquema de agrietamiento, lo cual es un agrietamiento típico de rajaduras por flexión. La grieta principal surge al centro de la viga iniciándose en 3.6Tn hasta 3.75Tn. De todas las grietas 3 sobrepasan el eje neutro mientras que una se queda debajo de ella.

Viga N°06 (V210-01-R): Según la tabla 3.7 esta viga reforzada con una lámina de Sika CarboDur S512 y un $f'c=210\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 6.51 Tn, un momento flector de 1.801 Tn-m y una deflexión máxima de 5.35 mm. Además, se aprecia que la falla del reforzamiento es por el desprendiendo del concreto en la zona de tracción y el desprendimiento del CFRP, a esto se le suma falla de cohesión por la capa del adhesivo. La figura 3.10 muestra el esquema de agrietamiento, la grieta principal surge al lado izquierdo de la viga generada por una carga de 2.6Tn hasta una carga de 6.51Tn. De todas grietas solo 2 grietas sobrepasan el eje neutro mientras que los 5 restantes se ubican debajo del eje neutro.

Viga N°07 (V210-02-R): Según la tabla 3.8 esta viga reforzada con una lámina de Sika CarboDur S512 y un $f'c=210\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 6.73 Tn, un momento flector de 1.862 Tn-m y una deflexión máxima de 6.2 mm. Además, se aprecia que la falla del reforzamiento es por el desprendiendo del concreto en la zona de tracción y el desprendimiento del CFRP, a esto se le suma falla de cohesión por la capa del adhesivo. La figura 3.11 muestra el esquema de agrietamiento, la grieta principal surge por una carga de 3.2Tn hasta una carga de 6.73 Tn. De todas grietas solo 2 grietas sobrepasan el eje neutro mientras que los 4 restantes se ubican debajo del eje neutro.

Viga N°08 (V210-03-R): Según la tabla 3.9 esta viga reforzada con una lámina de Sika CarboDur S512 y un $f'c=210\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 6.35 Tn, un momento flector de 1.757 Tn-m y una deflexión máxima de 4.50 mm. Además, se aprecia que la falla del reforzamiento es por el desprendiendo del concreto en la zona de tracción y el desprendimiento del CFRP, a esto se le suma falla de cohesión por la capa del adhesivo. La figura 3.12 muestra el esquema de agrietamiento, la grieta principal surge al lado derecho de la viga generada por una carga de 3.0Tn hasta una carga de 5.6Tn.

Viga N°09 (V210-04 R): Según la tabla 3.10 esta viga reforzada con una lámina de Sika CarboDur S512 y un $f'_c=210\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 6.68 Tn, un momento flector de 1.848 Tn-m y una deflexión máxima de 6.5 mm. Además, se aprecia que la falla del reforzamiento es por el desprendimiento del concreto en la zona de tracción y el desprendimiento del CFRP, a esto se le suma falla de cohesión por la capa del adhesivo. La figura 3.13 muestra el esquema de agrietamiento, la grieta principal surge se genera por una carga de 2.0Tn hasta una carga de 6.68Tn.

Viga N°10 (V210-05 R): Según la tabla 3.11 esta viga reforzada con una lámina de Sika CarboDur S512 y un $f'_c=210\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 6.40 Tn, un momento flector de 1.771 Tn-m y una deflexión máxima de 4.80 mm. Además, se aprecia que la falla del reforzamiento es por el desprendimiento del concreto en la zona de tracción y el desprendimiento del CFRP, a esto se le suma falla de cohesión por la capa del adhesivo. La figura 3.14 muestra el esquema de agrietamiento, la grieta principal surge se genera por una carga de 2.8Tn hasta una carga de 6.40Tn.

Viga N°11 (V280-01-P): Es una viga patrón de un $f'_c=280\text{kg/cm}^2$, según la tabla 3.12 presenta una carga última de 4.38 Tn, un momento flector de 1.215 Tn-m y una deflexión máxima de 19.5 mm indicando que es una falla dúctil. La figura 3.15 muestra el esquema de agrietamiento, lo cual es un agrietamiento típico de rajaduras por flexión además de ser simétrica. La grieta principal surge al centro de la viga, iniciándose con una carga de 2.5 Tn y llegando a 4.35Tn.

Viga N°12 (V280-02-P): Es una viga patrón de un $f'_c=280\text{kg/cm}^2$, según la tabla 3.13 presenta una carga última de 4.55 Tn, un momento flector de 1.262 Tn-m y una deflexión máxima de 18.5 mm indicando que es una falla dúctil. La figura 3.16 muestra el esquema de agrietamiento, lo cual es un agrietamiento típico de rajaduras por flexión. La grieta principal surge al centro de la viga, iniciándose con una carga de 2.6 Tn y llegando a 4.55Tn.

Viga N°13 (V280-03-P): Según la tabla 3.14 esta viga patrón de un $f'_c=280\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 4.3 Tn, un momento flector de 1.193 Tn-m y una deflexión máxima de 19 mm además se aprecia que es una falla dúctil. La figura 3.17 muestra el esquema de agrietamiento, lo cual es un agrietamiento típico de rajaduras por flexión. La grieta principal surge el lado izquierdo del centro de la viga, iniciándose con una carga de 2.0 Tn y llegando a 4.3Tn; de todas las grietas 3 sobrepasan el eje neutro y 2 quedan debajo para una carga de 4Tn.

Viga N°14 (V280-04-P): Según la tabla 3.15 esta viga patrón de un $f'c=280\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 4.26 Tn, un momento flector de 1.182 Tn-m y una deflexión máxima de 18 mm además se aprecia que es una falla dúctil. La figura 3.18 muestra el esquema de agrietamiento, lo cual es un agrietamiento típico de rajaduras por flexión. La grieta principal surge al centro de la viga iniciándose en 2.0Tn hasta 4.2Tn. Todas las grietas Sobrepasan el eje neutro.

Viga N°15 (V280-05-P): Según la tabla 3.16 esta viga patrón de un $f'c=280\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 4.30 Tn, un momento flector de 1.193 Tn-m y una deflexión máxima de 18.5 mm además se aprecia que es una falla dúctil. La figura 3.19 muestra el esquema de agrietamiento, lo cual es un agrietamiento típico de rajaduras por flexión. La grieta principal surge al centro de la viga iniciándose en 2.6Tn hasta 4.30Tn. De todas las grietas 4 sobrepasan el eje neutro mientras que 3 se quedan debajo del eje.

Viga N°16 (V280-01-R): Según la tabla 3.17 esta viga reforzada con una lámina de Sika CarboDur S512 y un $f'c=280\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 6.74 Tn, un momento flector de 1.864 Tn-m y una deflexión máxima de 6.0 mm. Además, se aprecia que la falla del reforzamiento es por el desprendiendo del concreto en la zona de tracción y el desprendimiento del CFRP, a esto se le suma falla de cohesión por la capa del adhesivo. La figura 3.20 muestra el esquema de agrietamiento, la grieta principal surge al lado derecho de la viga generada por una carga de 2.8Tn hasta una carga de 6.7Tn.

Viga N°17 (V280-02-R): Según la tabla 3.18 esta viga reforzada con una lámina de Sika CarboDur S512 y un $f'c=280\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 7.32 Tn, un momento flector de 2.024 Tn-m y una deflexión máxima de 7 mm. Además, se aprecia que la falla del reforzamiento es por el desprendiendo del concreto en la zona de tracción y el desprendimiento del CFRP, a esto se le suma falla de cohesión por la capa del adhesivo. La figura 3.21 muestra el esquema de agrietamiento, la grieta principal surge por una carga de 3.2Tn hasta una carga de 7.32 Tn.

Viga N°18 (V280-03-R): Según la tabla 3.19 esta viga reforzada con una lámina de Sika CarboDur S512 y un $f'c=280\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 6.8 Tn, un momento flector de 1.881 Tn-m y una deflexión máxima de 5.60 mm. Además, se aprecia que la falla del reforzamiento es por el desprendiendo del concreto en la zona de tracción y el desprendimiento del CFRP, a esto se le suma falla de cohesión por la capa del adhesivo.

La figura 3.22 muestra el esquema de agrietamiento, la grieta principal surge al lado derecho de la viga generada por una carga de 3.0Tn hasta una carga de 6.8Tn.

Viga N°19 (V280-04 R): Según la tabla 3.20 esta viga reforzada con una lámina de Sika CarboDur S512 y un $f'c=280\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 6.90 Tn, un momento flector de 1.908 Tn-m y una deflexión máxima de 6.8 mm. Además, se aprecia que la falla del reforzamiento es por el desprendimiento del concreto en la zona de tracción y el desprendimiento del CFRP, a esto se le suma falla de cohesión por la capa del adhesivo. La figura 3.23 muestra el esquema de agrietamiento, la grieta principal surge por una carga de 6.9Tn.

Viga N°20 (V280-05 R): Según la tabla 3.21 esta viga reforzada con una lámina de Sika CarboDur S512 y un $f'c=280\text{kg/cm}^2$ presenta una carga última de 7.05 Tn, un momento flector de 1.950 Tn-m y una deflexión máxima de 6.50 mm. Además, se aprecia que la falla del reforzamiento es por el desprendimiento del concreto en la zona de tracción y el desprendimiento del CFRP, a esto se le suma falla de cohesión por la capa del adhesivo. La figura 3.24 muestra el esquema de agrietamiento, la grieta principal surge por una carga de 7.05Tn.

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS CONTRASTADOS CON ANTECEDENTES TEÓRICOS:

De los resultados obtenidos se llega a coincidir con Beltrán A. (2011) ya que concluimos que el uso de materiales compuestos por fibra de carbono, en este caso Sika CarboDur adherido en una matriz de epóxico Sikadur - 30, como reforzamiento a flexión en elementos de concreto armado es muy eficiente.

También se afirma con lo mencionado por Duque A., Amazo I. Ruiz D. (2010), que la alternativa de refuerzo con CFRP es viable y fácil de implementar en estructuras de concreto debido a la limpieza del proceso, al bajo peso de las fibras y a la rapidez del proceso.

Por otro lado, se mantiene concordancia con la investigación realizada por Alegre G. (2017), pues la resistencia a flexión alcanzada en el laboratorio está en el rango de 59-64%.

Sin embargo, se mantiene una discrepancia con la investigación de Calla F., Torres J. (2015) debido a que el aumento de resistencia determinada en su investigación fue de un 30% a un 40% sin embargo los resultados de la presente investigación se encuentran en un rango de 59-64%.

Así mismo no se concuerda con la investigación de Cutti K. (2015), puesto que menciona que las vigas reforzadas incrementan la resistencia en 1Tn a las vigas normales, pero de los resultados obtenidos en laboratorio se comprobó que este aumento es mayor a 2Tn.

4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS CONTRASTADOS CON BASES TEÓRICAS:

Los resultados que se presentan en las figuras 3.30 y 3.31, muestran las cargas en que fallaron las vigas reforzadas con láminas de fibras de carbono (Sika CarboDur) durante el ensayo del laboratorio, así mismo se muestra la carga de falla calculada teóricamente según la normativa del ACI 440.2R, de estos resultados se puede indicar que:

En las vigas reforzadas tipo I ($f'_c=210\text{Kg/cm}^2$) la carga de falla del ensayo es muy similar a la carga de falla calculada según el ACI 440.2R, siendo los siguientes: 6.53Tn y 6.65Tn respectivamente. La carga de ensayo resultó con un 1.74% menos que la carga teórica.

En las vigas reforzadas tipo II ($f'_c=280\text{Kg/cm}^2$) la carga de falla del ensayo y la carga de falla calculada según el ACI 440.2R existen cierta discordancia, siendo los siguientes: 6.96Tn y 7.63Tn respectivamente. La carga de ensayo resultó con un 8.75% menos que la carga teórica.

4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS CONTRASTADOS CON LA HIPÓTESIS:

De acuerdo a los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio, las vigas de concreto armado que fueron reforzadas con láminas de fibras de carbono (Sika CarboDur S512 y a su adhesivo especial Sikadur -30) con respecto a las vigas de concreto armado patrones de las vigas tipo I y tipo II, tuvieron un aumento considerable a la resistencia a la flexión, esta resistencia expresada en porcentaje es de un 59% a un 64% respecto a las vigas sin reforzar. De igual manera las láminas de fibras de carbono influyen en la ductilidad, ya que una viga reforzadas es más dúctil que una viga normal.

Finalmente se descartaría la hipótesis inicial planteada, de acuerdo a los datos del laboratorio.

CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES:

Finalizado el presente trabajo de investigación se llegaron a las siguientes conclusiones:

- La variación de la resistencia a la flexión de las vigas de concreto armado reforzadas con láminas de fibras de carbono (Sika CarboDur S512), con respecto a las vigas de concreto armado patrones fue de: 63.6% y 59.8% para el Tipo I y Tipo II respectivamente.
- En las vigas tipo I, las vigas patrón alcanzaron una resistencia a la flexión de 3.99Tn; mientras que, las vigas reforzadas con láminas de fibras de carbono llegaron a una resistencia de 6.53Tn; es decir, se logró incrementar 2.54Tn. De igual manera en las vigas tipo II, las vigas patrón alcanzaron una resistencia a la flexión de 4.36Tn; mientras que, las vigas reforzadas con láminas de fibras de carbono llegaron a una resistencia de 6.96Tn, incrementándose en 2.60Tn.
- En las vigas tipo I, las vigas patrón alcanzaron un momento flector de 1.1Tn-m y una deflexión máxima de 16.8mm; mientras que, las vigas reforzadas llegaron a un momento flector de 1.81Tn-m y una deflexión máxima de 5.47mm; es decir, el momento flector se incrementó en 0.7 Tn-m y la deflexión disminuyó en 11.33mm. De igual manera en las vigas tipo II, las vigas patrón alcanzaron un momento flector de 1.21Tn-m y una deflexión máxima de 18.30mm; mientras que, las vigas reforzadas llegaron a un momento flector de 1.93Tn-m y una deflexión máxima de 6.38mm; es decir, el momento flector se incrementó en 0.72Tn-m y la deflexión se disminuyó en 11.92mm.
- Finalmente, de los resultados obtenidos en el laboratorio concluimos que: las fibras de carbono (Sika CarboDur S512) son muy eficientes ya que aumentan la resistencia a la flexión de las vigas y también aumentan la ductilidad de las mismas, evitando así las deflexiones excesivas. También se llegó a la conclusión que: la adhesión entre lámina de fibra de carbono y el concreto juegan un papel importante en la resistencia, pues una mala adherencia provocaría que fibras no alcancen su resistencia final de diseño.

5.2. RECOMENDACIONES:

Para futuros trabajos de investigación relacionadas con láminas de fibras de carbono se hacen las siguientes recomendaciones:

1. Evaluar la efectividad de la unión lámina de fibra de carbono y el sustrato concreto.
2. Evaluar la efectividad de las fibras de carbono, en el aumento de la resistencia a la flexión de vigas de concreto armado en más de una capa y en más de una fila.
3. Evaluar las fibras de carbono como medio para aumentar la resistencia al cortante en vigas de concreto armado.
4. Evaluar las láminas de fibras de carbono en vigas de concreto armado que conforman un pórtico, ya que esta investigación solo se limitó a ensayar vigas de concreto armado simplemente apoyadas.
5. Realizar un estudio más detallado del efecto de escala para elementos de concreto armado.
6. Verificar que la superficie en la que se va a colocar la lámina debe estar sana, limpia, seca, libre de partes sueltas, contaminación de grasa, aceite, polvo, entre otras materias extrañas.
7. Sellar todas las grietas del elemento que se refuerza, ya que debe ser una estructura monolítica donde se coloque el refuerzo CFRP.
8. Determinar las patologías de la estructura (evaluación del acero existente, presencia de fisuras, determinación de la resistencia del concreto) antes de diseñar el reforzamiento fibra de carbono.
9. Evaluar las fibras de carbono con algún dispositivo de anclaje en la sección de la unión viga – columna, de tal manera, que fibra desarrolle toda su capacidad.
10. Investigar más detalle sobre desprendimiento prematuro de las láminas de fibras de carbono en vigas de concreto armado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ✂ Alegre Gago, G. (2017). Estudio de la Influencia en la Resistencia y Ductilidad de las Fibras de Carbono utilizadas como Reforzamiento de Vigas de Concreto Armado. Tesis Ing. Lima, Perú, Pontifica Universidad Católica Del Perú. 73 p.
- ✂ American Concrete Institute. (2014). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-14). Michigan, USA, Farmington Hills. p 48, 369-371.
- ✂ American Concrete Institute. (2017). Guía para el diseño y construcción de sistemas FRP externamente adherido para refuerzo de estructuras de concreto (ACI 440.2R-17). Michigan, USA, Farmington Hills. p 24-31. p 44,45.
- ✂ Astorga, A.; Rivero, P. (2009). Definición de Términos Básicos. Centro de Investigación de Gestión de Riesgos. Mérida, Venezuela. p 3-26.
- ✂ Baca Escobar, W.; Espinoza Anaya, C.; Baca Escobar, E. (2009). Comportamiento de Vigas de Concreto Reforzadas con Fibras de Carbono en Ensayos A Escala Natural. Tesis Ing. Lima, Perú, Universidad Ricardo Palma. p 1,21.
- ✂ Blanco Blasco, A. (2011). Estructuración y Diseño de Edificaciones de Concreto Armado. Ed. act. Lima, Perú, Priceliness. p.25,138, 249
- ✂ Beltrán Riveros A. (2011). Uso de fibras de carbono como reforzamiento a flexión en vigas de concreto reforzado. Tesis Ing. Bogotá D.C., Colombia, Universidad de Salle. p. 36,37,144.
- ✂ Calla Deza, F.J.; Torres Almirón, J.C. (2015). Reforzamiento por Flexión de Vigas de Concreto Armado con Fibra De Carbono. Tesis Ing. Arequipa, Perú, Universidad Nacional Católica Santa María. 269 p.
- ✂ Cutti Huallpa, K. (2015). Análisis Experimental del uso de las Fibras de Carbono para el Reforzamiento en una Viga Peraltada, de Concreto Armado para una Edificación en la Ciudad de Lircay Angaraes Huancavelica. Tesis Ing. Huancavelica, Perú, Universidad Nacional de Huancavelica.111p
- ✂ Duque, A.; Amazo, I.; Ruiz, D. (2010). Ensayos de Resistencia de Pórticos de Concreto a Escala, Reforzados con CFRP en los Nudos. Artículo de Investigación. Bogotá, Colombia, Pontificia Universidad Javeriana. 92p
- ✂ Eligehausen, R.; Ozbolt, J. (1995). Size Effect In Concrete And Reinforced Concrete Structures. Institue for Building Materials, Stuttgart University, Germany, 666p
- ✂ Eligehausen, R.; Ozbolt, J. (1995). Size Effect in Concrete Structures. Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, Germany. 17p

- ✗ Flores Tantalean, L. (2013). Fibras de carbono: Reforzamiento de estructuras. PUCP Civilizate, Vol 3, p 46-48.
- ✗ González Cuevas, O. M.; Guerrero Correa , J. J.; Arroyo Espinoza, D.; Quiroz Soto, L. (2002). Efecto de la fibra de carbono en las propiedades mecánicas de vigas de concreto reforzado. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C. p 935-946
- ✗ Harmsen, T. (2002). Diseño de Estructuras de Concreto Armado. 5 Ed. Lima, Perú, PUCP. p. 77-147.
- ✗ Ibáñez López, C.H. (2013). Diseño del Reforzamiento para la Reparación o Aumento de Capacidad de Carga de Vigas para Puentes de Concreto Reforzado Utilizando Fibras de Carbono. Tesis Ing. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. p. 24-46, 131
- ✗ Lezama Leiva, J. (2013). Tecnología del concreto. Cajamarca, Perú, UNC. 79 p.
- ✗ McCormac. J.C; Brown, R.H. (2011). Diseño de Concreto reforzado. Octava Edición con el Código ACI 318-08. Alfaomega Grupo Editor. México. p 1,2,700
- ✗ Ministerio de vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). Cargas. NTE E.020. Lima, Perú, ICG. 1 p.
- ✗ Ministerio de vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). Concreto Armado. NTE E.060. Lima, Perú, ICG. 26,28,29 p.
- ✗ Moncayo, M.; Rodríguez, J.; et al. (2016). “Las fibras de carbono como una alternativa para reforzamiento de estructuras”. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 29-1, pp. 57-62.
- ✗ Moncayo Theurer, M.; Rodríguez, J.; Alcívar; López; Soriano; Villacis. (2016). Las fibras de carbono como una alternativa para reforzamiento de estructuras. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, México p 57-62
- ✗ Morales, R. (2012). Diseño en Concreto Armado. Lima, Perú, Hozlo. 367 p.
- ✗ NTP 339.034. (2015). Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas. Lima, Perú, INDECOPI. 23 p.
- ✗ NTP 339.079. (2012). Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas en el centro del tramo. Lima, Perú, INDECOPI. 13 p.
- ✗ NTP 339.185. (2013). Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado. Lima, Perú, INDECOPI. 12 p.

- ✗ NTP 400.012. (2013). Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global. Lima, Perú, INDECOPI. 20 p.
- ✗ NTP 400.017. (2016). Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad (“Peso Unitario”) y los vacíos en los agregados. Lima, Perú, INDECOPI. 21 p.
- ✗ NTP 400.022. (2013). Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino. Lima, Perú, INDECOPI. 25 p.
- ✗ Ojeda, M. (2011). Tecnología de los plásticos. Consultado el 01 de Julio 2018. Disponible en: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.pe/2011/11/fibra-de-carbono.html>
- ✗ Oller, E., Marí, A., Bellido, L. (2013). Dimensionamiento del refuerzo a flexión con laminados de polímeros reforzados con fibras (FRP) evitando su desprendimiento prematuro. Informes de la Construcción, Vol 65, 532. p519-531.
- ✗ Proaño Tataje, LR. (2011). Comportamiento de Vigas de Concreto Armado Reforzadas Externamente con Platinas de Fibras de Carbono. Tesis MC. Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. 291p
- ✗ Rios, R.; Riera, J. (2004). Size effects in the analysis of reinforced concrete structures. Civil Engineering Department, PPGEC, School of Engineering, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brazil. 1115p
- ✗ Rivva López, E. (2014). Diseño de Mezclas. 2 Ed. Lima, Perú, ICG. 208 p.
- ✗ Rosero Landeta, LF. (2013). Reforzamiento de estructuras de hormigón armado con FRP. Aplicación al caso de refuerzo de una losa y columnas de un salón de audiovisuales y un auditorio. Tesis Ing. Sangolqui, Ecuador, Escuela Politécnica del Ejército. 20p

APÉNDICE:

APÉNDICE I: FICHA DE OBSERVACIONES:

ENSAYO A FLEXIÓN

TESIS : "VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS CON LÁMINAS DE FIBRAS DE CARBONO (CFRP)"

TESISTA : SANTOS EDWIN AQUINO CUSQUISIBAN.

