



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE VIGAS ALTAS
MEDIANTE EL MODELO DE PUNTALES Y TENSORES DEL ACI 318-19**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTORES: DAVID ANDRÉS BERMEO SUÁREZ

JOSUÉ FELIPE VÁZQUEZ BRITO

TUTOR: ING. JORGE FERNANDO MOSCOSO FERNÁNDEZ SALVADOR, PhD.

Cuenca - Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, David Andrés Bermeo Suárez con documento de identificación N°0105534655 y Josué Felipe Vázquez Brito con documento de identificación N°1401058365; manifestamos que:

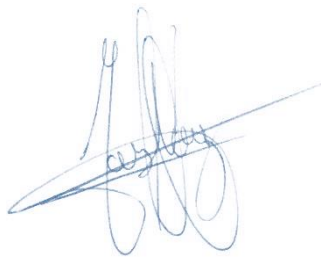
Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 15 de enero del 2025

Atentamente,



David Andrés Bermeo Suárez
0105534655



Josué Felipe Vázquez Brito
1401058365

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, David Andrés Bermeo Suárez con documento de identificación N°0105534655 y Josué Felipe Vázquez Brito con documento de identificación N°1401058365, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto de investigación: “Análisis del comportamiento estructural de vigas altas mediante el modelo de puntales y tensores del ACI 318-19”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

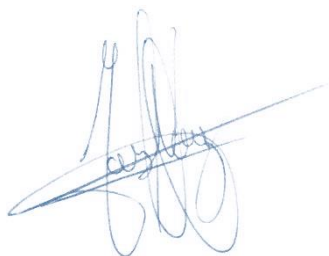
Cuenca, 15 de enero del 2025

Atentamente,



David Andrés Bermeo Suárez

0105534655



Josué Felipe Vázquez Brito