LUGAR : LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FECHA : _____

NÚMERO DE VIGA : _____

VIGA N°		
CARGA (Tn)	DEFLEXIÓN (10 ⁻² mm)	OBSERVACIONES
0.00		
0.02		
0.04		
0.06		
0.08		
0.10		
0.12		
0.14		
0.16		
0.18		
0.20		
0.22		
0.24		
0.26		
0.28		
0.30		
0.32		
0.34		
0.36		
0.38		
0.40		
0.42		
0.44		
0.46		
0.48		
0.50		
0.52		
0.54		
0.56		
0.58		
0.60		
0.62		
0.64		
0.66		
0.68		
0.70		
0.72		

CARGA ÚLTIMA: _____

TIEMPO DE ENSAYO: _____

ESPEJOR DE FALLA: _____

OTRAS OBSERVACIONES:

--

ANEXOS:

ANEXO I: ILUSTRACIONES DEL DESARROLLO DE LA TESIS:



Figura 7.1. Extracción de agregados de la cantera La Victoria.



Figura 7.2. Agregado Fino - Agregado Grueso



Figura 7.3. Ensayo de contenido de humedad.



Figura 7.4. Ensayo de análisis granulométrico de agregados.



Figura 7.5. Saturación por 24 horas del agregado fino y del agregado grueso.



Figura 7.6. Agregado grueso en estado de saturado con superficie seca.



Figura 7.7. Ensayo de peso específico del agregado grueso.



Figura 7.8. Agregado fino en estado de saturado con superficie seca.



Figura 7.9. Ensayo de Peso específico agregado fino.



Figura 7.10. Peso unitario suelto del agregado fino.



Figura 7.11. Peso unitario suelto compactado del agregado fino.



Figura 7.12. Peso unitario suelto del agregado grueso.



Figura 7.13. *Peso unitario suelto compactado del agregado grueso.*



Figura 7.14. *Ensayo de porcentaje de finos que pasan el tamiz N°200.*



Figura 7.15. *Diseño de mezcla, ensayo de asentamiento del concreto y elaboración de probetas cilíndricas.*



Figura 7.16. Ensayo a compresión de probetas de concreto a los 7 días ($f'c=210\text{kg/cm}^2$).



Figura 7.17. Ensayo a compresión de probetas de concreto a los 7 días ($f'c=280\text{kg/cm}^2$).

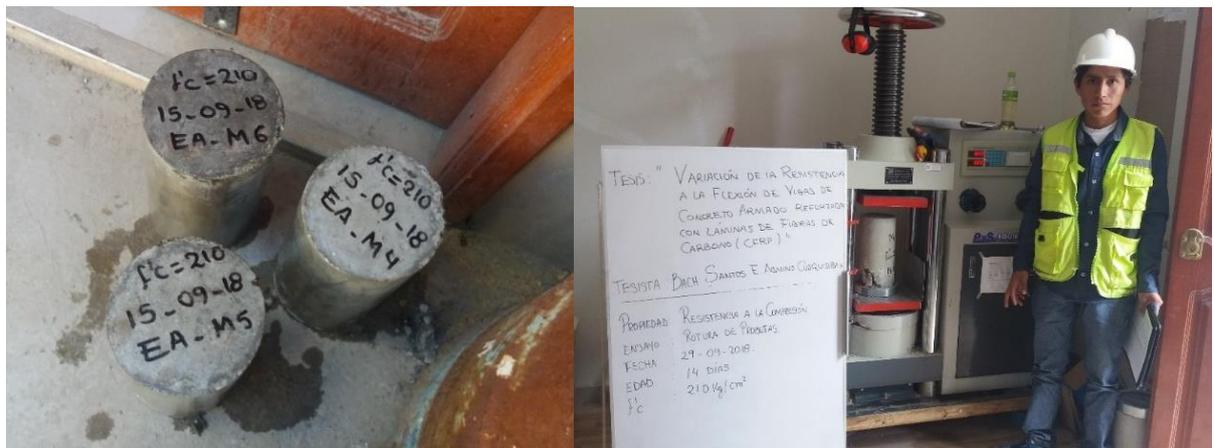


Figura 7.18. Ensayo a compresión de probetas de concreto a los 14 días ($f'c=210\text{kg/cm}^2$)



Figura 7.19. Ensayo a compresión de probetas de concreto a los 14 días ($f'c=280\text{kg/cm}^2$)

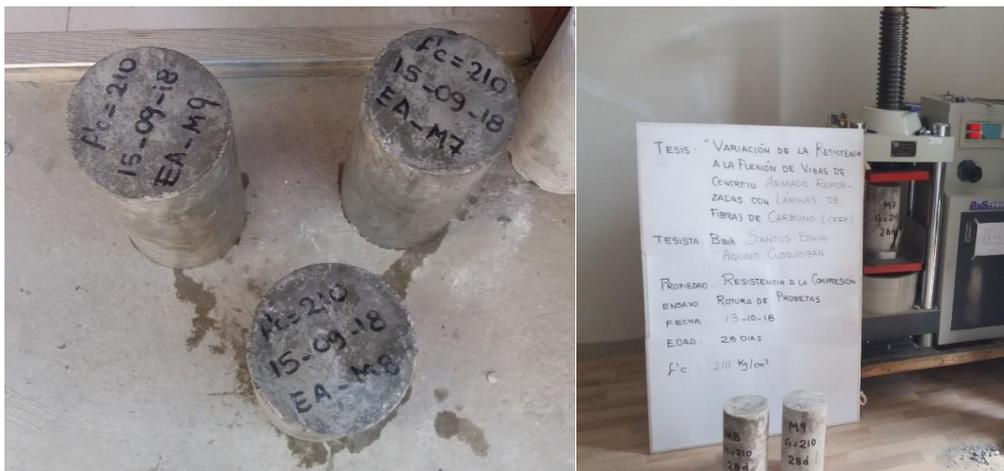


Figura 7.20. Ensayo a compresión de probetas de concreto a los 28 días ($f'c=210\text{kg/cm}^2$)

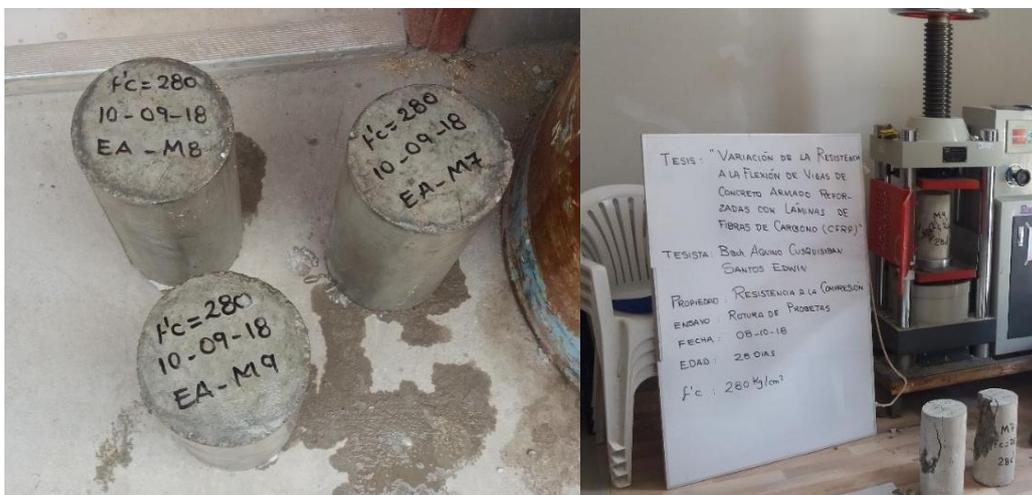


Figura 7.21. Ensayo a compresión de probetas de concreto a los 28 días ($f'c=280\text{kg/cm}^2$)



Figura 7.22. Elaboración de las armaduras de las vigas.



Figura 7.23. Armadura modelo de las vigas.

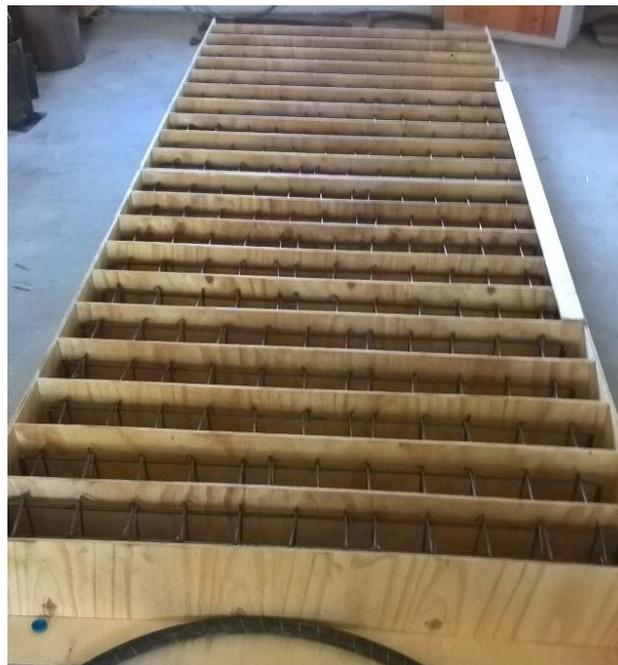


Figura 7.24. Encofrado de vigas



Figura 7.25. Vibrado del concreto en las vigas.



Figura 7.26. Llenado de vigas.



Figura 7.27. Ensayo de asentamiento del concreto.



Figura 7.28. Elaboración de probetas cilíndricas



Figura 7.29. Etapa final del llenado de vigas.

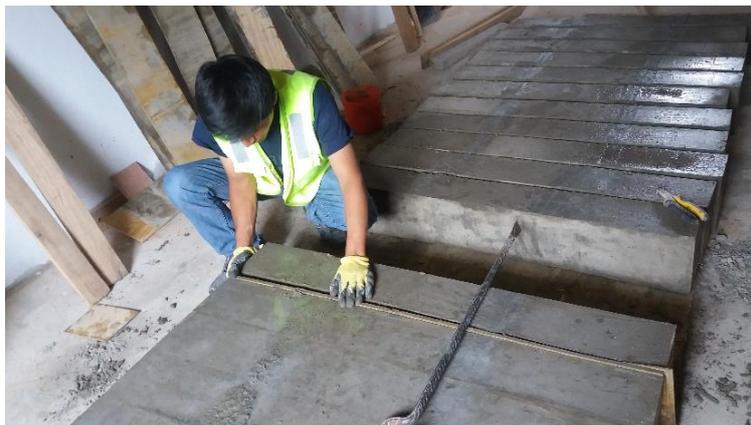


Figura 7.30. Desencofrado de vigas.



Figura 7.31. Curado de vigas.



Figura 7.32. Reforzamiento con Sika CarboDur S512.



Figura 7.33. Vertimiento del componente A y B del adhesivo Sikadur-30.



Figura 7.34. Mezclado del componente A y B del adhesivo Sikadur-30.



Figura 7.35. Inspección del Ing. Miguel Mosqueira Moreno en el reforzamiento de vigas.



Figura 7.36. Aplicación del adhesivo Sikadur-30 a las láminas de Sika CarboDur S512.



Figura 7.37. Pegado de las láminas de Sika CarboDur S512 a las vigas.



Figura 7.38. Reforzamiento a 10 vigas con Sika CarboDur S512.



Figura 7.39. Ensayo a compresión de probetas de concreto.



Figura 7.40. Inspección del Ing. Miguel Mosqueira en el ensayo a flexión de las vigas de concreto armado.



Figura 7.41. Ensayo a flexión de vigas patrón (210-280kg/cm²)



Figura 7.42. Ensayo a flexión de vigas reforzadas con láminas de Sika CarboDur S512 (210-280kg/cm²)



Figura 7.43. Fallas en las vigas reforzadas con láminas de Sika CarboDur S512.



Figura 7.44. Ensayo a flexión de vigas reforzadas con láminas de Sika CarboDur S512.



Figura 7.45. Tomada de datos en los ensayos a flexión.

ANEXO II: PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS:

Anexo II.1: Agregado Fino:

1. Contenido de Humedad

Tabla 7.1. Ensayo de Contenido de Humedad para el Agregado Fino.

ASTM C566 / NTP 339.185

ENSAYO N°	1°	2°	3°
Peso del recipiente (gr)	64.00	65.00	64.00
Peso del recipiente + Muestra Húmeda (gr)	620.00	650.00	700.00
Peso del recipiente + Muestra Seca (gr)	606.00	636.00	684.00
Peso del Agua (gr)	14.00	14.00	16.00
Peso Muestra Seca (gr)	542.00	571.00	620.00
Contenido de Humedad (%)	2.58	2.45	2.58
Promedio del Contenido de Humedad (%)	2.54		

2. Análisis granulométrico

Tabla 7.2. Ensayo del Análisis Granulométrico del Agregado Fino - Ensayo N°01

ASTM C136 / NTP 400.012

Malla		Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido Parcial (%)	Porcentaje Retenido Acum. (%)	Porcentaje Pasa (%)	HUSO GRANULOMÉTRICO		
N°	Abertura (mm)					M		
3/8	9.5	0.00	0.00	0.00	100.00	100	---	100
N° 4	4.75	196.00	13.07	13.07	86.93	89	---	100
N° 8	2.38	342.00	22.80	35.87	64.13	65	---	100
N° 16	1.19	237.00	15.80	51.67	48.33	45	---	100
N° 30	0.600	204.00	13.60	65.27	34.73	25	---	80
N° 50	0.300	196.00	13.07	78.33	21.67	5	---	48
N° 100	0.150	227.00	15.13	93.47	6.53	0	---	12
CAZOL.		98.00	6.53	100.00	0.00	Módulo de Finura		
TOTAL		1500.00				3.38		

Tabla 7.3. Ensayo del Análisis Granulométrico del Agregado Fino - Ensayo N°02

ASTM C136 / NTP 400.012

Malla		Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido Parcial (%)	Porcentaje Retenido Acum. (%)	Porcentaje Pasa (%)	HUSO GRANULOMÉTRICO		
N°	Abertura (mm)					M		
3/8	9.5	0.00	0.00	0.00	100.00	100	---	100
N° 4	4.75	205.00	12.81	12.81	87.19	89	---	100
N° 8	2.38	372.00	23.25	36.06	63.94	65	---	100
N° 16	1.19	238.00	14.88	50.94	49.06	45	---	100
N° 30	0.600	211.00	13.19	64.13	35.88	25	---	80
N° 50	0.300	215.00	13.44	77.56	22.44	5	---	48
N° 100	0.150	241.00	15.06	92.63	7.38	0	---	12
CAZOL.		118.00	7.38	100.00	0.00	Módulo de Finura		
TOTAL		1600.00				3.34		

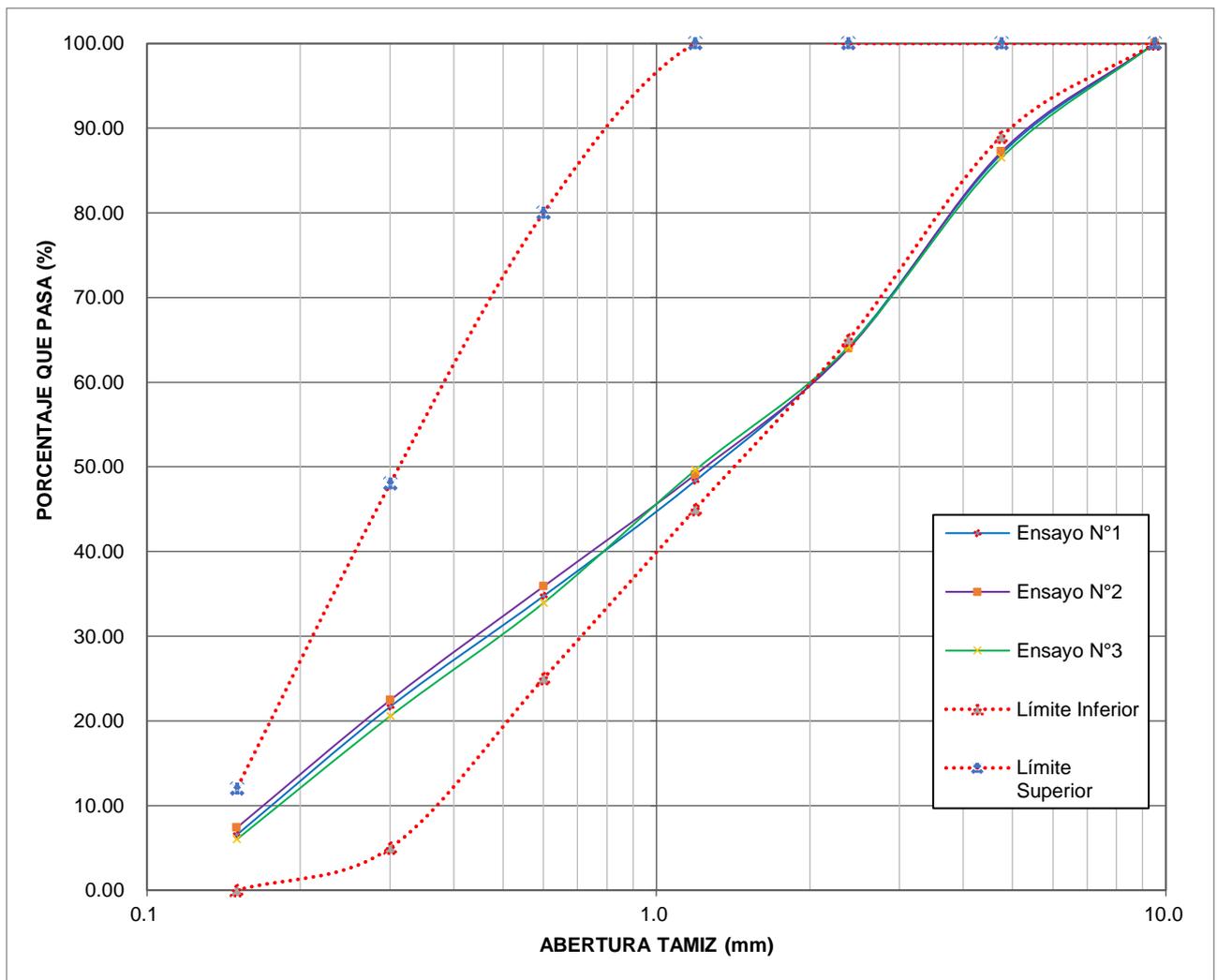
Tabla 7.4. Ensayo del Análisis Granulométrico del Agregado Fino - Ensayo N°03

ASTM C136 / NTP 400.012

Malla		Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido Parcial (%)	Porcentaje Retenido Acum. (%)	Porcentaje Pasa (%)	HUSO GRANULOMÉTRICO		
N°	Abertura (mm)					M		
3/8	9.5	0.00	0.00	0.00	100.00	100	---	100
N° 4	4.75	196.00	13.52	13.52	86.48	89	---	100
N° 8	2.38	324.00	22.34	35.86	64.14	65	---	100
N° 16	1.19	211.00	14.55	50.41	49.59	45	---	100
N° 30	0.600	227.00	15.66	66.07	33.93	25	---	80
N° 50	0.300	194.00	13.38	79.45	20.55	5	---	48
N° 100	0.150	211.00	14.55	94.00	6.00	0	---	12
CAZOL.		87.00	6.00	100.00	0.00	Módulo de Finura		
TOTAL		1450.00				3.39		

Figura 7.46. Consolidado del Análisis Granulométrico del Agregado Fino.

Huso Granulométrico M



3. Peso Unitario

3.1. Peso Específico del Agua

Tabla 7.5. Peso Específico del Agua.

Peso Específico del Agua	
Peso de la fiola en (g) =	142
Peso de la fiola + agua en (g) =	640
Volumen de la fiola (cm ³) =	500.00
Peso específico (g/cm ³) =	0.99600
P.e en (Kg/m³) =	996.00

3.2. Factor "F" del recipiente

Tabla 7.6. Factor "F" del recipiente Agregado Fino

Factor (f) para el Agregado Fino	
Peso del recipiente (gr)	2932
Peso del recipiente + agua (gr)	4865
Peso del agua (gr)	1933
Factor (f) (/m³)	515.261

3.3. Peso Unitario Seco Suelto

Tabla 7.7. Ensayo de Peso Unitario Seco Suelto del Agregado Fino.

ASTM C29 / NTP 400.017

ENSAYO N°	1°	2°	3°
Peso del recipiente (gr)	2932	2932	2932
Peso del recipiente + mat. (gr)	6243	6255	6269
Peso del material (gr)	3311	3323	3337
Factor (f)	515.261	515.261	515.261
Peso Unit. Suelto Seco (Kg/m ³)	1706.03	1712.21	1719.43
Peso Unit. Suelto Seco Promedio (Kg/m³)	1712.56		

3.4. Peso Unitario Seco Compactado

Tabla 7.8. Ensayo de Peso Unitario Seco Compactado del Agregado Fino.

ASTM C29 / NTP 400.017

ENSAYO N°	1°	2°	3°
Peso del recipiente (gr)	2932	2932	2932
Peso del recipiente + mat. (gr)	6462	6435	6397
Peso del material (gr)	3530	3503	3465
Factor (f)	515.261	515.261	515.261
Peso Unit. Compactado (Kg/m ³)	1818.87	1804.96	1785.38
Peso Unit. Compactado Promedio (Kg/m³)	1803.07		

4. Peso Específico y Absorción

Tabla 7.9. Ensayo de Peso Específico y Absorción del Agregado Fino.

ASTM C128 / NTP 400.022

DESCRIPCIÓN	E-1	E-2	E-3	Promedio
Peso de fiola (gr)	142.00	142.00	142.00	----
Peso de la fiola + agua + muestra (gr)	951.00	952.00	952.00	
Peso de la muestra superficialmente Seca (gr)	500.00	500.00	500.00	
Wo = Peso en el aire de la muestra secada al horno (gr)	494.00	493.00	495.00	----
V = Volumen del fiola (cm ³)	500.00	500.00	500.00	----
Va = Volumen en (cm ³) del agua añadida a la fiola	309.00	310.00	310.00	----
a. Peso específico de masa $P_e = W_o / (V - V_a)$	2.586	2.595	2.605	2.595
b. Peso específico de masa saturada con superficie seca $P_{esss} = 500 / (V - V_a)$	2.618	2.632	2.632	2.627
c. Peso específico aparente $P_{ea} = W_o / [(V - V_a) - (500 - W_o)]$	2.670	2.694	2.676	2.680
d. Absorción $Abs = [(500 - W_o) / W_o] * 100$	1.21	1.42	1.01	1.21

5. Materiales que pasan el tamiz N°200

Tabla 7.10. Ensayo de Partículas < 200 para el Agregado Fino.

ASTM C566 / NTP 339.185

ENSAYO N°	1°	2°	3°
Peso seco de la muestra original	500.00	500.00	500.00
Peso seco de la muestra lavada	484.00	482.00	487.00
Peso del material que pasa el tamiz N° 200	16.00	18.00	13.00
% de material que pasa el tamiz N° 200	3.20	3.60	2.60
Promedio del % de material que pasa el tamiz N° 200	3.13		

6. Resumen de Propiedades

Tabla 7.11. Resumen de Propiedades del Agregado Fino.

Características de los agregados	Und.	Agregado Fino
Perfil del Agregado	-	
Tamaño Máximo Nominal (TMN)	-	
Peso Específico de Masa	Kg/m ³	2595
Peso Específico SSS	Kg/m ³	2627
Peso Específico Aparente	Kg/m ³	2680
Peso Unitario Suelto Seco	Kg/m ³	1713
Peso Unitario Compactado Seco	Kg/m ³	1803
Contenido de Humedad (w%)	%	2.54
Absorción (%)	%	1.21
Módulo de Finura	-	3.37
Partículas < Tamiz N° 200	%	3.13

Anexo II.2: Agregado Grueso:

1. Contenido de Humedad

Tabla 7.12. Ensayo de Contenido de Humedad para el Agregado Grueso.

ASTM C566 / NTP 339.185

ENSAYO N°	1°	2°	3°
Peso del recipiente (gr)	850.00	820.00	792.00
Peso del recipiente + Muestra Húmeda (gr)	5600.00	5400.00	5200.00
Peso del recipiente + Muestra Seca (gr)	5583.00	5385.00	5182.00
Peso del Agua (gr)	17.00	15.00	18.00
Peso Muestra Seca (gr)	4733.00	4565.00	4390.00
Contenido de Humedad (%)	0.36	0.33	0.41
Promedio del Contenido de Humedad (%)	0.37		

2. Análisis granulométrico

Tabla 7.13. Ensayo del Análisis Granulométrico del Agregado Grueso - Ensayo N°01

ASTM C136 / NTP 400.012

Malla		Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido Parcial (%)	Porcentaje Retenido Acum. (%)	Porcentaje Pasa (%)	HUSO GRANULOMÉTRICO		
N°	Abertura (mm)					67		
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00	100	---	100
3/4"	19.0	599.00	9.98	9.98	90.02	90	---	100
1/2"	12.7	2481.00	41.35	51.33	48.67	45	---	70
3/8"	9.5	1162.00	19.37	70.70	29.30	20	---	55
N° 4	4.76	1754.00	29.23	99.93	0.07	0	---	10
Cazoleta		4.00	0.07	100.00	0.00	Módulo de Finura		
TOTAL		6000.00				6.81		

Tabla 7.14. Ensayo del Análisis Granulométrico del Agregado Grueso - Ensayo N°02

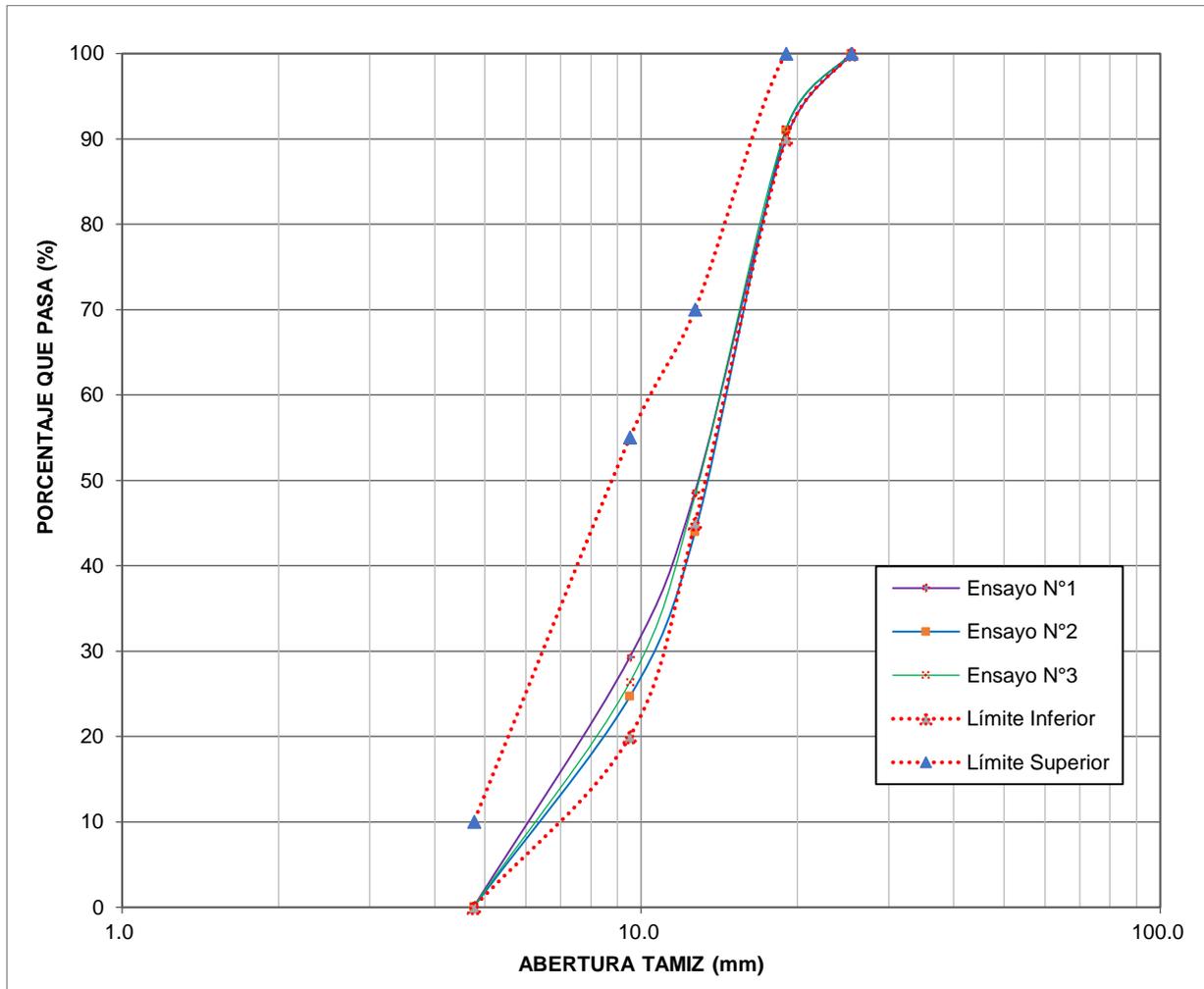
ASTM C136 / NTP 400.012

Malla		Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido Parcial (%)	Porcentaje Retenido Acum. (%)	Porcentaje Pasa (%)	HUSO GRANULOMÉTRICO		
N°	Abertura (mm)					67		
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00	100	---	100
3/4"	19.0	585.00	9.00	9.00	91.00	90	---	100
1/2"	12.7	3058.00	47.05	56.05	43.95	45	---	70
3/8"	9.5	1253.00	19.28	75.32	24.68	20	---	55
N° 4	4.76	1601.00	24.63	99.95	0.05	0	---	10
Cazoleta		3.00	0.05	100.00	0.00	Módulo de Finura		
TOTAL		6500.00				6.84		

Tabla 7.15. Ensayo del Análisis Granulométrico del Agregado Grueso - Ensayo N°03
 ASTM C136 / NTP 400.012

Malla		Peso Retenido (gr)	Porcentaje Retenido Parcial (%)	Porcentaje Retenido Acum. (%)	Porcentaje Pasa (%)	HUSO GRANULOMÉTRICO		
N°	Abertura (mm)					67		
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00	100	---	100
3/4"	19.0	556.00	8.83	8.83	91.17	90	---	100
1/2"	12.7	2708.00	42.98	51.81	48.19	45	---	70
3/8"	9.5	1375.00	21.83	73.63	26.37	20	---	55
N° 4	4.76	1655.00	26.27	99.90	0.10	0	---	10
Cazoleta		6.00	0.10	100.00	0.00	Módulo de Finura		
TOTAL		6300.00				6.82		

Figura 7.47. Análisis Granulométrico del Agregado Grueso.
 Huso Granulométrico 67



3. Peso Unitario

3.1. Peso Específico del Agua

Tabla 7.16. Peso Específico del Agua.

Peso Específico del Agua	
Peso de la fiola en (g) =	142
Peso de la fiola + agua en (g) =	640
Volumen de la fiola (cm ³) =	500.00
Peso específico (g/cm ³) =	0.99600
P.e en (Kg/m³) =	996.00

3.2. Factor "F" del recipiente

Tabla 7.17. Factor "F" del recipiente Agregado Grueso.

Factor (f) para el Agregado Grueso	
Peso del recipiente (gr)	4190
Peso del recipiente + agua (gr)	13924
Peso del agua (gr)	9734
Factor (f) (/m³)	102.322

3.3. Peso Unitario Seco Suelto

*Tabla 7.18. Ensayo de Peso Unitario Seco Suelto del Agregado Grueso
ASTM C29 / NTP 400.017*

ENSAYO N°	1°	2°	3°
Peso del recipiente (gr)	4190	4190	4190
Peso del recipiente + mat. (gr)	17610	17395	17430
Peso del material (gr)	13420	13205	13240
Factor (f)	102.322	102.322	102.322
Peso Unit. Suelto Seco (Kg/m ³)	1373.16	1351.16	1354.74
Peso Unit. Suelto Seco Promedio (Kg/m³)	1359.69		

3.4. Peso Unitario Seco Compactado

*Tabla 7.19. Ensayo de Peso Unitario Seco Compactado del Agregado Grueso.
ASTM C29 / NTP 400.017*

ENSAYO N°	1°	2°	3°
Peso del recipiente (gr)	4190	4190	4190
Peso del recipiente + mat. (gr)	18902	18960	18890
Peso del material (gr)	14712	14770	14700
Factor (f)	102.322	102.322	102.322
Peso Unit. Compactado (Kg/m ³)	1505.36	1511.29	1504.13
Peso Unit. Compactado Promedio (Kg/m³)	1506.93		

4. Peso Específico y Absorción

Tabla 7.20. Ensayo de Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso.

ASTM C128 / NTP 400.021

ENSAYO N°	1°	2°	3°	Promedio
A = Peso en el aire de la muestra secada al horno (gr)	2970.00	2969.00	2968.00	----
B = Peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca (gr)	3000.00	3000.00	3000.00	----
C = Peso en el agua de la muestra saturada (gr)	1870.00	1872.00	1868.00	----
a. Peso específico de masa $P_e = A / (B - C)$	2.628	2.632	2.622	2.627
b. Peso específico de masa saturada con superficie seca $P_{esss} = B / (B - C)$	2.655	2.660	2.650	2.655
c. Peso específico aparente $P_{ea} = A / (A - C)$	2.700	2.706	2.698	2.702
d. Absorción $Abs = [(B - A) / A] * 100$	1.01	1.04	1.08	1.04

5. Materiales que pasan el tamiz N°200

Tabla 7.21. Ensayo de Partículas < 200 para el Agregado Grueso.

ASTM C566 / NTP 339.185

ENSAYO N°	1°	2°	3°
Peso seco de la muestra original	3500.00	4000.00	3800.00
Peso seco de la muestra lavada	3492.00	3992.00	3791.00
Peso del material que pasa el tamiz N° 200	8.00	8.00	9.00
% de material que pasa el tamiz N° 200	0.23	0.20	0.24
Promedio del % de material que pasa el tamiz N° 200	0.22		

6. Resumen de Propiedades

Tabla 7.22. Resumen de Propiedades del Agregado Grueso

Características de los agregados	Und.	Agregado Grueso
Perfil del Agregado	-	Angular
Tamaño Máximo Nominal (TMN)	-	3/4
Peso Específico de Masa	Kg/m ³	2627
Peso Específico SSS	Kg/m ³	2655
Peso Específico Aparente	Kg/m ³	2702
Peso Unitario Suelto Seco	Kg/m ³	1360
Peso Unitario Compactado Seco	Kg/m ³	1507
Contenido de Humedad (w%)	%	0.37
Absorción (%)	%	1.04
Módulo de Finura	-	6.82
Partículas < Tamiz N° 200	%	0.22

ANEXO III: TABLAS PARA EL DISEÑO MEZCLA

Tabla 7.23. Resistencia Promedio o Resistencia Media Requerida.

Condición de la ejecución de la obra	Relación aproximada entre la resistencia promedio y la resistencia de diseño
Excelente	1.15
Intermedias	1.20 a 1.25
Corrientes	1.35 a 1.60

Tabla 7.24. Consistencia y asentamiento del concreto.

Consistencia	Asentamiento
Seca	0" (0mm) a 2" (50mm)
Plástica	3" (75mm) a 4" (100mm)
Fluida	≥ 5" (125mm)

Tabla 7.25. Volumen unitario de agua y contenido de aire atrapado.

ASENTAMIENTO O SLUMP (mm)		Agua en lt/m3 de concreto para tamaños máximos de agregado grueso y consistencias indicados							
		10 mm	12.5 mm	20 mm	25 mm	40 mm	50 mm	70 mm	150 mm
		3/8 "	1/2 "	3/4 "	1 "	1 1/2 "	2 "	3 "	6 "
CONCRETO SIN AIRE INCORPORADO									
30 a 50	1 " a 2 "	207	199	190	179	166	154	130	113
80 a 100	3 " a 4 "	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 180	6 " a 7 "	243	228	216	202	190	178	160	-----
AIRE ATRAPADO (%)		3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
CONCRETO SIN AIRE INCORPORADO									
30 a 50	1 " a 2 "	181	175	168	160	150	142	122	107
80 a 100	3 " a 4 "	202	193	184	175	165	157	133	119
150 a 180	6 " a 7 "	216	205	197	184	174	166	154	-----
AIRE TOTAL (%)	Exposición suave	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
	Exposición moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
	Exposición severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

Tabla 7.26. Relación agua/cemento por resistencia

RESISTENCIA A COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS (fcr)(kg/cm2)	RELACIÓN AGUA/CEMENTO DE DISEÑO EN PESO	
	CONCRETO SIN AIRE INCORPORADO	CONCRETO CON AIRE INCORPORADO
450	0.38	-----
400	0.46	-----
350	0.48	0.4
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.7	0.61
150	0.8	0.71

Tabla 7.27. Módulo de finura de la combinación de agregados.

Tamaño Máximo Nominal del Agregado Grueso	Módulo de Finura de la Combinación de agregados que da las mejores condiciones de trabajabilidad para los contenidos de cemento en bolsas/metro cúbico indicados			
	6	7	8	9
3/8"	3.96	4.04	4.11	4.19
1/2"	4.46	4.54	4.61	4.69
3/4"	4.96	5.04	5.11	5.19
1"	5.26	5.34	5.41	5.49
1 1/2"	5.56	5.64	5.71	5.79
2"	5.86	5.94	6.01	6.09
3"	6.16	6.24	6.31	6.39

ANEXO IV: DISEÑO DE LA VIGA MODELO

Para la presente investigación se realizaron 3 diseños importantes, los cuales son:

1. Diseño de la mezcla de concreto para un $f'c=210\text{kg/cm}^2$ y $f'c=280\text{kg/cm}^2$
2. Diseño de la viga; teniendo en cuenta que la falla debe ser primero por flexión y después por cortante, para ello se debe tener en cuenta que el refuerzo a tracción y compresión debe ser deficiente, mientras que el refuerzo por cortante debe ser de mayor.
3. Diseño del reforzamiento a flexión de acuerdo a la ACI 440.2R.

DISEÑO DE VIGA MODELO

TESIS : "VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS CON LÁMINAS DE FIBRAS DE CARBONO (CFRP)"

TESISTA : SANTOS EDWIN AQUINO CUSQUISIBAN.

1. Diseño de la Mezcla

A. Diseño para un $f'c=210\text{kg/cm}^2$

A.I. Diseño de la Mezcla de Prueba

La mezcla será diseñada mediante el método: Módulo de Finura de la Combinación de agregados.

a. Resistencia de Diseño

$$f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$$

b. Materiales:

Cemento : Pacasmayo Portland Tipo I Peso Especifico : 3.14 gr/cm³

Agua : Potable

Agregados :

Procedencia : Cantera "La Victoria" - Cajamarca

Características de los agregados	Und.	Agregado Fino	Agregado Grueso
Perfil del Agregado	-		Angular
Tamaño Máximo Nominal (TMN)	-		3/4
Peso Especifico de Masa	Kg/m ³	2595	2627
Peso Unitario Suelto Seco	Kg/m ³	1713	1360
Peso Unitario Compactado Seco	Kg/m ³	1803	1507
Contenido de Humedad (w%)	%	2.54	0.37
Absorción (%)	%	1.21	1.04
Modulo de Finura	-	3.37	6.82
Partículas < Tamiz N° 200	%	3.13	0.22

c. Procedimiento de Diseño

1. Selección del $f'cr$:

$$f'cr = 1.2 * f'c = 252 \text{ Kg/cm}^2$$

2. Selección del T.M.N

T.M.N = 3/4" (El T.M.N se obtenido de la granulometría del agregado grueso)

3. Selección del Asentamiento

Slump = 3 "- 4" (Consistencia Plástica)

4. Volumen Unitario de agua de mezclado

$$\text{Agua de Diseño} = 205 \text{ lts/m}^3$$

5. Aire Atrapado

$$\text{Aire} = 2 \%$$

6. Relación a/c

$$a/c = 0.6172$$

7. Factor Cemento

$$F.C = 332.145 \text{ Kg/m}^3 \quad 7.815 \text{ Bolsas/m}^3$$

8. Volumen de la Pasta de Cemento

$$\text{Cemento : } 332.145 / 3140 = 0.10578 \text{ m}^3$$

$$\text{Agua : } 205 / 1000 = 0.205 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire : } 2 / 100 = 0.02 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de pasta de cemento} = 0.33078 \text{ m}^3$$

9. Volumen de Agregados

$$\text{Volumen de Agregados} = 1 - 0.33078 = 0.66922 \text{ m}^3$$

10. Determinación de porcentaje de A. Fino (r_f) y A. Grueso (r_g).

$$mc = 5.0971$$

$$\% \text{ Vacios} = 42.6370 \quad rf = 54.41\%$$

$$\text{Incr. del \% de vacios} = 7.6370 \quad rg = 45.59\%$$

$$\text{Disminucion de mc} = -0.1527$$

$$\text{Nuevo mc} = 4.9444$$

11. Volumen del A. Fino y A. Grueso

11.1. Volumen de Agregado Fino:

A.F. = 0.36412 m³

11.2. Volumen de Agregado Grueso:

A.G. = 0.3051 m³

12. Peso del A. Fino y A. Grueso

12.1. Peso de Agregado Fino:

A.F. = 944.891 kg

12.2. Peso de Agregado Grueso:

A.G. = 801.498 kg

13. Materiales por unidad cubica

Cemento :	332.145	Kg
A. Fino seco:	944.891	Kg
A. Grueso seco :	801.498	Kg
Agua de Diseño :	205.000	Lts

14. Materiales Corregidos por humedad

Cemento :	332.145	Kg
A. Fino húmedo:	968.891	Kg
A. Grueso húmedo :	804.464	Kg
Agua Efectiva :	197.803	Lts

15. Proporcionamiento en peso

1	2.92	2.42	/ 25.50	Lt/bolsa
---	------	------	---------	----------

16. Proporcionamiento en volumen

1	2.5	2.66	/ 25.50	Lt/bolsa
---	-----	------	---------	----------

A.II. Ajuste de la Mezcla de Prueba

La mezcla será ajustada mediante el método de volúmenes absolutos

a. Materiales de Diseño por m3

Cemento :	332.145	Kg
A. Fino seco:	944.891	Kg
A. Grueso seco :	801.498	Kg
Agua de diseño :	205.000	Lts

b. Materiales por m3 Corregidos por Humedad

Cemento :	332.145	Kg
A. Fino húmedo:	968.891	Kg
A. Grueso húmedo :	804.464	Kg
Agua Efectiva :	197.803	Lts

c. Datos de la Prueba de Laboratorio

Asentamiento :	3.7	pulg.
P.U. Concreto Fresco :	2330	Kg/m ³
Agua adicional :	-150	cm ³
Mezcla :	Satisfactoria	

d. Procedimiento de ajuste**1. Materiales corregidos por humedad para 3 especímenes (V = 0.020 m³):**

Cemento :	6.643	Kg
A. Fino húmedo:	19.378	Kg
A. Grueso húmedo :	16.089	Kg
Agua Añadida :	3.806	Lts
Peso colada =	45.916	kg

2. Rendimiento de la mezcla

Rendimiento = 0.0197064 m³

3. La cantidad de agua de la mezcla

Humedad Superficial del AF :	1.33	%
Humedad Superficial del AG :	-0.67	%
Agua añadida :	3.806	Lts
Aporte de humedad AF :	0.251	Lts
Aporte de humedad AG :	-0.107	Lts
Agua de mezclado por tanda :	3.950	Lts

3.1. Agua de mezclado por m³ :

Agua de mezclado : 200.442 Lts/m³

3.2. Corrección por Asentamiento

Se hará un incremento o disminución de 2 litros por cada incremento o disminución de 1cm de asentamiento:

Disminución en :	-0.508	cm
Disminución de Agua :	-1.016	Lts/m ³

3.3. Nueva Agua de Mezcla por m3

Nueva Agua por m3 : 199.426 Lts/m³

e. Reajuste por Resistencia

Resistencia de Diseño :	210	kg/cm ²
Resistencia obtenida (7días) :	274.15	kg/cm ²
Resistencia (28días) :	353.74	kg/cm ²
Relación a/c inicial :	0.617	kg/cm ²

Se utilizará la Ley de Powers para encontrar la relación a/c

$$S = 2380 * x^3 \quad x = \frac{0.647\alpha}{0.319\alpha + a/c}$$

Donde:

S : Resistencia a la compresión

x : Relación Gel/ Espacio

α : Grado de Hidratación

a/c : Relación agua - cemento

Hallando el grado de Hidratación

$$R = 353.74$$

$$x = 0.5297$$

$$a/c = 0.6172$$

$$\alpha = 68.39\%$$

Hallando la relación a/c equivalente:

$$R = 210$$

$$x = 0.4452$$

$$\alpha = 68.39\%$$

$$a/c = 0.7758$$

f. Nuevo Diseño de Mezcla

Características de los agregados	Und.	Agregado Fino	Agregado Grueso
Contenido de Humedad (w%)	%	3.50	0.21

1. Selección del Asentamiento

Slump = 3" - 4" (Consistencia Plástica)

2. Volumen Unitario de agua de mezclado

$$\text{Agua de Diseño} = 199.426 \text{ lts/m}^3$$

3. Aire Atrapado

$$\text{Aire} = 2 \%$$

4. Relación a/c

$$a/c = 0.7758$$

5. Factor Cemento

$$F.C = 257.0610 \text{ Kg/m}^3 \quad 6.048 \text{ Bolsas/m}^3$$

6. Volumen de la Pasta de Cemento

$$\text{Cemento : } 257.061 / 3140 = 0.08187 \text{ m}^3$$

$$\text{Agua : } 199.426 / 1000 = 0.199426 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire : } 2 / 100 = 0.02 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de pasta de cemento} = 0.301296 \text{ m}^3$$

7. Volumen de Agregados

$$\text{Volumen de Agregados} = 1 - 0.301296 = 0.698704 \text{ m}^3$$

8. Determinación de porcentaje de A. Fino (r_f) y A. Grueso (r_g).

$$mc = 4.9638$$

$$\% \text{ Vacíos} = 42.6370 \quad rf = 58.27\%$$

$$\text{Incr. del \% de vacíos} = 7.6370 \quad rg = 41.73\%$$

$$\text{Disminución de mc} = -0.1527$$

$$\text{Nuevo mc} = 4.8111$$

9. Volumen del A. Fino y A. Grueso

9.1. Volumen de Agregado Fino:

$$A.F. = 0.40713 \text{ m}^3$$

9.2. Volumen de Agregado Grueso:

$$A.G. = 0.29157 \text{ m}^3$$

10. Peso del A. Fino y A. Grueso

10.1. Peso de Agregado Fino:

$$A.F. = 1056.502 \text{ kg}$$

10.2. Peso de Agregado Grueso:

$$A.G. = 765.954 \text{ kg}$$

11. Materiales por unidad cubica

$$\text{Cemento : } 257.061 \text{ Kg}$$

$$\text{A. Fino seco : } 1056.502 \text{ Kg}$$

$$\text{A. Grueso seco : } 765.954 \text{ Kg}$$

$$\text{Agua de Diseño : } 199.426 \text{ Lts}$$

12. Materiales Corregidos por humedad

$$\text{Cemento : } 257.061 \text{ Kg}$$

$$\text{A. Fino húmedo : } 1093.480 \text{ Kg}$$

$$\text{A. Grueso húmedo : } 767.563 \text{ Kg}$$

$$\text{Agua Efectiva : } 181.590 \text{ Lts}$$

13. Proporcionamiento en peso

$$1 \quad 4.25 \quad 2.99 \quad / 30.18 \quad \text{Lt/bolsa}$$

14. Proporcionamiento en volumen

$$1 \quad 3.6 \quad 3.29 \quad / 30.18 \quad \text{Lt/bolsa}$$

DISEÑO DE VIGA MODELO

TESIS : "VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS CON LÁMINAS DE FIBRAS DE CARBONO (CFRP)"

TESISTA : SANTOS EDWIN AQUINO CUSQUISIBAN.

1. Diseño de la Mezcla

B. Diseño para un $f'c=280\text{kg/cm}^2$

B.I. Diseño de la Mezcla de Prueba

La mezcla será diseñada mediante el método: Módulo de Finura de la Combinación de agregados.

a. Resistencia de Diseño

$$f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$$

b. Materiales:

Cemento : Pacasmayo Portland Tipo I Peso Especifico : 3.14 gr/cm³

Agua : Potable

Agregados :

Procedencia : Cantera "La Victoria" - Cajamarca

Características de los agregados	Und.	Agregado Fino	Agregado Grueso
Perfil del Agregado	-		Angular
Tamaño Máximo Nominal (TMN)	-		3/4
Peso Especifico de Masa	Kg/m ³	2595	2627
Peso Unitario Suelto Seco	Kg/m ³	1713	1360
Peso Unitario Compactado Seco	Kg/m ³	1803	1507
Contenido de Humedad (w%)	%	2.54	0.37
Absorción (%)	%	1.21	1.04
Modulo de Finura	-	3.37	6.82
Partículas < Tamiz N° 200	%	3.13	0.22

c. Procedimiento de Diseño

1. Selección del $f'cr$:

$$f'cr = 1.2 * f'c = 336 \text{ Kg/cm}^2$$

2. Selección del T.M.N

T.M.N = 3/4" (El T.M.N se obtenido de la granulometría del agregado grueso)

3. Selección del Asentamiento

Slump = 3" - 4" (Consistencia Plástica)

4. Volumen Unitario de agua de mezclado

$$\text{Agua de Diseño} = 205 \text{ lts/m}^3$$

5. Aire Atrapado

$$\text{Aire} = 2 \%$$

6. Relación a/c

$$a/c = 0.4996$$

7. Factor Cemento

$$F.C = 410.328 \text{ Kg/m}^3 \quad 9.655 \text{ Bolsas/m}^3$$

8. Volumen de la Pasta de Cemento

$$\text{Cemento : } 410.328 / 3140 = 0.13068 \text{ m}^3$$

$$\text{Agua : } 205 / 1000 = 0.205 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire : } 2 / 100 = 0.02 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de pasta de cemento} = 0.35568 \text{ m}^3$$

9. Volumen de Agregados

$$\text{Volumen de Agregados} = 1 - 0.35568 = 0.64432 \text{ m}^3$$

10. Determinación de porcentaje de A. Fino (r_f) y A. Grueso (r_g).

$$mc = 5.2259$$

$$\% \text{ Vacios} = 42.6370 \quad rf = 50.68\%$$

$$\text{Incr. del \% de vacios} = 7.6370 \quad rg = 49.32\%$$

$$\text{Disminucion de mc} = -0.1527$$

$$\text{Nuevo mc} = 5.0732$$

11. Volumen del A. Fino y A. Grueso

11.1. Volumen de Agregado Fino:

A.F. = 0.32654 m³

11.2. Volumen de Agregado Grueso:

A.G. = 0.31778 m³

12. Peso del A. Fino y A. Grueso

12.1. Peso de Agregado Fino:

A.F. = 847.371 kg

12.2. Peso de Agregado Grueso:

A.G. = 834.808 kg

13. Materiales por unidad cubica

Cemento :	410.328	Kg
A. Fino seco:	847.371	Kg
A. Grueso seco :	834.808	Kg
Agua de Diseño :	205.000	Lts

14. Materiales Corregidos por humedad

Cemento :	410.328	Kg
A. Fino húmedo:	868.894	Kg
A. Grueso húmedo :	837.897	Kg
Agua Efectiva :	199.323	Lts

15. Proporcionamiento en peso

1	2.12	2.04	/ 20.83	Lt/bolsa
---	------	------	---------	----------

16. Proporcionamiento en volumen

1	1.81	2.24	/ 20.83	Lt/bolsa
---	------	------	---------	----------

B.II. Ajuste de la Mezcla de Prueba

La mezcla será ajustada mediante el método de volúmenes absolutos

a. Materiales de Diseño por m3

Cemento :	410.328	Kg
A. Fino seco:	847.371	Kg
A. Grueso seco :	834.808	Kg
Agua de diseño :	205.000	Lts

b. Materiales por m3 Corregidos por Humedad

Cemento :	410.328	Kg
A. Fino húmedo:	868.894	Kg
A. Grueso húmedo :	837.897	Kg
Agua Efectiva :	199.323	Lts

c. Datos de la Prueba de Laboratorio

Asentamiento :	3.7	pulg.
P.U. Concreto Fresco :	2320	Kg/m ³
Agua adicional :	0	cm ³
Mezcla :	Satisfactoria	

d. Procedimiento de ajuste**1. Materiales corregidos por humedad para 3 especímenes (V = 0.020 m³):**

Cemento :	8.207	Kg
A. Fino húmedo:	17.378	Kg
A. Grueso húmedo :	16.758	Kg
Agua Añadida :	3.986	Lts
Peso colada =	46.329	kg

2. Rendimiento de la mezcla

Rendimiento = 0.0199694 m³

3. La cantidad de agua de la mezcla

Humedad Superficial del AF :	1.33	%
Humedad Superficial del AG :	-0.67	%
Agua añadida :	3.986	Lts
Aporte de humedad AF :	0.225	Lts
Aporte de humedad AG :	-0.112	Lts
Agua de mezclado por tanda :	4.099	Lts

3.1. Agua de mezclado por m³ :

Agua de mezclado : 205.264 Lts/m³

3.2. Corrección por Asentamiento

Se hará un incremento o disminución de 2 litros por cada incremento o disminución de 1cm de asentamiento:

Disminución en :	-0.508	cm
Disminución de Agua :	-1.016	Lts/m ³

3.3. Nueva Agua de Mezcla por m3

Nueva Agua por m3 : 204.248 Lts/m³

e. Reajuste por Resistencia

Resistencia de Diseño :	280	kg/cm ²
Resistencia obtenida (7días) :	431.03	kg/cm ²
Resistencia (28días) :	556.17	kg/cm ²
Relación a/c inicial :	0.500	kg/cm ²

Se utilizará la Ley de Powers para encontrar la relación a/c

$$S = 2380 * x^3 \quad x = \frac{0.647\alpha}{0.319\alpha + a/c}$$

Donde:

S : Resistencia a la compresión

x : Relación Gel/ Espacio

α : Grado de Hidratación

a/c : Relación agua - cemento

Hallando el grado de Hidratación

$$R = 556.17$$

$$x = 0.6159$$

$$a/c = 0.4996$$

$$\alpha = 68.31\%$$

Hallando la relación a/c equivalente:

$$R = 280$$

$$x = 0.4900$$

$$\alpha = 68.31\%$$

$$a/c = 0.6840$$

f. Nuevo Diseño de Mezcla

Características de los agregados	Und.	Agregado Fino	Agregado Grueso
Contenido de Humedad (w%)	%	3.50	0.21

1. Selección del Asentamiento

Slump = 3" - 4" (Consistencia Plástica)

2. Volumen Unitario de agua de mezclado

$$\text{Agua de Diseño} = 204.248 \text{ lts/m}^3$$

3. Aire Atrapado

$$\text{Aire} = 2 \%$$

4. Relación a/c

$$a/c = 0.6840$$

5. Factor Cemento

$$F.C = 298.5910 \text{ Kg/m}^3 \quad 7.026 \text{ Bolsas/m}^3$$

6. Volumen de la Pasta de Cemento

$$\text{Cemento : } 298.591 / 3140 = 0.09509 \text{ m}^3$$

$$\text{Agua : } 204.248 / 1000 = 0.204248 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire : } 2 / 100 = 0.02 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de pasta de cemento} = 0.319338 \text{ m}^3$$

7. Volumen de Agregados

$$\text{Volumen de Agregados} = 1 - 0.319338 = 0.680662 \text{ m}^3$$

8. Determinación de porcentaje de A. Fino (r_f) y A. Grueso (r_g).

$$mc = 5.0421$$

$$\% \text{ Vacios} = 42.6370$$

$$\text{Incr. del \% de vacios} = 7.6370$$

$$\text{Disminucion de mc} = -0.1527$$

$$\text{Nuevo mc} = 4.8894$$

$$r_f = 56.00\%$$

$$r_g = 44.00\%$$

9. Volumen del A. Fino y A. Grueso

9.1. Volumen de Agregado Fino:

$$A.F. = 0.38118 \text{ m}^3$$

9.2. Volumen de Agregado Grueso:

$$A.G. = 0.29948 \text{ m}^3$$

10. Peso del A. Fino y A. Grueso

10.1. Peso de Agregado Fino:

$$A.F. = 989.162 \text{ kg}$$

10.2. Peso de Agregado Grueso:

$$A.G. = 786.734 \text{ kg}$$

11. Materiales por unidad cubica

$$\text{Cemento : } 298.591 \text{ Kg}$$

$$\text{A. Fino seco : } 989.162 \text{ Kg}$$

$$\text{A. Grueso seco : } 786.734 \text{ Kg}$$

$$\text{Agua de Diseño : } 204.248 \text{ Lts}$$

12. Materiales Corregidos por humedad

$$\text{Cemento : } 298.591 \text{ Kg}$$

$$\text{A. Fino húmedo : } 1023.783 \text{ Kg}$$

$$\text{A. Grueso húmedo : } 788.386 \text{ Kg}$$

$$\text{Agua Efectiva : } 188.126 \text{ Lts}$$

13. Proporcionamiento en peso

$$1 \quad 3.43 \quad 2.64 \quad / 26.78 \quad \text{Lt/bolsa}$$

14. Proporcionamiento en volumen

$$1 \quad 2.9 \quad 2.91 \quad / 26.78 \quad \text{Lt/bolsa}$$

1. Diseño de la Mezcla

C. Resultados de los ensayos a compresión de las probetas elaboradas durante el diseño de mezcla.

Tabla 7.28. Resultados de los ensayos a compresión – diseño de mezcla.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE DISEÑO	EDAD DE ENSAYO	PROBETA	CARGA DE ROTURA (Kg)	DIÁMETRO (cm)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm ²)	PROMEDIO (Kg/cm ²)	% de RESISTENCIA
f'c = 210kg/cm ²	7 Días	M1	28218.16	14.7	169.72	166.27	166.55	79.31
		M2	29453.01	14.7	169.72	173.54		
		M3	27129.12	14.7	169.72	159.85		
	14 Días	M4	33667.43	14.5	165.13	203.88	190.15	90.55
		M5	31783.03	14.9	174.37	182.28		
		M6	31279.30	14.7	169.72	184.30		
	28 Días	M7	36359.44	14.8	170.87	212.79	213.32	101.58
		M8	36982.48	14.8	172.03	214.97		
		M9	36755.09	14.9	173.20	212.21		
f'c = 280kg/cm ²	7 Días	M1	37504.57	14.8	172.03	218.01	224.57	80.20
		M2	40464.76	14.9	174.37	232.07		
		M3	38470.22	14.8	172.03	223.62		
	14 Días	M4	47415.03	14.6	167.42	283.22	275.47	98.38
		M5	45023.83	14.8	172.03	261.72		
		M6	48423.51	14.8	172.03	281.48		
	28 Días	M7	53560.76	14.9	174.37	307.17	307.01	109.65
		M8	53506.72	15.1	179.08	298.79		
		M9	55675.62	15.0	176.71	315.06		

Figura 7.48. Resistencia a la Compresión de Probetas - Diseño de mezcla.

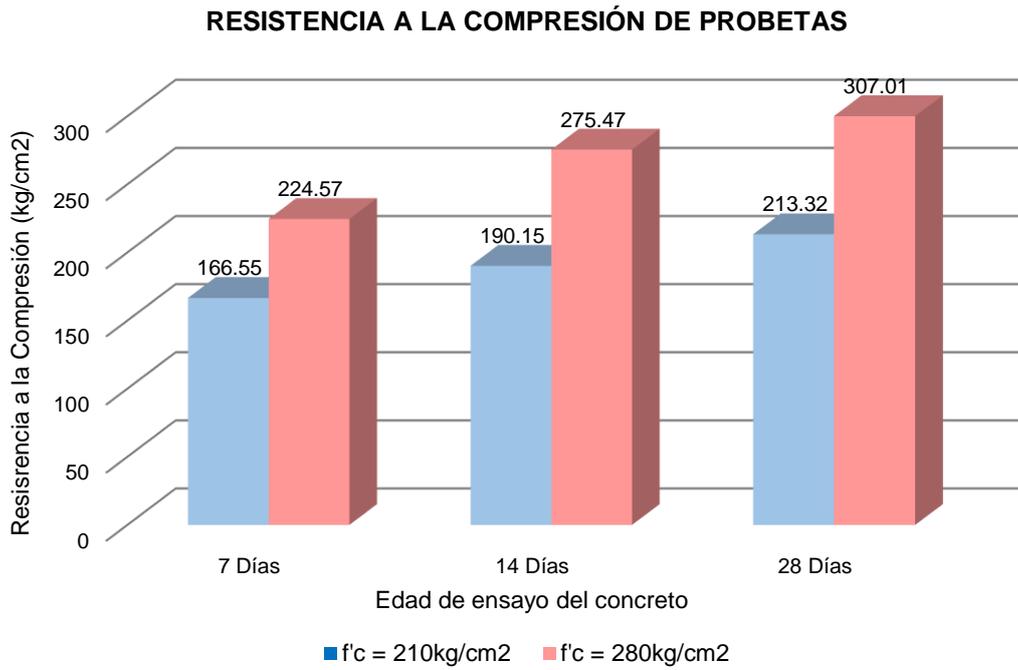
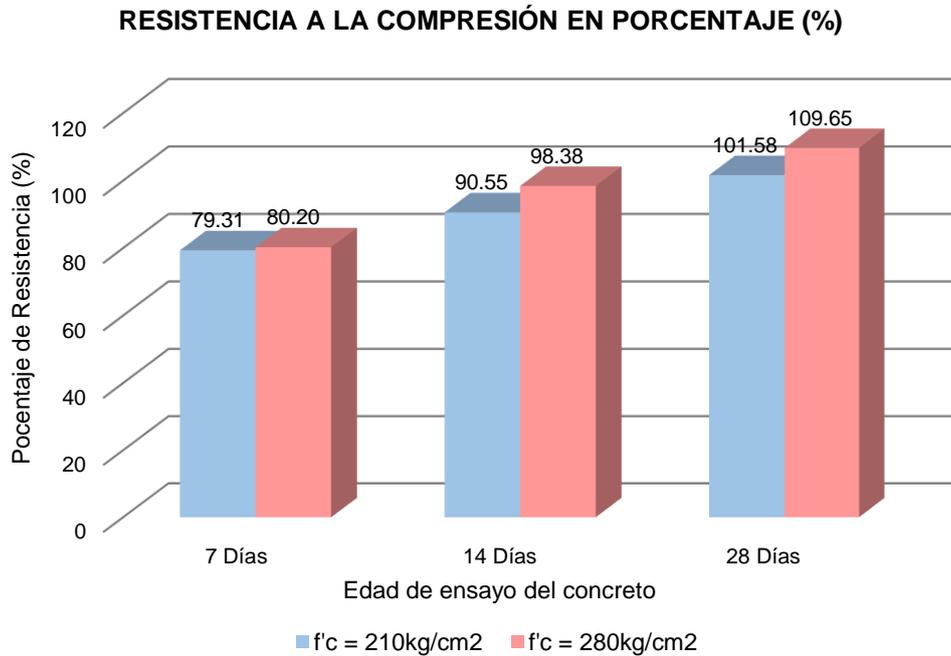


Figura 7.49. Resistencia a la Compresión en Porcentaje – Diseño de mezcla.

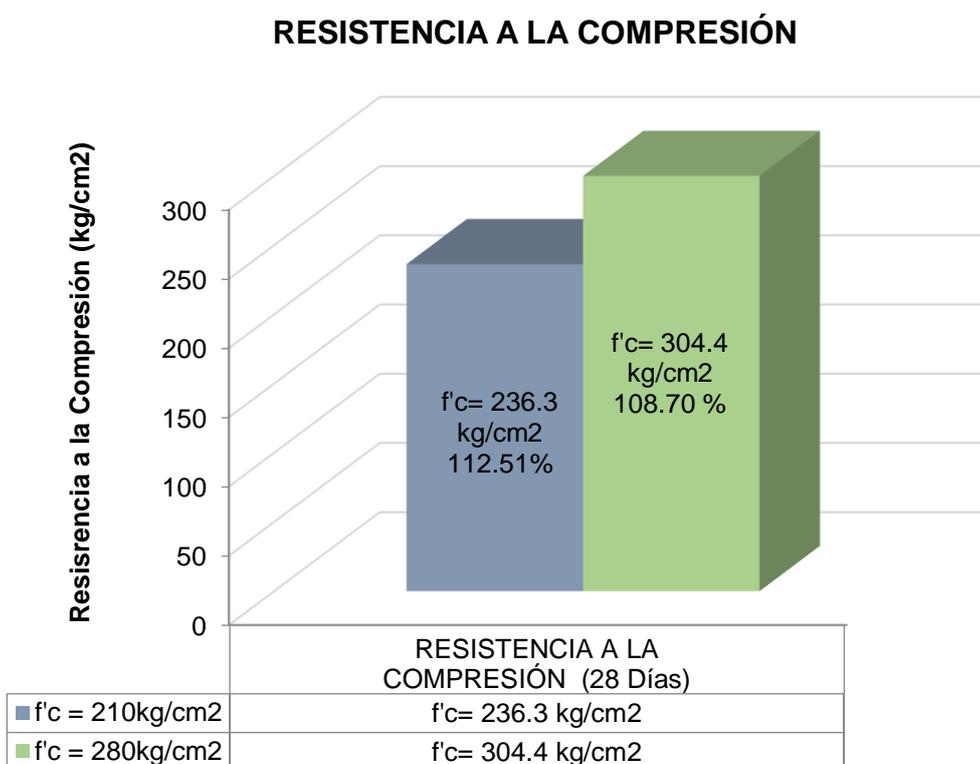


D. Resultados del ensayo a compresión de las probetas obtenidas de la elaboración de las vigas.

Tabla 7.29. Resultados de los ensayos a compresión - Vigas

f'c (kg/cm2)	EDAD DE ENSAYO	M	CARGA DE ROTURA (Tn)	DIÁMETRO (cm)	ÁREA (cm2)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (Kg/cm2)	PROMEDIO (Kg/cm2)	%
210	28 Días	M1	44.30	15.1	179.08	247.38	236.26	112.51
		M2	39.50	15.0	176.71	223.52		
		M3	42.60	15.1	179.08	237.88		
280	28 Días	M1	53.20	15.0	176.71	301.05	304.35	108.70
		M2	55.80	14.9	174.37	320.02		
		M3	51.60	15.0	176.71	292.00		

Figura 7.50. Resultados de los ensayos a compresión - Vigas



DISEÑO DE LA VIGA MODELO

TESIS : "VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS CON LÁMINAS DE FIBRAS DE CARBONO (CFRP)"

TESISTA : SANTOS EDWIN AQUINO CUSQUISIBAN.

2. Diseño de la viga modelo

El diseño del modelo contempló dos condiciones importantes:

1. La primera falla que se debe presentar en el modelo es por flexión, la segunda debe ser por cortante
2. La carga de falla debe estar dentro de los límites de carga que ofrece el marco universal del laboratorio de la Universidad Nacional de Cajamarca, la cual es una carga máxima permitida de 100 Ton.

De acuerdo a la ubicación del ensayo posibles equipos y esquema de carga más sencillo para realizar el ensayo se decidió colocar la viga simplemente apoyada con una carga vertical ubicada en el centro de la luz, como se ve en la siguiente figura.

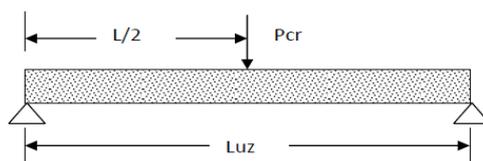


Figura 1. Esquema del modelo para realizar el ensayo

Según el esquema de carga mostrado, estaremos esperando un diagrama de fuerza cortante y momento flector de la siguiente forma:

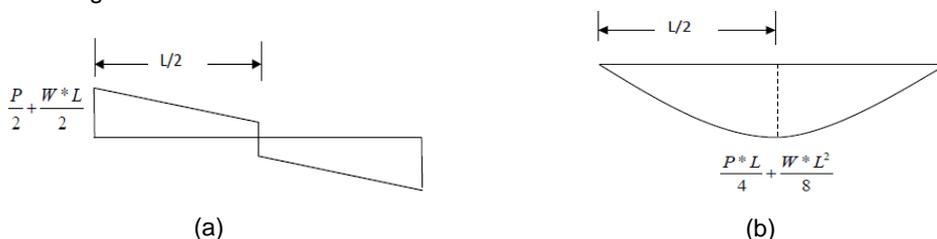


Figura 2. a) Diagrama de corte para una viga simplemente apoyada, b) Diagrama de momento flector para una viga simplemente

2.1. Geometría de la viga:

Considerando que las dimensiones de las vigas son limitadas, teniendo en cuenta su peso, la manipulación y traslado para ser ensayadas; se eligió una longitud de 1.1 m. La viga será soportada por apoyos ubicados a 5 cm de cada extremo de la misma.

Luz entre apoyos = 1.10 m

Según Blanco A. (2011):

$$\begin{aligned} h &= L/10 & a &= L/12 \\ h &= 0.11 \text{ m} & a &= 0.09 \text{ m} \end{aligned}$$

De acuerdo a la norma de concreto armado E 060

$$\begin{aligned} h &= L/16 \\ h &= 0.07 \text{ m} \end{aligned}$$

Según Morales R. (2012), considerando una sección inicial de viga de 0.15 x 0.20 m, tenemos del metrado de cargas:

$$\begin{aligned} b &= 0.15 \text{ m} & h &= 0.20 \text{ m} & L &= 1.20 \text{ m} \\ \text{Peso unitario del concreto armado} &= 2400 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Peso propio de la viga (w)} &= 86.40 \text{ kg} \\ \text{Carga muerta (1.4w)} &= 0.0672 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Aplicando la fórmula:

$$h = \frac{Ln}{\left(\frac{4}{\sqrt{Wu}}\right)} = 0.07 \text{ m}$$

Los valores obtenidos de los 3 criterios anteriores no son adecuados ya que la viga cuenta con una luz entre apoyos pequeña; entonces por cuestiones de trabajabilidad en la habilitación del acero, se ha adoptado las siguientes dimensiones:

$$\begin{aligned} b &= 0.15 \text{ m} \\ h &= 0.20 \text{ m} \end{aligned}$$

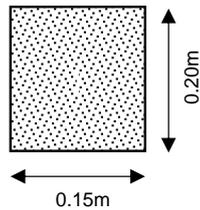


Figura 3. Sección de la viga modelo para el ensayo

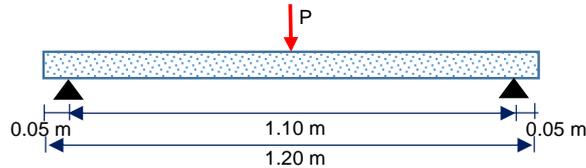


Figura 4. Esquema de la viga para el ensayo

2.2. Diseño de la Viga para un $f'c=210\text{kg/cm}^2$

2.2.1. Evaluación del Mn solo con el refuerzo a flexión ($2\phi 8\text{mm}$):

Teniendo en cuenta las dos condiciones mencionadas, se empleó concreto y acero con las siguientes especificaciones para una sección de viga igual a:

Altura de Viga $h = 20\text{ cm}$ Concreto con $f'c = 210\text{ kg/cm}^2$
 Ancho de Viga $b = 15\text{ cm}$ Acero con $f_y = 4200\text{ kg/cm}^2$

- Para el cálculo se usaron 2 varillas de acero de diametro 8mm

$$A_s = 2 \times 0.50 = 1.00\text{ cm}^2$$

- Cálculo del peralte efectivo "d":

$$d = 20\text{cm} - (2\text{ cm} - 0.6\text{cm} - 0.8\text{cm}/2) \quad \text{Recubrimiento: 2 cm}$$

$$d = 17.00\text{ cm}$$

- Cálculo de d' :

$$d' = 20\text{ cm} - 17\text{ cm}$$

$$d' = 3.00\text{ cm}$$

- Cálculo de la Cuantía mínima y $A_{s_{min}}$

$$\rho_{min} = 0.7 \frac{\sqrt{f'c}}{f_y} \quad A_{s_{min}} = \rho_{min} * b * d \quad \begin{matrix} f'c = 210\text{ kg/cm}^2 \\ f_y = 4200\text{ kg/cm}^2 \end{matrix}$$

$$\rho_{min} = 0.00242 \quad A_{s_{min}} = 0.62\text{ cm}^2$$

- Cuantía balanceada

$$\rho_b = \beta_1 0.85 \frac{f'c}{f_y} \left(\frac{6000}{6000 + f_y} \right) = 0.02125 \quad \beta_1 = 0.85$$

- Cuantía máxima (Aplicado en Zonas Sísmicas)

$$\rho_{max} = 0.50\rho_b = 0.01063$$

- Cálculo de la cuantía

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = 0.00392 \quad \begin{matrix} A_s = 1.00\text{ cm}^2 \\ b = 15.00\text{ cm} \\ d = 17.00\text{ cm} \end{matrix}$$

- Chequeo de Cuantías

$$\rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{max}$$

$$0.00242 \quad 0.00392 \quad 0.01063 \quad \text{OK, Está en el rango}$$

- Momento resistente ϕMn

$$a = \frac{\rho f_y}{0.85 f'c} d = 1.57\text{ cm} \quad \begin{matrix} \rho = 0.00392 \\ f_y = 4200\text{ kg/cm}^2 \\ f'c = 210\text{ kg/cm}^2 \\ d = 17.00\text{ cm} \end{matrix}$$

$$\phi Mn = \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 61295.29\text{ kg-cm}$$

$$\phi Mn = 612.95\text{ kg-m} \quad \begin{matrix} \phi = 0.90 \\ A_s = 1.00\text{ cm}^2 \end{matrix}$$

Para encontrar el momento resistente real, se optó no usar el factor de reducción por flexión $\phi = 0.90$; quedando el momento resistente así:

$$Mn = 681.06\text{ kg-m}$$

- Cálculo de la carga de agrietamiento de acuerdo a la condición del momento máximo:

$$M = \frac{Pl}{4} + \frac{wl^2}{8}$$

Donde:

- P = Carga de agrietamiento del elemento.
- l = Luz de la viga.
- M = Momento resistente.
- w = Carga repartida que actúa sobre el elemento, en este caso es el peso propio.

Cálculo del peso propio de la viga (w):

$$w = 2400 \text{ kg/m}^3 \times 0.15 \text{ m} \times 0.20 \text{ m}$$

$$w = 72 \text{ kg/m}$$

Cálculo de la carga de agrietamiento, despejando P de la ecuación anterior

$$M = \frac{P_{falla} l}{4} + \frac{w l^2}{8}$$

$$681.06 \text{ kg-m} = \frac{P_{falla}(1.10 \text{ m})}{4} + \frac{72 \text{ kg/m} (1.10 \text{ m})^2}{8}$$

$$P_{falla} = 2436.98 \text{ kg} = 2.437 \text{ Tn}$$

- Cálculo del cortante de acuerdo a la carga de agrietamiento:

$$V = \frac{P_{falla}}{2} + \frac{w l}{2}$$

$$V = \frac{(2436.98 \text{ kg})}{2} + \frac{72 \text{ kg/m} (1.10 \text{ m})}{2}$$

$$V = 1258.09 \text{ kg}$$

2.2.2. Diseño por cortante

De acuerdo a las dos condiciones mencionadas anteriormente, se debe garantizar que la falla por corte se presente después de la falla por flexión y que la carga no supere la carga máxima del marco.

- Cortante resistente del concreto (ϕV_c):

$$\phi V_c = \phi(0.53 \sqrt{f'c} * b_w * d)$$

$$\phi V_c = 1664.73 \text{ kg} = 1.665 \text{ Tn}$$

$\phi =$	0.85
$f'c =$	210 kg/cm ²
$b =$	15.00 cm
$d =$	17.00 cm

Separación de los estribos

Comparación:

- La carga de falla por flexión es de 2.44 Ton
- El concreto resiste a cortante 1.66 Ton

Para que la falla inicial sea por flexión, entonces se tiene que diseñar por cortante:

$$V_n = \phi V_s + \phi V_c$$

$$2.44 \text{ Tn} = \phi V_s + 1.66 \text{ Tn}$$

$$\phi V_s = 0.772 \text{ Tn}$$

$$V_s = 0.909 \text{ Tn}$$

- Aporte Máximo del cortante del acero de acuerdo a norma:

$$V_{s \text{ max}} = 2.1 * \sqrt{f'c} * b * d$$

$$V_{s \text{ max}} = 7.760 \text{ Tn}$$

$\phi =$	0.85
$f'c =$	210 kg/cm ²
$b =$	15.00 cm
$d =$	17.00 cm

Si: $V_{s \text{ max}} > V_s$
Entonces: El acero si absorbe el cortante

- Cálculo del espaciamiento maximo del refuerzo transversal es decir S_{max} :

$$V_s \leq 1.1 * \sqrt{f'c} * b * d \quad \left\{ \begin{array}{l} S_{max} \leq 60 \text{ cm} \\ S_{max} \leq d/2 \text{ cm} \end{array} \right.$$

Si no se cumple la siguiente relacion el S_{max} se reducirá a la mitad

$$V_s \leq 1.1 * \sqrt{f'c} * b * d$$

$$0.909 \text{ Tn} < 4.065 \text{ Tn} \quad \text{OK, Cumple}$$

Por lo tanto:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{max} \leq 60.00 \text{ cm} \\ S_{max} \leq 8.50 \text{ cm} \end{array} \right.$$

Ecogemos el menor de ellos:

$$S_{max} \leq 8.50 \text{ cm}$$

- Cálculo del refuerzo mínimo por cortante

$$S = \frac{A_v * f_y * d}{V_s}$$

Donde: A_v : Área del refuerzo por cortante del espaciamiento "S", proporcionada a la suma de las áreas de las ramas de los estribos ubicados en el alma.

Usamos estribos de: $\varnothing = 6 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} A_v &= 0.560 \text{ cm}^2 \\ f_y &= 4200 \text{ kg/cm}^2 \\ d &= 17.00 \text{ cm} \\ V_s &= 908.52 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$S = 44.01 \text{ cm}$$

Comparación:

$$\begin{aligned} S_{max} &\leq 8.50 \text{ cm} \\ S &= 44.01 \text{ cm} \end{aligned}$$

Elegimos el menor de ellos y lo aproximamos al valor inmediato superior múltiplo de 5, tenemos un espaciamiento S igual a:

$$S = 10.00 \text{ cm}$$

El acero mínimo a corte es el mayor valor de las siguientes equivalencias

$$\begin{aligned} A_{vmin} &= 0.2 * \sqrt{f'c} * b_w * \frac{S}{f_y} = 0.10 \text{ cm}^2 & f'c &= 210 \text{ kg/cm}^2 \\ & & b &= 15.00 \text{ cm} \\ & & d &= 17.00 \text{ cm} \\ A_{vmin} &= 3.5 * \frac{b_w S}{f_y} = 0.13 \text{ cm}^2 & f_y &= 4200 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Eligiendo el mayor valor de ambos resultados y sabiendo que el área de acero transversal es el doble que el área de acero por corte ($A_v=2A_s$); obtenemos:

$$A_s = \frac{A_v}{2} = 0.06 \text{ cm}^2$$

Calculo de V_s de acuerdo al espaciamiento dado:

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{A_v * f_y * d}{S} & A_v &= 0.560 \text{ cm}^2 \\ & & f_y &= 4200 \text{ kg/cm}^2 \\ V_s &= 3.998 \text{ Tn} & d &= 17.00 \text{ cm} \\ & & S &= 10.00 \text{ cm} \end{aligned}$$

Nueva comparación:

Ahora la falla inicial es por flexión, ya que la carga de falla por flexión es de 2.437 Ton y la resistencia a cortante es 3.998 Ton

2.3. Diseño de la Viga para un $f'c=280\text{kg/cm}^2$

2.3.1. Evaluación del M_n solo con el refuerzo a flexión ($2\varnothing 8\text{mm}''$):

Teniendo en cuenta las dos condiciones mencionadas, se empleó concreto y acero con las siguientes especificaciones para una sección de viga igual a:

$$\begin{aligned} \text{Altura de Viga } h &= 20 \text{ cm} & \text{Concreto con } f'c &= 280 \text{ kg/cm}^2 \\ \text{Ancho de Viga } b &= 15 \text{ cm} & \text{Acero con } f_y &= 4200 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

- Para el cálculo se usaron 2 varillas de acero de diametro 8mm

$$A_s = 2 \times 0.50 = 1.00 \text{ cm}^2$$

- Cálculo del peralte efectivo "d":

$$\begin{aligned} d &= 20\text{cm} - (2 \text{ cm} - 0.6\text{cm} - 0.8\text{cm}/2) & \text{Recubrimiento: } & 2 \text{ cm} \\ d &= 17.00 \text{ cm} \end{aligned}$$

- Cálculo de d':

$$\begin{aligned} d' &= 20 \text{ cm} - 17 \text{ cm} \\ d' &= 3.00 \text{ cm} \end{aligned}$$

- Cálculo de la Cuantía mínima y A_{smin}

$$\begin{aligned} \rho_{min} &= 0.7 \frac{\sqrt{f'c}}{f_y} & A_{smin} &= \rho_{min} * b * d & f'c &= 280 \text{ kg/cm}^2 \\ \rho_{min} &= 0.00279 & A_{smin} &= 0.71 \text{ cm}^2 & f_y &= 4200 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

- Cuantía balanceada

$$\rho_b = \beta_1 0.85 \frac{f'c}{f_y} \left(\frac{6000}{6000 + f_y} \right) = 0.02833 \quad \beta_1 = 0.85$$

- Cuantía máxima (Aplicado en Zonas Sísmicas)

$$\rho_{max} = 0.50 \rho_b = 0.01417$$

- Cálculo de la cuantía

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{A_s}{bd} = 0.00392 & A_s &= 1.00 \text{ cm}^2 \\ & & b &= 15.00 \text{ cm} \\ & & d &= 17.00 \text{ cm} \end{aligned}$$

- Chequeo de Cuantías

$$\rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{max}$$

$$0.00279 \quad 0.00392 \quad 0.01417 \quad \text{OK, Está en el rango}$$

- Momento resistente $\emptyset M_n$

$$a = \frac{\rho f_y}{0.85 f'_c} d = 1.18 \text{ cm} \quad \rho = 0.00392$$

$$\emptyset M_n = \emptyset A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 62036.47 \text{ kg-cm} \quad f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$$

$$\emptyset M_n = 620.36 \text{ kg-m} \quad f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$$

$$\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad d = 17.00 \text{ cm}$$

$$\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \emptyset = 0.90$$

$$\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad A_s = 1.00 \text{ cm}^2$$

Para encontrar el momento resistente real, se optó no usar el factor de reducción por flexión $\emptyset = 0.90$; quedando el momento resistente así:

$$M_n = 689.29 \text{ kg-m}$$

- Cálculo de la carga de agrietamiento de acuerdo a la condición del momento máximo:

$$M = \frac{Pl}{4} + \frac{wl^2}{8}$$

Donde:

P = Carga de agrietamiento del elemento.

l = Luz de la viga.

M = Momento resistente.

w = Carga repartida que actúa sobre el elemento, en este caso es el peso propio.

Cálculo del peso propio de la viga (w):

$$w = 2400 \text{ kg/m}^3 \times 0.15 \text{ m} \times 0.20 \text{ m}$$

$$w = 72 \text{ kg/m}$$

Cálculo de la carga de agrietamiento, despejando P de la ecuación anterior

$$M = \frac{P_{falla} l}{4} + \frac{wl^2}{8}$$

$$689.29 \text{ kg-m} = \frac{P_{falla}(1.10 \text{ m})}{4} + \frac{72 \text{ kg/m} (1.10 \text{ m})^2}{8}$$

$$P_{falla} = 2466.92 \text{ kg} = 2.467 \text{ Tn}$$

- Cálculo del cortante de acuerdo a la carga de agrietamiento:

$$V = \frac{P_{falla}}{2} + \frac{wl}{2}$$

$$V = \frac{(2466.92 \text{ kg})}{2} + \frac{72 \text{ kg/m} (1.10 \text{ m})}{2}$$

$$V = 1273.06 \text{ kg}$$

2.3.2. Diseño por cortante

De acuerdo a las dos condiciones mencionadas anteriormente, se debe garantizar que la falla por corte se presente después de la falla por flexión y que la carga no supere la carga máxima del marco.

- Cortante resistente del concreto ($\emptyset V_c$):

$$\emptyset V_c = \emptyset(0.53 \sqrt{f'_c} * b_w * d) \quad \emptyset = 0.85$$

$$\emptyset V_c = 1922.27 \text{ kg} = 1.922 \text{ Tn} \quad f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$$

$$\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad b = 15.00 \text{ cm}$$

$$\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad d = 17.00 \text{ cm}$$

Separación de los estribos

Comparación:

- La carga de falla por flexión es de 2.47 Ton

- El concreto resiste a cortante 1.92 Ton

Para que la falla inicial sea por flexión, entonces se tiene que diseñar por corte:

$$V_n = \emptyset V_s + \emptyset V_c$$

$$2.47 \text{ Tn} = \emptyset V_s + 1.92 \text{ Tn}$$

$$\emptyset V_s = 0.545 \text{ Tn}$$

$$V_s = 0.641 \text{ Tn}$$

- Aporte Máximo del cortante del acero de acuerdo a norma:

$$V_{s \max} = 2.1 * \sqrt{f'c} * b * d$$

$$V_{s \max} = 8.961 \text{ Tn}$$

Si: $V_s \max > V_s$

Entonces: El acero si absorbe el cortante

$$\begin{aligned} \phi &= 0.85 \\ f'c &= 280 \text{ kg/cm}^2 \\ b &= 15.00 \text{ cm} \\ d &= 17.00 \text{ cm} \end{aligned}$$

- Cálculo del espaciamiento maximo del refuerzo transversal es decir Smax:

$$V_s \leq 1.1 * \sqrt{f'c} * b * d \quad \left\{ \begin{array}{l} S \max \leq 60 \text{ cm} \\ S \max \leq d/2 \text{ cm} \end{array} \right.$$

Si no se cumple la siguiente relacion el Smax se reducirá a la mitad

$$V_s \leq 1.1 * \sqrt{f'c} * b * d$$

$$0.641 \text{ Tn} < 4.694 \text{ Tn} \quad \text{OK, Cumple}$$

Por lo tanto:

$$\left\{ \begin{array}{l} S \max \leq 60.00 \text{ cm} \\ S \max \leq 8.50 \text{ cm} \end{array} \right.$$

Ecogemos el menor de ellos:

$$S \max \leq 8.50 \text{ cm}$$

- Cálculo del refuerzo minimo por cortante

$$S = \frac{A_v * f_y * d}{V_s}$$

Donde: A_v : Área del refuerzo por cortante del espaciamiento "S", proporcionada a la suma de las áreas de las ramas de los estribos ubicados en el alma.

Usamos estribos de: $\phi = 6 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} A_v &= 0.560 \text{ cm}^2 \\ f_y &= 4200 \text{ kg/cm}^2 \\ d &= 17.00 \text{ cm} \\ V_s &= 640.77 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$S = 62.40 \text{ cm}$$

Comparación:

$$\begin{aligned} S \max &\leq 8.50 \text{ cm} \\ S &= 62.40 \text{ cm} \end{aligned}$$

Elegimos el menor de ellos y lo aproximamos al valor inmediato superior múltiplo de 5, tenemos un espaciamiento S igual a:

$$S = 10.00 \text{ cm}$$

El acero mínimo a corte es el mayor valor de las siguientes equivalencias

$$A_{v \min} = 0.2 * \sqrt{f'c} * b_w * \frac{S}{f_y} = 0.12 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned} f'c &= 280 \text{ kg/cm}^2 \\ b &= 15.00 \text{ cm} \\ d &= 17.00 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$A_{v \min} = 3.5 * \frac{b_w S}{f_y} = 0.13 \text{ cm}^2$$

$$f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$$

Eligiendo el mayor valor de ambos resultados y sabiendo que el área de acero transversal es el doble que el área de acero por corte ($A_v=2A_s$); obtenemos:

$$A_s = \frac{A_v}{2} = 0.06 \text{ cm}^2$$

Calculo de V_s de acuerdo al espaciamiento dado:

$$V_s = \frac{A_v * f_y * d}{S}$$

$$V_s = 3.998 \text{ Tn}$$

$$\begin{aligned} A_v &= 0.560 \text{ cm}^2 \\ f_y &= 4200 \text{ kg/cm}^2 \\ d &= 17.00 \text{ cm} \\ S &= 10.00 \text{ cm} \end{aligned}$$

Nueva comparación:

Ahora la falla inicial es por flexión, ya que la carga de falla por flexión es de 2.467 Ton y la resistencia a cortante es 3.998 Ton

2.4. Diseño Final de la viga modelo para un $f'c=210\text{kg/cm}^2$ y un $f'c=280\text{kg/cm}^2$

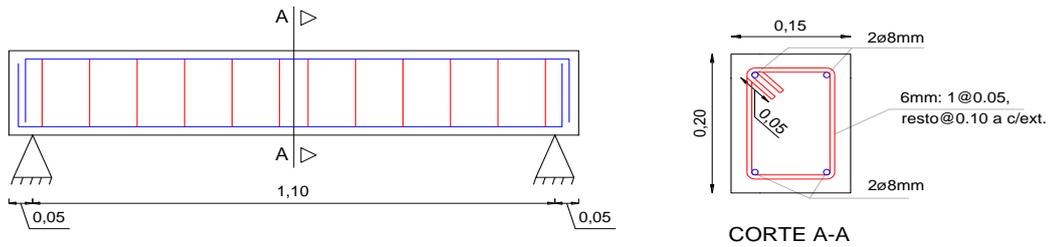
2.4.1. Diseño por flexión

Se usará un área de acero positivo igual a 1.00 cm² equivalente a dos varillas de 8mm; como acero negativo tambien dos varillas de 8 mm igual a 1.00 cm²

2.4.2. Diseño por cortante

Se usará estribos de 6mm, el primer estribo estará 5cm y el resto a 10 cm a cada extremo.

$$6\text{mm}: 1 @ 0.05 + Rto @ 0.10\text{m a c/ext.}$$



2.5. Datos Necesarios para el reforzamiento con CFRP

- | | |
|--|--------------------------------|
| Altura de la Viga : | $h = 20.00 \text{ cm}$ |
| Ancho de la Viga : | $b = 15.00 \text{ cm}$ |
| Peralte Efectivo : | $d = 17.00 \text{ cm}$ |
| Resistencia a compresión del concreto (Viga Tipo I) : | $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ |
| Resistencia a compresión del concreto (Viga Tipo II) : | $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ |
| Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo : | $fy = 4200 \text{ kg/cm}^2$ |
| Módulo de elasticidad del acero de refuerzo : | $Es = 2039000 \text{ kg/cm}^2$ |
| Área de Acero | $A_s = 1.00 \text{ cm}^2$ |
| Momento por Carga Muerta : | $M_{DL} = 10.89 \text{ kg-m}$ |

Carga por Peso Propio:

$$w = 72 \text{ kg/m}$$

Momento por carga muerta:

$$M_{DL} = \frac{wl^2}{8} = \frac{72 \text{ kg/m} \cdot (1.10 \text{ m})^2}{8}$$

$$M_{DL} = 10.89 \text{ kg-m}$$

3. Diseño del reforzamiento a la flexión en viga con Sika® CarboDur®

NOMENCLATURA

h = Altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión.
 b = Ancho de la cara a compresión del elemento.
 A_s = Área de acero de refuerzo.
 A_f = Área de refuerzo CFRP.
 κ_m = Coeficiente dependiente de adherencia.
 C_E = Coeficiente de reducción ambiental.
 ε_s = Deformación del acero de refuerzo.
 ε_{fu} = Deformación de ruptura de diseño del refuerzo CFRP.
 ε_{fe} = Deformación efectiva del refuerzo CFRP alcanzada en la falla.
 ε_{bi} = Deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP.
 ε_{sy} = Deformación unitaria del acero correspondiente al punto de fluencia.
 ε_t = Deformación unitaria del acero en tensión.
 ε_{cu} = Deformación unitaria del concreto.
 ε_{fu}^* = Deformación ultima de ruptura del refuerzo.
 d = Distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo CFRP.
 c = Distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro.
 S_{DL} = Efectos de carga muerta nueva.
 S_{LL} = Efectos de carga viva nueva.
 $f_{c,s}$ = Esfuerzo de compresión del concreto en condición de servicio.
 f_{fu} = Esfuerzo de diseño ultimo a tensión del refuerzo CFRP.
 f_y = Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo.
 f_s = Esfuerzo del acero de refuerzo.
 A_f = Esfuerzo efectivo del refuerzo CFRP en la sección de falla.
 f_{fe} = Esfuerzo efectivo en el refuerzo CFRP alcanzado en la sección al momento de la falla.
 $f_{s,s}$ = Esfuerzo en acero de refuerzo con cargas de servicio.
 $f_{f,s}$ = Esfuerzo en el refuerzo CFRP dentro del rango elástico.
 $F_{f,s}$ = Esfuerzo límite de rotura por fluencia plástica.
 t_f = Espesor nominal de una capa de refuerzo CFRP.
 γ = Factor del $f'c$ para calcular intensidad del rectángulo equivalente de esfuerzos de concreto.
 Ψ_f = Factor de reducción de resistencia del refuerzo CFRP para flexión.
 ϕ = Factor de reducción de resistencia según ACI 318.
 l_{af} = Longitud de anclaje.
 E_s = Módulo de elasticidad del acero de refuerzo.
 E_f = Módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP.
 M_s = Momento de servicio de la sección.
 n = Número de capas del refuerzo CFRP.
 $f'c$ = Resistencia a compresión del concreto.
 M_n = Resistencia nominal a flexión.
 R_n = Resistencia nominal existente del elemento estructura.
 f_{fu} = Resistencia ultima de diseño a tensión.
 f_{fu}^* = Resistencia ultima del material CFRP según fabricante.
 β_1 = Proporción entre la profundidad del bloque rectangular equivalente de esfuerzos y la profundidad del eje neutro.
 k = Proporción entre la profundidad del eje neutro y de la profundidad del refuerzo medido desde la fibra extrema a compresión.

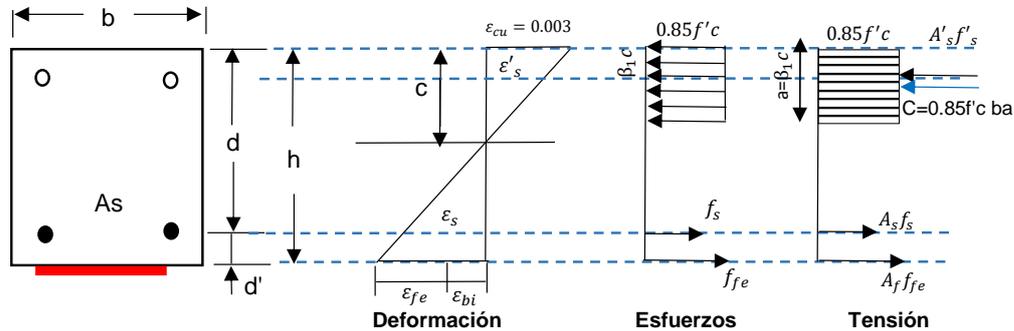
DISEÑO DE LA VIGA DE MODELO

TESIS : "VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS CON LÁMINAS DE FIBRAS DE CARBONO (CFRP)"

TESISTA : SANTOS EDWIN AQUINO CUSQUISIBAN.

3. Diseño del reforzamiento a la flexión en viga con Sika® CarboDur®

A. Diseño para un $f'c=210\text{kg/cm}^2$



Datos:	b =	15.00 cm	Es =	2039000 kg/cm ²
	h =	20.00 cm	f _y =	4200 kg/cm ²
	d =	17.00 cm	M _{DL} =	10.89 kg-m
	f'c =	210 kg/cm ²	M _u =	681.06 kg-m
	As =	1.00 cm ²	M _s =	681.06 kg-m

Sistema de refuerzo FRP:

Tipo de fibra: Sika® CarboDur® S512

Propiedades de la lámina compuesta:

Grosor por capa	t _f =	1.20 mm
Resistencia a la tensión última	f* _{fu} =	2.80 kN/mm ²
Deformación a la rotura	ε* _{fu} =	0.017 mm/mm
Módulo de elasticidad de las láminas FRP	E _f =	165.00 kN/mm ²
Número de capas	n =	1
Ancho de la Fibra	w _f =	5.00 cm

1. Cálculo de las Propiedades de diseño del material del sistema FRP

La viga se encuentra en un lugar cerrado por lo tanto el factor de reducción por exposición al medio ambiente será:

$$C_E = 0.95$$

$$f_{fu} = C_E f^*_{fu} = 0.95 \cdot 2.8 = 2.66 \text{ kN/mm}^2 = 27115.19 \text{ kg/cm}^2$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon^*_{fu} = 0.95 \cdot 0.017 = 0.0162 \text{ mm/mm}$$

Tabla . Factores de reducción ambiental para diferentes sistemas de FRP y condiciones de exposición

Condicion de Exposición	Tipo de Fibra y resina	Factor de reduccion ambiental, CE
Exposición Interior	Carbono / Epoxico	0.95
	Vidrio / Epoxico	0.75
	Aramida / Epoxico	0.85
Exposición Exterior (puentes, muelles y aparcamientos no)	Carbono / Epoxico	0.85
	Vidrio / Epoxico	0.65
	Aramida / Epoxico	0.75
Ambientes agresivos (plantas quimicas y plantas para el tratamiento)	Carbono / Epoxico	0.85
	Vidrio / Epoxico	0.50
	Aramida / Epoxico	0.70

Fuente: ACI 440.2R-17. Guía para diseño y construcción de sistemas FRP externamente adheridos. p.23.

2. Cálculo Preliminares

2.1. Propiedades del concreto

$$\beta_1 = \begin{cases} 0.85 & f'c = [170; 280] \text{ kg/cm}^2 \\ 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'c - 280}{70} \right) & f'c = (280; 560) \text{ kg/cm}^2 \\ 0.65 & f'c \geq 560 \text{ kg/cm}^2 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} f'c &= 210 \text{ kg/cm}^2 \\ \beta_1 &= 0.85 \\ E_c &= 15100 \cdot \sqrt{f'c} \text{ kg/cm}^2 \\ E_c &= 218819.79 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

2.2. Propiedades del acero

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd}, \quad \rho_s = 0.0039$$

$$\eta_s = \frac{E_s}{E_c}, \quad \eta_s = 9.32$$

$$A_s = 1.00 \text{ cm}^2$$

$$b = 15.00 \text{ cm}$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$E_s = 2039000.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_c = 218819.79 \text{ kg/cm}^2$$

2.3. Propiedades del refuerzo FRP adherido externamente

$$A_f = n * t_f * w_f \quad A_f = 60.00 \text{ mm}^2$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad \rho_f = 0.002353$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} \quad n_f = 7.69$$

$$\rho_f * n_f = 0.018085$$

$$n = 1$$

$$t_f = 1.20 \text{ mm}$$

$$w_f = 5.00 \text{ cm}$$

$$b = 15.00 \text{ cm}$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$E_f = 1681957.19 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_c = 218819.79 \text{ kg/cm}^2$$

3. Determinación del estado de deformación existente en la cara inferior:

Asumiendo que la viga está fisurada y que las únicas cargas que actúan sobre la viga en el momento de la instalación del FRP son cargas muertas. Un análisis de la sección fisurada de la viga existente da :

$$\eta_s * A_s = 9.32 \text{ cm}^2$$

$$k = \sqrt{(\rho n)^2 + 2\rho n} - \rho n$$

$$k = 0.23627$$

$$h_c = kd = 4.02 \text{ cm}$$

$$d_s = d - h_c = 12.98 \text{ cm}$$

$$I_{cr} = \frac{b * h_c^3}{3} + nA_s d_s^2 = 1894.72 \text{ cm}^4$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(h - kd)}{I_{cr} E_c} = 0.000042$$

$$\eta_s = 9.32$$

$$A_s = 1.00 \text{ cm}^2$$

$$\rho_s = 0.003922$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$b = 15.00 \text{ cm}$$

$$E_c = 218819.79 \text{ kg/cm}^2$$

$$M_{DL} = 1089.00 \text{ kg-cm}$$

$$h = 20.00 \text{ cm}$$

4. Determinación del coeficiente dependiente de adherencia del sistema FRP

El coeficiente dependiente de adherencia adimensional por flexión, κ_m es calculado utilizando la ecuación:

$$\kappa_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360000} \right) \leq 0.90 & nE_f t_f \leq 180000 \text{ N/mm} \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90000}{nE_f t_f} \right) \leq 0.90 & nE_f t_f > 180000 \text{ N/mm} \end{cases}$$

$$nE_f t_f = 198000 \text{ N/mm} > 180000 \text{ N/mm}$$

$$\kappa_m = 0.4691 \leq 0.90 \quad (\text{OK})$$

$$n = 1$$

$$E_f = 165.00 \text{ kN/mm}^2$$

$$t_f = 1.20 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{fu} = 0.01615 \text{ mm/mm}$$

5. Estimación de c, profundidad del eje neutro

Un estimado inicial razonable de "c" es 0.20d.

$$c = 3.400 \text{ cm}$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

El valor de "c" es ajustado después de verificar el equilibrio de las fuerzas

$$c = 5.41 \text{ cm} \quad c_{cal} = 5.41 \text{ cm} \quad (\text{OK})$$

6. Determinación del nivel efectivo de deformación en el refuerzo FRP

Para la profundidad del eje neutro seleccionado, el aplastamiento del concreto será el modo de falla por cuanto la primera expresión en esta ecuación controla. Si gobierna la segunda expresión (limitante), entonces la falla del FRP será el modo de falla.

$$\varepsilon_{fe} = 0.003 * \frac{h - c}{c} - \varepsilon_{bi} \leq \kappa_m \varepsilon_{fu} \quad \varepsilon_{fe} \leq \kappa_m \varepsilon_{fu}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.00805 > 0.00758$$

$$h = 20.00 \text{ cm}$$

$$c = 5.410 \text{ cm}$$

$$\kappa_m = 0.4691$$

$$\varepsilon_{bi} = 0.000042$$

$$\varepsilon_{fu} = 0.01615 \text{ mm/mm}$$

* De acuerdo al resultado, para la profundidad del eje neutro seleccionado, la falla del FRP será el modo de falla final.

7. Cálculo de la deformación en el acero de refuerzo existente

La deformación en el acero de refuerzo puede ser calculada utilizando triángulos semejantes de acuerdo con la ecuación:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right) \quad \varepsilon_s > 0.005$$

$$\varepsilon_s = 0.0064 > 0.005 \quad (\text{OK})$$

* El acero fluye

$$\varepsilon_{fe} = 0.00805$$

$$\varepsilon_{bi} = 0.00004$$

$$h = 20.00 \text{ cm}$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$c = 5.410 \text{ cm}$$

8. Cálculo del nivel de resistencia en el refuerzo de acero y FRP

Las resistencias son calculadas utilizando las siguientes ecuaciones:

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (\text{kg/cm}^2) \quad f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

$$f_s = 13110.77 > 4200$$

$$f_{fe} = 13538.07 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_s = 2039000.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$\varepsilon_s = 0.00643$$

$$f_y = 4200.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_f = 1681957.19 \text{ kg/cm}^2$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.008049$$

9. Cálculo de las fuerzas resultantes internas y verificación del equilibrio

El equilibrio de fuerza verificado mediante la comprobación del estimado inicial de "c", ya que el aplastamiento concreto controla la falla, y puede ser tomada como 0.85

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f'_c \beta_1 b}$$

$$c = 5.41 \text{ cm}$$

$$f_s = 4200.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{fe} = 13538.07 \text{ kg/cm}^2$$

$$A_s = 1.00 \text{ cm}^2$$

$$A_f = 0.60 \text{ cm}^2$$

$$b = 15.00 \text{ cm}$$

$$\gamma = 0.85$$

$$\beta_1 = 0.85$$

$$f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$$

10. Verificación de "c" hasta que el equilibrio de las fuerzas sea satisfecho

$$c = 5.41 \text{ cm} = 5.41 \text{ cm} \quad (\text{OK}) \quad c = c_{inicial}$$

11. Cálculo de la resistencia de diseño a flexión de la sección

La resistencia de diseño a flexión es calculada utilizando la ecuación siguiente:

$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{para } \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.65 & \text{para } \varepsilon_s < \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

$$\varepsilon_s = 0.00643$$

$$\varepsilon_{sy} = 0.00206$$

$$\phi = 0.90$$

Momento nominal resistente por parte del acero:

$$M_{ns} = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) = 61743.15 \text{ kg-cm}$$

$$A_s = 1.00 \text{ cm}^2$$

$$f_s = 4200.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$\beta_1 = 0.85$$

Momento nominal resistente por parte del FRP:

$$M_{nf} = A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) = 143780.43 \text{ kg-cm}$$

$$c = 5.410 \text{ cm}$$

$$A_f = 0.60 \text{ cm}^2$$

$$f_{fe} = 13538.07 \text{ kg/cm}^2$$

$$d_f = h = 20.00 \text{ cm}$$

Momento nominal resistente del sistema FRP:

El factor de seguridad adicional, $\Psi = 0.85$, es aplicado a la construcción del sistema FRP.

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + \Psi_f M_{nf}] = 165560.86 \text{ kg-cm}$$

$$\Psi = 0.85$$

$$\phi M_n = 1655.61 \text{ kg-m}$$

Comparación:

$$\phi M_n = 1655.61 \text{ kg-m} < M_u = 681.06 \text{ kg-m}$$

Conclusión:

OK, Es capaz de resistir

12. Verificación de los esfuerzos de servicio en el refuerzo de acero y en el FRP

Cálculo de la profundidad elástica al eje neutro fisurado mediante la suma del primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede ser simplificado para una viga rectangular sin refuerzo a compresión, como sigue:

$$k = \sqrt{(\rho_s n_s + \rho_f n_f)^2 + 2 \left(\rho_s n_s + \rho_f n_f * \left(\frac{h}{d} \right) \right)} - (\rho_s n_s + \rho_f n_f)$$

$$k = 0.28979407$$

$$\rho_s = 0.003922$$

$$n_s = 9.32$$

$$\rho_f = 0.002353$$

$$n_f = 7.69$$

$$h = 20.00 \text{ cm}$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$kd = 4.93 \text{ cm}$$

Calculo del nivel de esfuerzo en el acero de refuerzo utilizando la ecuacion siguiente y verificacion de que menor al limite recomendado

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + A_f E_f \varepsilon_{bi} \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{\left[A_s E_s \left(h - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f (h - kd) \left(d - \frac{kd}{3} \right) \right]}$$

$$f_{s,s} = 2319.22 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{s,s} \leq 0.80 f_y$$

$$f_{s,s} = 2319.22 \text{ kg/cm}^2 < f_y = 3360.00 \text{ kg/cm}^2$$

(OK)

$$M_s = 68106.00 \text{ kg-cm}$$

$$A_f = 0.60 \text{ cm}^2$$

$$E_f = 1681957.19 \text{ kg/cm}^2$$

$$\varepsilon_{bi} = 0.000042$$

$$h = 20.00 \text{ cm}$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$kd = 4.93 \text{ cm}$$

$$E_s = 2039000.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$A_s = 1.00 \text{ cm}^2$$

$$f_y = 4200.00 \text{ kg/cm}^2$$

Calculo del nivel de esfuerzo en el FRP usando la ecuacion siguiente y verificar que sea menor que el limite de esfuerzo de rotura por fluencia plastica. Se asume que la carga de servicio total es sostenida

$$f_{f,s} = f_{s,s} * \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \left(\frac{h - kd}{d - kd} \right) - \varepsilon_{bi} E_f$$

$$f_{f,s} = 2317.83 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{f,s} = 0.55 * f_{fu} = 14913.35 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{f,s} = 14913.35 \text{ kg/cm}^2 > f_{f,s} = 2317.83 \text{ kg/cm}^2$$

OK, Está del del limite permisible

$$f_{s,s} = 2319.22 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_f = 1681957.19 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_s = 2039000.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$h = 20.00 \text{ cm}$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$kd = 4.93 \text{ cm}$$

$$\varepsilon_{bi} = 0.000042$$

$$f_{fu} = 27115.19 \text{ kg/cm}^2$$

13. Detalle del Refuerzo

La capacidad de adherencia del CFRP es desarrollada sobre una longitud de desarrollo l_{df} pues para desarrollar el esfuerzo efectivo del CFRP en la sección el anclaje disponible debe ser mayor que , según la ecuación:

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n * E_f * t_f}{\sqrt{f'c}}}$$

$$l_{df} = 118.02 \text{ mm}$$

$$n = 1$$

$$E_f = 16819.57 \text{ kg/mm}^2$$

$$t_f = 1.20 \text{ mm}$$

$$f'c = 2.10 \text{ kg/mm}^2$$

Para vigas simplemente apoyadas, las platinas y tejidos de Sika CarboDur deben extenderse a lo largo de toda la luz para terminar tan cerca a los apoyos como sea posible

14. Carga de Falla con Reforzamiento (Teórico)

Momento nominal resistente del sistema FRP:

$$\phi M_n = 1655.61 \text{ kg-m} \quad \phi = 0.90$$

$$M_n = 1839.57 \text{ kg-m}$$

Cálculo de la carga de agrietamiento, despejando P de la ecuación anterior

$$M = \frac{P_{falla} l}{4} + \frac{wl^2}{8}$$

$$w = 72 \text{ kg/m}$$

$$l = 1.10 \text{ m}$$

$$1839.57 \text{ kg-m} = \frac{P_{falla}(1.10 \text{ m})}{4} + \frac{72 \text{ kg/m} (1.10 \text{ m})^2}{8}$$

$$P_{falla} = 6649.73 \text{ kg} = 6.650 \text{ Tn}$$

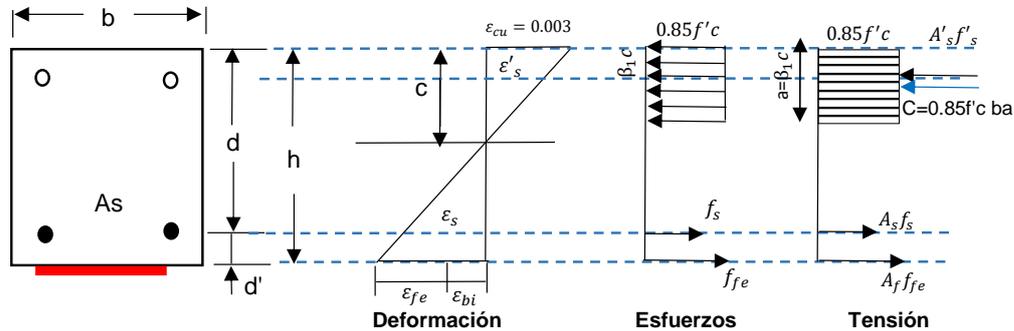
DISEÑO DE LA VIGA DE MODELO

TESIS : "VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS CON LÁMINAS DE FIBRAS DE CARBONO (CFRP)"

TESISTA : SANTOS EDWIN AQUINO CUSQUISIBAN.

3. Diseño del reforzamiento a la flexión en viga con Sika® CarboDur®

B. Diseño para un $f'c=280\text{kg/cm}^2$



Datos:	b =	15.00 cm	Es =	2039000 kg/cm ²
	h =	20.00 cm	f _y =	4200 kg/cm ²
	d =	17.00 cm	M _{DL} =	10.89 kg-m
	f'c =	280 kg/cm ²	M _u =	681.06 kg-m
	As =	1.00 cm ²	M _s =	681.06 kg-m

Sistema de refuerzo FRP:

Tipo de fibra: Sika® CarboDur® S512

Propiedades de la lámina compuesta:

Grosor por capa	t _f =	1.20 mm
Resistencia a la tensión última	f* _{fu} =	2.80 kN/mm ²
Deformación a la rotura	ε* _{fu} =	0.017 mm/mm
Módulo de elasticidad de las láminas FRP	E _f =	165.00 kN/mm ²
Número de capas	n =	1
Ancho de la Fibra	w _f =	5.00 cm

1. Cálculo de las Propiedades de diseño del material del sistema FRP

La viga se encuentra en un lugar cerrado por lo tanto el factor de reducción por exposición al medio ambiente será:

$$C_E = 0.95$$

$$f_{fu} = C_E f^*_{fu} = 0.95 \cdot 2.8 = 2.66 \text{ kN/mm}^2 = 27115.19 \text{ kg/cm}^2$$

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon^*_{fu} = 0.95 \cdot 0.017 = 0.0162 \text{ mm/mm}$$

Tabla . Factores de reducción ambiental para diferentes sistemas de FRP y condiciones de exposición

Condicion de Exposición	Tipo de Fibra y resina	Factor de reduccion ambiental, CE
Exposición Interior	Carbono / Epoxico	0.95
	Vidrio / Epoxico	0.75
	Aramida / Epoxico	0.85
Exposición Exterior (puentes, muelles y aparcamientos no)	Carbono / Epoxico	0.85
	Vidrio / Epoxico	0.65
	Aramida / Epoxico	0.75
Ambientes agresivos (plantas quimicas y plantas para el tratamiento)	Carbono / Epoxico	0.85
	Vidrio / Epoxico	0.50
	Aramida / Epoxico	0.70

Fuente: ACI 440.2R-17. Guía para diseño y construcción de sistemas FRP externamente adheridos. p.23.

2. Cálculo Preliminares

2.1. Propiedades del concreto

$$\beta_1 = \begin{cases} 0.85 & f'c = [170; 280] \text{ kg/cm}^2 \\ 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'c - 280}{70} \right) & f'c = (280; 560) \text{ kg/cm}^2 \\ 0.65 & f'c \geq 560 \text{ kg/cm}^2 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} f'c &= 280 \text{ kg/cm}^2 \\ \beta_1 &= 0.85 \\ E_c &= 15100 \cdot \sqrt{f'c} \text{ kg/cm}^2 \\ E_c &= 252671.33 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

2.2. Propiedades del acero

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd}, \quad \rho_s = 0.0039$$

$$\eta_s = \frac{E_s}{E_c}, \quad \eta_s = 8.07$$

$$A_s = 1.00 \text{ cm}^2$$

$$b = 15.00 \text{ cm}$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$E_s = 2039000.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_c = 252671.33 \text{ kg/cm}^2$$

2.3. Propiedades del refuerzo FRP adherido externamente

$$A_f = n * t_f * w_f \quad A_f = 60.00 \text{ mm}^2$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad \rho_f = 0.002353$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} \quad n_f = 6.66$$

$$\rho_f * n_f = 0.015664$$

$$n = 1$$

$$t_f = 1.20 \text{ mm}$$

$$w_f = 5.00 \text{ cm}$$

$$b = 15.00 \text{ cm}$$

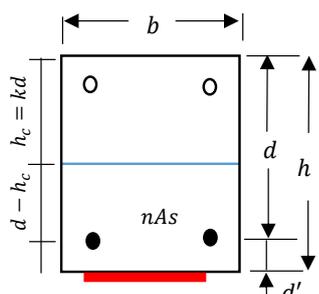
$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$E_f = 1681957.19 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_c = 252671.33 \text{ kg/cm}^2$$

3. Determinación del estado de deformación existente en la cara inferior:

Asumiendo que la viga está fisurada y que las únicas cargas que actúan sobre la viga en el momento de la instalación del FRP son cargas muertas. Un análisis de la sección fisurada de la viga existente da :



$$\eta_s * A_s = 8.07 \text{ cm}^2$$

$$k = \sqrt{(\rho n)^2 + 2\rho n} - \rho n$$

$$k = 0.22193$$

$$h_c = kd = 3.77 \text{ cm}$$

$$d_s = d - h_c = 13.23 \text{ cm}$$

$$I_{cr} = \frac{b * h_c^3}{3} + nA_s d_s^2 = 1680.43 \text{ cm}^4$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(h - kd)}{I_{cr} E_c} = 0.000042$$

$$\eta_s = 8.07$$

$$A_s = 1.00 \text{ cm}^2$$

$$\rho_s = 0.003922$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$b = 15.00 \text{ cm}$$

$$E_c = 252671.33 \text{ kg/cm}^2$$

$$M_{DL} = 1089.00 \text{ kg-cm}$$

$$h = 20.00 \text{ cm}$$

4. Determinación del coeficiente dependiente de adherencia del sistema FRP

El coeficiente dependiente de adherencia adimensional por flexión, κ_m es calculado utilizando la ecuación:

$$\kappa_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360000} \right) \leq 0.90 & nE_f t_f \leq 180000 \text{ N/mm} \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90000}{nE_f t_f} \right) \leq 0.90 & nE_f t_f > 180000 \text{ N/mm} \end{cases}$$

$$nE_f t_f = 198000 \text{ N/mm} > 180000 \text{ N/mm}$$

$$\kappa_m = 0.4691 \leq 0.90 \quad (\text{OK})$$

$$n = 1$$

$$E_f = 165.00 \text{ kN/mm}^2$$

$$t_f = 1.20 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{fu} = 0.01615 \text{ mm/mm}$$

5. Estimación de c, profundidad del eje neutro

Un estimado inicial razonable de "c" es 0.20d.

$$c = 3.400 \text{ cm}$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

El valor de "c" es ajustado después de verificar el equilibrio de las fuerzas

$$c = 4.66 \text{ cm} \quad c_{cal} = 4.66 \text{ cm} \quad (\text{OK})$$

6. Determinación del nivel efectivo de deformación en el refuerzo FRP

Para la profundidad del eje neutro seleccionado, el aplastamiento del concreto será el modo de falla por cuanto la primera expresión en esta ecuación controla. Si gobierna la segunda expresión (limitante), entonces la falla del FRP será el modo de falla.

$$\varepsilon_{fe} = 0.003 * \frac{h - c}{c} - \varepsilon_{bi} \leq \kappa_m \varepsilon_{fu} \quad \varepsilon_{fe} \leq \kappa_m \varepsilon_{fu}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.00985 > 0.00758$$

$$h = 20.00 \text{ cm}$$

$$c = 4.655 \text{ cm}$$

$$\kappa_m = 0.4691$$

$$\varepsilon_{bi} = 0.000042$$

$$\varepsilon_{fu} = 0.01615 \text{ mm/mm}$$

* De acuerdo al resultado, para la profundidad del eje neutro seleccionado, la falla del FRP será el modo de falla final.

7. Cálculo de la deformación en el acero de refuerzo existente

La deformación en el acero de refuerzo puede ser calculada utilizando triángulos semejantes de acuerdo con la ecuación:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right) \quad \varepsilon_s > 0.005$$

$$\varepsilon_s = 0.0080 > 0.005 \quad (\text{OK})$$

* El acero fluye

$$\varepsilon_{fe} = 0.00985$$

$$\varepsilon_{bi} = 0.00004$$

$$h = 20.00 \text{ cm}$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$c = 4.655 \text{ cm}$$

8. Cálculo del nivel de resistencia en el refuerzo de acero y FRP

Las resistencias son calculadas utilizando las siguientes ecuaciones:

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (kg/cm^2) \quad f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

$$f_s = 16230.44 > 4200$$

$$f_{fe} = 16562.23 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_s = 2039000.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$\varepsilon_s = 0.00796$$

$$f_y = 4200.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_f = 1681957.19 \text{ kg/cm}^2$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.009847$$

9. Cálculo de las fuerzas resultantes internas y verificación del equilibrio

El equilibrio de fuerza verificado mediante la comprobación del estimado inicial de "c", ya que el aplastamiento del concreto controla la falla, y puede ser tomada como 0.85

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f'_c \beta_1 b}$$

$$c = 4.66 \text{ cm}$$

$$f_s = 4200.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{fe} = 16562.23 \text{ kg/cm}^2$$

$$A_s = 1.00 \text{ cm}^2$$

$$A_f = 0.60 \text{ cm}^2$$

$$b = 15.00 \text{ cm}$$

$$\gamma = 0.85$$

$$\beta_1 = 0.85$$

$$f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$$

10. Verificación de "c" hasta que el equilibrio de las fuerzas sea satisfecho

$$c = 4.66 \text{ cm} = 4.66 \text{ cm} \quad (\text{OK}) \quad c = c_{inicial}$$

11. Cálculo de la resistencia de diseño a flexión de la sección

La resistencia de diseño a flexión es calculada utilizando la ecuación siguiente:

$$\phi = \begin{cases} 0.90 & \text{para } \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.65 & \text{para } \varepsilon_s < \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

$$\varepsilon_s = 0.00796$$

$$\varepsilon_{sy} = 0.00206$$

$$\phi = 0.90$$

Momento nominal resistente por parte del acero:

$$M_{ns} = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) = 63090.83 \text{ kg-cm}$$

$$A_s = 1.00 \text{ cm}^2$$

$$f_s = 4200.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$\beta_1 = 0.85$$

Momento nominal resistente por parte del FRP:

$$M_{nf} = A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) = 179087.00 \text{ kg-cm}$$

$$c = 4.655 \text{ cm}$$

$$A_f = 0.60 \text{ cm}^2$$

$$f_{fe} = 16562.23 \text{ kg/cm}^2$$

$$d_f = h = 20.00 \text{ cm}$$

Momento nominal resistente del sistema FRP:

El factor de seguridad adicional, $\Psi = 0.85$, es aplicado a la construcción del sistema FRP.

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + \Psi_f M_{nf}] = 189907.63 \text{ kg-cm}$$

$$\Psi = 0.85$$

$$\phi M_n = 1899.08 \text{ kg-m}$$

Comparación:

$$\phi M_n = 1899.08 \text{ kg-m} < M_u = 681.06 \text{ kg-m}$$

Conclusión:

OK, Es capaz de resistir

12. Verificación de los esfuerzos de servicio en el refuerzo de acero y en el FRP

Cálculo de la profundidad elástica al eje neutro fisurado mediante la suma del primer momento de las áreas de la sección transformada. Esto puede ser simplificado para una viga rectangular sin refuerzo a compresión, como sigue:

$$k = \sqrt{(\rho_s n_s + \rho_f n_f)^2 + 2 \left(\rho_s n_s + \rho_f n_f * \left(\frac{h}{d} \right) \right)} - (\rho_s n_s + \rho_f n_f)$$

$$k = 0.27267932$$

$$\rho_s = 0.003922$$

$$n_s = 8.07$$

$$\rho_f = 0.002353$$

$$n_f = 6.66$$

$$h = 20.00 \text{ cm}$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$kd = 4.64 \text{ cm}$$

Calculo del nivel de esfuerzo en el acero de refuerzo utilizando la ecuacion siguiente y verificacion de que menor al limite recomendado

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + A_f E_f \varepsilon_{bi} \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{\left[A_s E_s \left(h - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f (h - kd) \left(d - \frac{kd}{3} \right) \right]}$$

$$f_{s,s} = 2311.30 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{s,s} \leq 0.80 f_y$$

$$f_{s,s} = 2311.30 \text{ kg/cm}^2 < f_y = 3360.00 \text{ kg/cm}^2$$

(OK)

$$M_s = 68106.00 \text{ kg-cm}$$

$$A_f = 0.60 \text{ cm}^2$$

$$E_f = 1681957.19 \text{ kg/cm}^2$$

$$\varepsilon_{bi} = 0.000042$$

$$h = 20.00 \text{ cm}$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$kd = 4.64 \text{ cm}$$

$$E_s = 2039000.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$A_s = 1.00 \text{ cm}^2$$

$$f_y = 4200.00 \text{ kg/cm}^2$$

Calculo del nivel de esfuerzo en el FRP usando la ecuacion siguiente y verificar que sea menor que el limite de esfuerzo de rotura por fluencia plastica. Se asume que la carga de servicio total es sostenida

$$f_{f,s} = f_{s,s} * \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \left(\frac{h - kd}{d - kd} \right) - \varepsilon_{bi} E_f$$

$$f_{f,s} = 2298.53 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{f,s} = 0.55 * f_{fu} = 14913.35 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_{f,s} = 14913.35 \text{ kg/cm}^2 > f_{f,s} = 2298.53 \text{ kg/cm}^2$$

OK, Está del del limite permisible

$$f_{s,s} = 2311.30 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_f = 1681957.19 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_s = 2039000.00 \text{ kg/cm}^2$$

$$h = 20.00 \text{ cm}$$

$$d = 17.00 \text{ cm}$$

$$kd = 4.64 \text{ cm}$$

$$\varepsilon_{bi} = 0.000042$$

$$f_{fu} = 27115.19 \text{ kg/cm}^2$$

13. Detalle del Refuerzo

La capacidad de adherencia del CFRP es desarrollada sobre una longitud de desarrollo l_{df} pues para desarrollar el esfuerzo efectivo del CFRP en la sección el anclaje disponible debe ser mayor que , según la ecuación:

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n * E_f * t_f}{\sqrt{f'c}}}$$

$$l_{df} = 109.83 \text{ mm}$$

$$n = 1$$

$$E_f = 16819.57 \text{ kg/mm}^2$$

$$t_f = 1.20 \text{ mm}$$

$$f'c = 2.80 \text{ kg/mm}^2$$

Para vigas simplemente apoyadas, las platinas y tejidos de Sika CarboDur deben extenderse a lo largo de toda la luz para terminar tan cerca a los apoyos como sea posible

14. Carga de Falla con Reforzamiento (Teórico)

Momento nominal resistente del sistema FRP:

$$\phi M_n = 1899.08 \text{ kg-m} \quad \phi = 0.90$$

$$M_n = 2110.08 \text{ kg-m}$$

Cálculo de la carga de agrietamiento, despejando P de la ecuación anterior

$$M = \frac{P_{falla} l}{4} + \frac{wl^2}{8}$$

$$w = 72 \text{ kg/m}$$

$$l = 1.10 \text{ m}$$

$$2110.08 \text{ kg-m} = \frac{P_{falla}(1.10 \text{ m})}{4} + \frac{72 \text{ kg/m} (1.10 \text{ m})^2}{8}$$

$$P_{falla} = 7633.44 \text{ kg} = 7.633 \text{ Tn}$$

ANEXO V: CONSTANCIA DE USO DEL LABORATORIO:

Anexo V.1: Constancia del Laboratorio de Ensayo de materiales



Universidad Nacional de Cajamarca
FACULTAD DE INGENIERÍA
Laboratorio de Ensayo de Materiales



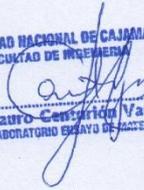
EL JEFE DE LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA, DEJA:

CONSTANCIA:

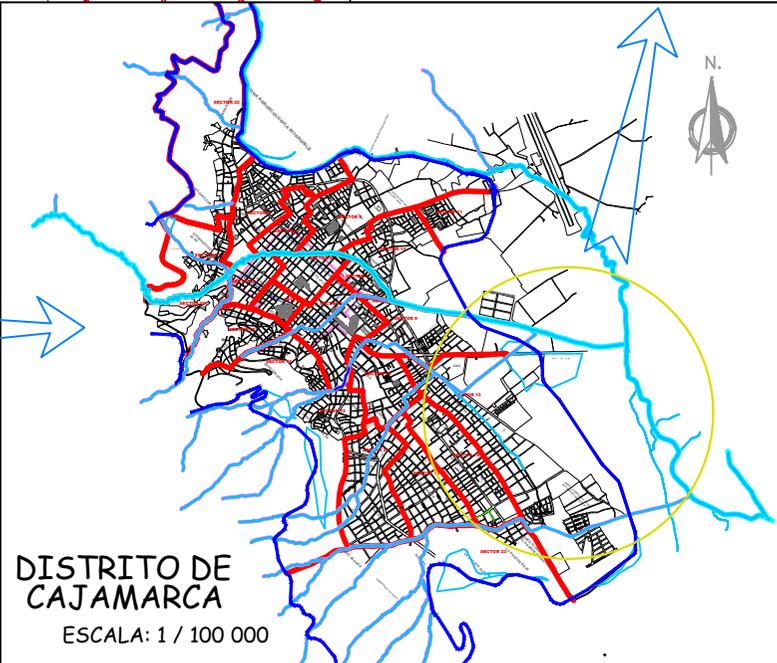
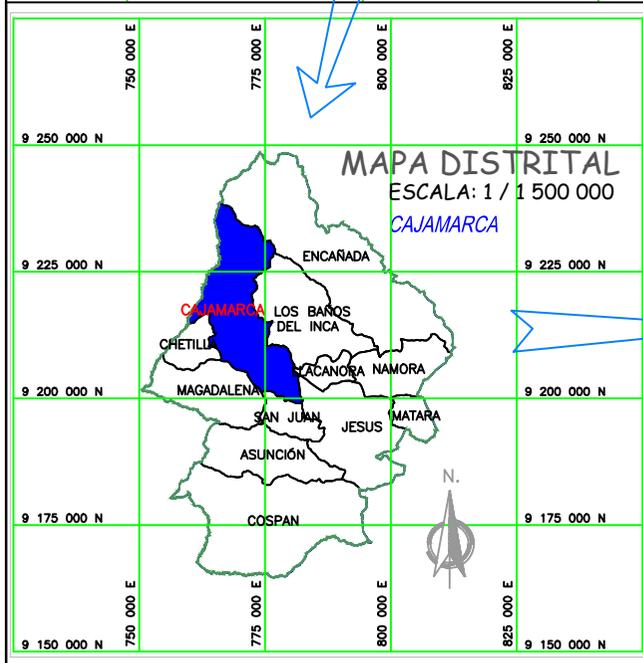
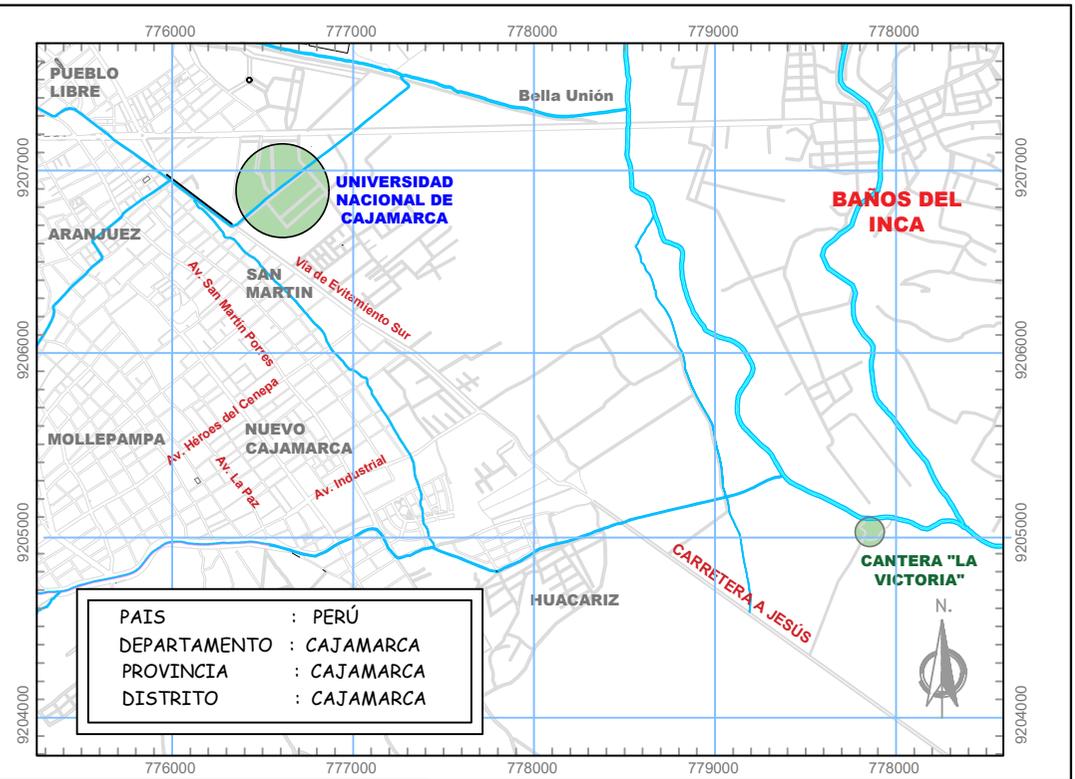
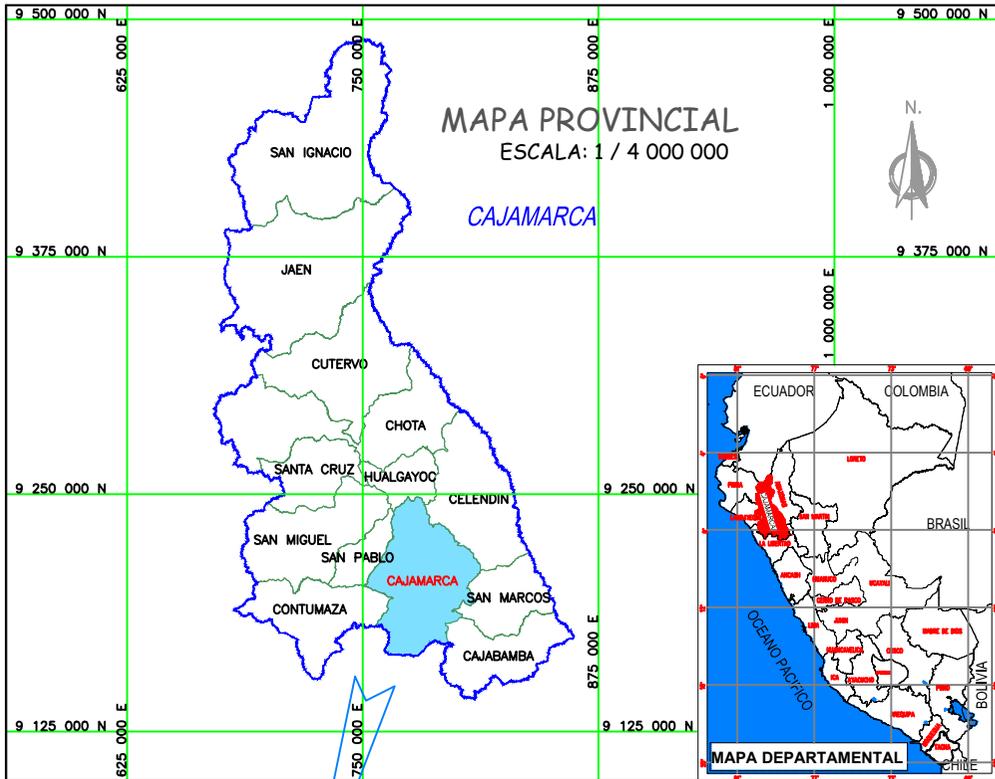
Que el joven SANTOS EDWIN AQUINO CUSQUISIBÁN, Bachiller de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, **ha realizado sus ensayos en el Laboratorio de Ensayo de Materiales** de la Facultad de Ingeniería de la UNC, para la Tesis Titulada: "VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS CON LÁMINAS DE FIBRAS DE CARBONO (CFRP)". Dichos ensayos se realizaron del 26 de noviembre al 18 de diciembre del 2018.

Se expide el presente, para fines que se estime conveniente.

Cajamarca, 21 de diciembre de 2018.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Ing. Mauro Centurión Vargas
JEFE DEL LABORATORIO ENSAYO DE MATERIALES

ANEXO VI: PLANO DE UBICACIÓN DE LA CANTERA:



<p>UBICACION DE LA CANTERA ESCALA: 1 / 40 000</p> <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</p>		
<p>TESIS: "VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS CON LÁMINAS DE FIBRAS DE CARBONO (CFRP)"</p>		
<p>PLANO: PLANO DE UBICACIÓN DE LA CANTERA "LA VICTORIA" - CAJAMARCA</p>		<p>PLANO: U</p>
<p>TESISTA: AQUINO CUSQUISIBÁN, Santos Edwin</p>		

ANEXO VII: HOJAS TÉCNICAS:

Anexo VII.1: Cemento Pacasmayo Tipo I



CEMENTOS PACASMAYO S.A.A.

Calle La Colonia Nro.150 Urb. El Vivero de Monterrico Santiago de Surco - Lima
Carretera Panamericana Norte Km. 666 Pacasmayo - La Libertad
Teléfono 317 - 6000



G-CC-F-04
Versión 03

Cemento Portland Tipo I

Conforme a la NTP 334.009 / ASTM C150

Pacasmayo, 16 de Marzo del 2018

COMPOSICIÓN QUÍMICA		CPSAA	Requisito NTP 334.009 / ASTM C150
MgO	%	2.3	Máximo 6.0
SO ₃	%	2.8	Máximo 3.0
Pérdida por Ignición	%	3.1	Máximo 3.5
Residuo Insoluble	%	0.59	Máximo 1.5

PROPIEDADES FÍSICAS		CPSAA	Requisito NTP 334.009 / ASTM C150
Contenido de Aire	%	8	Máximo 12
Expansión en Autoclave	%	0.08	Máximo 0.80
Superficie Específica	cm ² /g	3800	Mínimo 2800
Densidad	g/mL	3.14	NO ESPECIFICA

Resistencia Compresión :

Resistencia Compresión a 3días	MPa (Kg/cm ²)	30.8 (314)	Mínimo 12.0 (Mínimo 122)
Resistencia Compresión a 7días	MPa (Kg/cm ²)		Mínimo 19.0 (Mínimo 194)
Resistencia Compresión a 28días (*)	MPa (Kg/cm ²)	44.0 (449)	Mínimo 28.0 (Mínimo 286)

Tiempo de Fraguado Vicat :

Fraguado Inicial	min	147	Mínimo 45
Fraguado Final	min	267	Máximo 375

Los resultados arriba mostrados, corresponden al promedio del cemento despachado durante el periodo del 01-02-2018 al 28-02-2018.

La resistencia a la compresión a 28 días corresponde al mes de Enero 2018.

(*) Requisito opcional.

Anexo VI.2: Sika CarboDur

Hoja Técnica
Edición 4, 19/07/99, LC
Sika® CarboDur®

Construcción

Sika® CarboDur®

Sistema de Refuerzo a Base de Polímeros Reforzados con Fibra de CarboDur (CFRP)

Descripción

General

Es un sistema de refuerzo para concreto armado o estructuras de acero y metal. Este sistema está compuesto por láminas de refuerzo resistentes a la corrosión, reforzadas con fibra de carbono (CFRP) y el adhesivo especial Sikadur 30.

Campos de aplicación

El sistema Sika CarboDur se utiliza para refuerzos de estructuras de concreto, madera y metal, en los siguientes casos:

Incremento de carga

- Incremento de cargas vivas en almacenes
- Incremento de volumen de tráfico en puentes
- Instalación de maquinaria pesada en edificios industriales
- Estructuras sometidas a vibración
- Cambios de uso en edificaciones

Daños a partes estructurales

- Envejecimiento de materiales de construcción
- Corrosión de los refuerzos de acero
- Impacto de vehículos
- Incendios

Mejora de la capacidad de servicio

- Disminución de la deformación
- Reducción de la fatiga en los refuerzos de acero
- Reducción del ancho de las fisuras

Cambios en sistemas estructurales

- Eliminación de paredes o columnas
- Eliminación de una sección de loza

Defectos en el procedimiento constructivo o diseño

- Insuficiente refuerzo
- Insuficiente recubrimiento

Ventajas

- Poco peso
- Disponibilidad en cualquier longitud sin necesidad de traslapes
- Poco espesor
- Fácil de transportar (en rollos)
- Las láminas no requieren previo tratamiento
- Simplicidad en las intersecciones de las láminas (emparillados)
- Aplicación de bajo costo. No requiere manipulación compleja ni equipo de instalación
- Gran resistencia a la tracción
- Disponibilidad en varios módulos de elasticidad
- Excelente resistencia a la fatiga
- Permite ser pintado sin preparación previa
- Resistente a los álcalis



Datos Básicos

Presentación	Tipo	Ancho mm	Espesor mm	Área de corte transversal mm ²
Sika CarboDur S Módulo E > 165 000 N/mm ²				
	S512	50	1.2	60
	S612	60	1.2	72
	S818	80	1.2	96
	S1012	100	1.2	120
	S1212	120	1.2	144
	S1512	150	1.2	180
	S614	60	1.4	84
	S914	90	1.4	126
	S1214	120	1.4	168
Sika CarboDur M Módulo E > 210 000 N/mm ²				
	M614	60	1.4	84
	M914	90	1.4	126
	M214	120	1.4	168
Sika CarboDur H Módulo E > 300 000 N/mm ²				
	H514	50	1.4	70

Envases

- Lámina CarboDur : Rollo de 250 m
- Sikadur 30: Unidades pre-selladas (comp- A+B) de 5 kg

Almacenamiento

- Lámina CFRP
Se puede almacenar ilimitadamente, siempre que no se le exponga a la luz solar directa.
- Sikadur 30
Se puede almacenar durante un año en su envase original entre +5°C y +25°C.

Datos Técnicos

Láminas CarboDur (CFRP)	Color	Negro		
	Composición	Fibra de carbono reforzada con matriz epóxica		
	Volumen de fibra	>68%		
		Sika CarboDur S	Sika CarboDur M	Sika CarboDur H
	Módulos E	>165 000 N/mm ²	>210 000 N/mm ²	>300 000 N/mm ²
	Resistencia a la tracción	>2800 N/mm ²	>2400 N/mm ²	>1300 N/mm ²
	Resistencia a la rotura *	3050 N/mm ²	2900 N/mm ²	1450 N/mm ²
	Elongación a la rotura	>1.7%	>1.2%	>0.45%
	Densidad	1.5 g/cm ³	1.6 g/cm ³	1.6 g/cm ³

(*) Valores mecánicos obtenidos según la longitudinal de las fibras.

Adhesivos Sikadur 30 para refuerzos por pegado	Aspecto	Compuesto A	Pasta blanca grisácea
		Compuesto B	Pasta negra
		Compuesto A + B	Pasta gris claro
	Densidad	1.77 kg/l	
Post-life (según FIB)*	40 minutos (a 35°C)		
Tiempo abierto (según FIB)	30 minutos (a 35°C)		
Flujo de escurrimiento (según FIB)*	3-5 mm (a 35°)		
Encogimiento (según FIB)*	0.04%		
Punto de transición, avidriado (según FIB)*	62°C		
Módulo E estático (según FIB)*	12 800 N/mm ²		
Fuerza de adhesión (húmedo) (según FIB)*	Falla del concreto 4 N/mm ²		
Resistencia a cortante (según FIB)*	Falla del concreto 15 N/mm ²		
Coefficiente de expansión	9 x 10-5 por °C (-10°C a +40°C)		

(*) Federación Internacional de Pre-armado

Los valores pueden variar según la intensidad de la mezcla y el monto de aire que se incorpore mediante la misma. (Gráfico)

Aplicación

Consumo

Tipo de lámina	Sikadur 30
S512 / M514	0.34 kg/ml
S612 / S614 / M614	0.41 kg/ml
S812	0.54 kg/ml
S914 / M914	0.61 kg/ml
S1012	0.67 kg/ml
S12112 / S1214 / M1214	0.80 kg/ml
S1512	1.02 kg/ml

La cantidad de adhesivo consumida varía dependiendo del nivel y rugosidad de la superficie, así como de cuántas láminas se superpongan.

Mezclado de Sikadur 30

Comp. A : Comp. B = 3 : 1 (partes en peso)

Procedimiento para la evaluación de la condición de la estructura

Las dimensiones (geometría, refuerzos, emparejamiento de la superficie que se va a reforzar), la calidad de los materiales de construcción empleados, condiciones climáticas ambientales, y las estipulaciones de operación.

Verificaciones

Seguridad de soporte

- Estructura no reforzada (con margen para un factor de seguridad de reducción total de = 1)
- Estructura reforzada (según el modo de falla descrito anteriormente, chequear las deformaciones)
- Fractura la lámina
- Anclajes

Resistencia a la fatiga

- Verificar las tensiones para el concreto y acero

Condiciones de servicio

- Deformación (con deformaciones medias, asumiendo el comportamiento elástico de la estructura y cambios de las deformaciones en el concreto con el paso del tiempo)
- Tensión del acero (no se produce deformación plástica en condiciones de servicio)
- Ancho de fracturas (limitando las tensiones sobre el acero en condiciones de servicio)

Recomendaciones previas para la aplicación de Sika CarboDur	<ul style="list-style-type: none"> ■ Temperatura del sustrato: $\pm 8^{\circ}\text{C}$ ■ Máxima humedad relativa en toda la aplicación: 85% ■ Contenido máximo de humedad: 4% ■ El sustrato debe estar al menos 3°C sobre la temperatura del punto de rocío. ■ Se debe medir el punto de rocío durante toda la aplicación. ■ Hacer una prueba de adherencia, la cual no debe ser menor a 1.5 N/mm^2 ■ Para pequeñas aplicaciones 4 mínimas ■ Para grandes aplicaciones 1 cada 10 m. ■ Para nivelar la superficie se debe aplicar Sikadur 30.
Aplicaciones	<p>Observaciones importantes</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Mezcle el Sikadur 30 lentamente (máximo 500 rpm) para evitar, tanto como sea posible, la incorporación de aire. ■ Cubra bien la superficie de concreto con el adhesivo. ■ La resistencia a la tracción de la superficie preparada de concreto armado debe ser $>1.5 \text{ N/mm}^2$. ■ El sistema SikaCarboDur debe protegerse de los rayos solares directos. ■ La temperatura máxima de servicio es 50°C. ■ Debe seguirse las instrucciones de la Hoja Técnica cuando se aplique el adhesivo Sikadur30. <p>Sustrato</p> <p><u>Concreto</u> El concreto debe estar limpio, libre de grasa y aceite, seco, sin partículas libres. La edad del concreto dependiendo de las condiciones de clima debe ser por lo menos de 4 a 6 semanas. Preparación: Arenado, escobillado o escarificado.</p> <p><u>Madera</u> La superficie debe encontrarse limpia, libre de grasa o aceite, sin partículas sueltas. Preparación: Arenado, escobillado o escarificado.</p> <p>La superficie debe ser pareja. Las marcas de trabajo o ranurados no deben ser de más de 0.5 mm. Después de limpiar, eliminar el polvo de la superficie empleando una aspiradora industrial. Verificar el sustrato con un nivel de metal. La tolerancia es de 10 mm para dos metros de longitud, o de 2.5 mm para 50 cm de longitud, respectivamente.</p>
Mezclado	<p><u>Paquete pre-dosificado</u> Agitar bien los componentes en sus envases antes de usar. Añadir el compuesto B al compuesto A. Mezclar usando una mezcladora manual eléctrica a baja velocidad (máximo 500 rpm) durante tres minutos hasta obtener una apariencia uniforme. Evitar incorporar aire.</p>
Método de aplicación	<p>Si la superficie del concreto presenta burbujas, rellénelas con el mortero epóxico de reparación Sikadur 41. El adhesivo Sikadur 30 se debe emplear como capa de contacto para asegurar una buena adhesión al sustrato de concreto. Con una espátula, aplique con cuidado el adhesivo Sikadur 30 bien mezclado al sustrato correctamente preparado. Cubra la superficie con una capa de aproximadamente 1 mm. Coloque la lámina CarboDur en una mesa y límpiela con Thinner Acrílico. Aplique a la lámina CarboDur una capa de 1 a 2 mm del adhesivo Sikadur 30 empleando una espátula.</p> <p>Mientras el adhesivo está al aire, y dependiendo de la temperatura, coloque la lámina en la superficie de concreto. Use un rodillo para presionar la lámina contra el material epóxico hasta que el adhesivo se salga por ambos lados del laminado. Elimine el exceso de adhesivo epóxico. Tome una muestra para verificar si el adhesivo empleado da el resultado final y resistencia esperados. Mida el esfuerzo flexión y la fuerza de pegado del curado.</p> <p>Cuando se haya secado el adhesivo Sikadur 30 se puede retirar la película que recubre la lámina. Como última comprobación, verifique que la lámina CarboDur no presente burbujas golpeando suavemente. La parte superior de la lámina se puede pintar con un material de recubrimiento como Sikagard 62 o Sikagard 550 Elastic.</p>

Limpieza de Herramientas	<p>Limpie inmediatamente las herramientas con limpiador Thinner Acrílico. Lávese las manos y la piel cuidadosamente con jabón y agua tibia.</p> <p>Antes de su utilización, los compuestos A y B contaminan el agua y no deben ser arrojados al desagüe, cursos de agua o a la tierra.</p> <p>Los residuos del limpiador Thinner Acrílico y de Sikadur 30 siempre deben ser desechados con cuidado. El material ya endurecido sólo se puede eliminar por medios mecánicos.</p>
Importante	<p>Las láminas CarboDur (CFRP) no presentan reserva de deformación plástica, por lo que la resistencia máxima de flexión de una sección reforzada se alcanza cuando se produce la falla de la lámina cuando el acero fluye o el concreto falla. El modo de falla depende de la sección transversal de la lámina. Para limitar el ancho de la fisura y la deformación, el punto de fluencia no debe producirse en las barras de refuerzo cuando el material se encuentre en servicio. No debe permitirse ninguna fisura por cortante, porque esto puede causar el desplazamiento de la superficie reforzada por consiguiente desplazamiento de la lámina. Se puede emplear los métodos convencionales para realizar los cálculos de tensión y deformación, los mismos que se deben verificar empleando los estándares SIA 160 (1989) y 162 (1989).</p>
Referencias	<p>Pruebas</p> <p>Informe EMPA N° 154490/1 Informe EMPA N° 154490 Informe EMPA N° 161782 Informe IBMB, IU Braunschweig N° 144B/325 Informe CISMID, Perú</p> <p>Referencias</p> <p>Bauzinger H. Steiner W. 1989: Adhesivos epóxicos para juntas flexibles Schweizer Baublatt N° 64, Agosto 1980</p> <p>Deuring M. 1993: Reforzamiento de concreto armado con materiales compuestos pretensados. Centro Federal de Investigación y Pruebas de Materiales (EMPA), Informe EMPA N° 224, 1993</p> <p>Deuring M., 1994: Láminas CFRP en la industria de la construcción. Reforzamiento de estructuras de concreto. Revista Swoss Engineer and Architect N° 26, 23 de julio de 1994.</p> <p>Deuring M., Oser M., Burgi B. 1994: Refuerzos pegados. Análisis de adhesivos epóxicos. Centro Federal de Investigación y Pruebas de Materiales (EMPA), Informe EMPA N° (ilegible), 1994</p> <p>Meier U., 1994: Reforzamiento de estructuras con materiales compuestos. Informe VDI N° 1080, 1994, pp. 587-594</p> <p>SIA/EMPA: Refuerzo posterior de estructuras con lámina CarboDur . Documentación D0120.21 de setiembre de (ilegible)</p>
Instrucciones de Seguridad	
Precauciones de manipulación	<p>Use una crema protectora en las manos y la piel descubierta antes de empezar a trabajar. Use ropa de protección (guantes, lentes de seguridad). Cuando el producto entre en contacto con los ojos u otras mucosas, lave inmediatamente con agua tibia limpia y acuda al médico.</p>
Medio ambiente	<p>Con permiso de las autoridades se puede incinerar pequeñas cantidades de material curado en un incinerador municipal. Los compuestos no utilizados no deben arrojarse a los desagües, cursos de agua o al suelo.</p>
Toxicidad	<p>■ Compuesto A: Clase 4, según el Reglamento Suizo de Salud y Seguridad</p> <p>■ Compuesto B: No tóxico</p>
Transporte	<p>■ Compuesto A: No peligroso</p> <p>■ Compuesto B: 8/65 c) en cantidad de 500 kh</p>

Nota	En caso de duda siga las instrucciones del embalaje o etiqueta. La empresa garantiza que la información en la hoja es verdadera y exacta. Sin embargo, la información sobre el rendimiento puede variar de acuerdo con la manera en que se emplee el producto u otras condiciones de uso que escapan al control de la empresa. Por tanto, la garantía de la empresa se limita a la calidad de los productos que se proporcionan .
Observaciones	La Hoja de Seguridad de este producto se encuentra a disposición del interesado. Agradeceremos solicitarla a nuestro Departamento Comercial, teléfono: 618-6060 o descargarla a través de Internet en nuestra página web: www.sika.com.pe
Nota Legal	La información y en particular las recomendaciones sobre la aplicación y el uso final de los productos Sika son proporcionadas de buena fe, en base al conocimiento y experiencia actuales en Sika respecto a sus productos, siempre y cuando éstos sean adecuadamente almacenados, manipulados y transportados; así como aplicados en condiciones normales. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones de la obra en donde se aplicarán los productos Sika son tan particulares que de esta información, de alguna recomendación escrita o de algún asesoramiento técnico, no se puede deducir ninguna garantía respecto a la comercialización o adaptabilidad del producto a una finalidad particular, así como ninguna responsabilidad contractual. Los derechos de propiedad de las terceras partes deben ser respetados. Todos los pedidos aceptados por Sika Perú S.A. están sujetos a Cláusulas Generales de Contratación para la Venta de Productos de Sika Perú S.A. Los usuarios siempre deben remitirse a la última edición de la Hojas Técnicas de los productos; cuyas copias se entregarán a solicitud del interesado o a las que pueden acceder en Internet a través de nuestra página web www.sika.com.pe .

**“La presente Edición anula y reemplaza la Edición Nº 3
la misma que deberá ser destruida”**



Sika Perú S.A., Av. Los Frutales 253, Ate / Lima 3 – Perú
Tel: (51-1) 618-6060 / Fax: (51-1) 618-6070
E-mail: construccion@pe.sika.com / Web: www.sika.com.pe



Anexo VI.3: Sikadur-30

Hoja Técnica
Edición 2, 09/06/99, JZ
Sikadur® 30

Sikadur® 30

Adhesivo para Refuerzos Pegados

Construcción

Descripción

General

Es un mortero adhesivo de 2 componentes a base de resinas epóxicas, exento de solventes y tixotrópico.

Campos de aplicación

- Mortero epóxico utilizado para adherir las láminas Sika CarboDur® en estructuras de: concreto, madera y metal.
- Adhesivo para pegar refuerzos metálicos sobre concreto, madera y piedra.
- Unión de elementos de concreto, acero, piedra, madera, epóxicos.
- Anclajes en cualquier posición.
- Corrección de pequeñas imperfecciones dimensionales en elementos de concreto.

Ventajas

- Pot life extenso.
- Altas resistencias mecánicas a la abrasión y al impacto.
- Puede ser aplicado sobre superficies ligeramente húmedas.
- Aplicable en superficies verticales y sobre cabeza.
- No contiene componentes volátiles.
- Elevadas resistencias mecánicas.
- No sufre retracciones.
- Fácil de mezclar y aplicar.

Datos Básicos

Aspecto

Pasta cremosa

Color

- Comp. A: blanco
- Comp. B: negro
- Comp. A + B mezclado: gris claro

Presentación

Juego de 5 kg.

Almacenamiento

Un año bajo techo a una temperatura entre 5°C y 25°C, en envases originales cerrados y sin deterioro.

Datos Técnicos

Densidad

1.77 kg/l

Pot life (según FIB)*

40 minutos (a 35°C)

Tiempo de trabajabilidad

min.30 minutos (a 35°C)

Escurrimiento (FIB)*

3-5 mm (a 35°C)

Retracción (FIB)*

0.04%

Punto de Cristalización (FIB)*

62° C

Módulo Estático E (FIB)*

12,800 N/mm²

Fuerza de Adhesión (húmedo) (FIB)*

Falla del concreto 1 N/mm²



Resistencia Cortante (FIB)*	Falla del concreto 15 N/mm						
Coefficiente de Expansión (Sika)	9×10^{-5} por °C (10°C a + 4°C)						
Los valores mencionados pueden variar con la intensidad de mezclado y la cantidad de aire incorporado (durante el mezclado).							
Aplicación							
Consumo							
En láminas Sika CarboDur	<table border="1"> <tr> <td>Lámina 50 mm</td> <td>Aproximadamente 0.34 kg/ml</td> </tr> <tr> <td>Lámina 80 mm</td> <td>Aproximadamente 0.54 kg/ml</td> </tr> <tr> <td>Lámina 100 mm</td> <td>Aproximadamente 0.67 kg/ml</td> </tr> </table>	Lámina 50 mm	Aproximadamente 0.34 kg/ml	Lámina 80 mm	Aproximadamente 0.54 kg/ml	Lámina 100 mm	Aproximadamente 0.67 kg/ml
Lámina 50 mm	Aproximadamente 0.34 kg/ml						
Lámina 80 mm	Aproximadamente 0.54 kg/ml						
Lámina 100 mm	Aproximadamente 0.67 kg/ml						
En una superficie de concreto: 8.85 kg/m ² en una capa de 5 mm de espesor.							
Relación del mezclado por peso	Componente A : Componente B = 3:1						
Concreto	Al momento de aplicar Sikadur 30, el concreto debe tener por lo menos 28 días de edad, encontrarse limpio, exento de polvo, partes sueltas o mal adheridas, sin impregnaciones de aceite, grasa, pintura, entre otros. Firme y sano con respecto a sus resistencias. Para una adecuada limpieza es recomendable un arenado, hidroarenado, escarificado o chorro de agua a alta presión.						
Madera	La superficie debe estar sana, limpia, libre de partículas sueltas, contaminación de grasa, aceite, pinturas, entre otros. Para una adecuada limpieza se debe utilizar chorro de arena o lijado.						
Metales	Deben encontrarse limpios, sin óxido, grasa, aceite, pinturas, entre otros. Se recomienda un tratamiento con chorro de arena a metal blanco o en su defecto, utilizar métodos térmicos o físico químicos.						
Epóxicos	La superficie debe estar sana y firme, limpia, libre de elementos contaminantes, grasas, aceites, entre otros. Para una adecuada preparación se debe dar rugosidad a la superficie mediante métodos abrasivos mecánicos.						
Preparación del producto	Homogeneizar separadamente los componentes, verter completamente el componente B sobre el componente A y mezclar durante un mínimo de tres minutos con taladro a bajas revoluciones (máximo 500 r.p.m.) para evitar al máximo la inclusión de aire, hasta obtener una mezcla homogénea.						
Método de aplicación	Si existen cavidades en la superficie del concreto se deben rellenar con un mortero epóxico de reparación. Una vez mezclado correctamente el adhesivo Sikadur 30, aplicar cuidadosamente empleando llana o espátula sobre la superficie de concreto o madera y sobre la superficie de la lámina de refuerzo, de acero o Sika CarboDur (CFRP), en espesores de 0.5 – 2 mm. El adhesivo debe ser aplicado con cuidado sobre la superficie del concreto de modo de asegurar el llenado de todos los poros y pequeñas cavidades. Los refuerzos mediante láminas Sika CarboDur o acero deben ser mantenidos en su posición mediante dispositivos adecuados, cuando el sistema de refuerzo lo requiera. La superficie de los refuerzos debe ser presionada hasta que el adhesivo reviente por los costados de la lámina. En el caso de pegado de láminas de refuerzo de acero, los elementos de soporte deben ser retirados después de 2 días como mínimo. Para comprobar la adherencia debe golpearse las láminas de refuerzo con un pequeño martillo para detectar áreas no adheridas. Para el control del material adhesivo usado referente a desarrollo de resistencias, se recomienda fabricar probetas de ensayo en la obra. Después del endurecimiento medir las resistencias a compresión, flexotracción y adherencia.						
Limpieza	<ul style="list-style-type: none"> ■ Limpiar las herramientas inmediatamente con diluyente a la piroxilina, lávese las manos con agua tibia y jabón. ■ Sikadur 30, componentes A+B, contamina el agua y no debe ser arrojado a los drenes ni desagües mientras no esté totalmente curado. ■ Debe disponerse apropiadamente de los residuos de Colma Limpiador y Sikadur 30. ■ El material, una vez curado sólo puede ser removido mecánicamente. 						

Instrucciones de Seguridad

Precauciones de manipulación

Durante la manipulación de cualquier producto químico, evite el contacto directo con los ojos, piel y vías respiratorias. Protéjase adecuadamente utilizando guantes de goma natural o sintéticos y anteojos de seguridad. En caso de contacto con los ojos, lavar inmediatamente con abundante agua durante 15 minutos manteniendo los párpados abiertos y consultar a su médico.

Observaciones

La Hoja de Seguridad de este producto se encuentra a disposición del interesado. Agradeceremos solicitarla a nuestro Departamento Comercial, teléfono: 618-6060 o descargarla a través de Internet en nuestra página web: www.sika.com.pe

Nota Legal

La información y en particular las recomendaciones sobre la aplicación y el uso final de los productos Sika son proporcionadas de buena fe, en base al conocimiento y experiencia actuales en Sika respecto a sus productos, siempre y cuando éstos sean adecuadamente almacenados, manipulados y transportados; así como aplicados en condiciones normales. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones de la obra en donde se aplicarán los productos Sika son tan particulares que de esta información, de alguna recomendación escrita o de algún asesoramiento técnico, no se puede deducir ninguna garantía respecto a la comercialización o adaptabilidad del producto a una finalidad particular, así como ninguna responsabilidad contractual. Los derechos de propiedad de las terceras partes deben ser respetados. Todos los pedidos aceptados por Sika Perú S.A. están sujetos a Cláusulas Generales de Contratación para la Venta de Productos de Sika Perú S.A. Los usuarios siempre deben remitirse a la última edición de la Hojas Técnicas de los productos; cuyas copias se entregarán a solicitud del interesado o a las que pueden acceder en Internet a través de nuestra página web www.sika.com.pe.

“La presente Edición anula y reemplaza la Edición N°1 la misma que deberá ser destruida”



Sika Perú S.A., Av. Los Frutales 253, Ate / Lima 3 – Perú
Tel: (51-1) 618-6060 / Fax: (51-1) 618-6070
E-mail: construccion@pe.sika.com / Web: www.sika.com.pe

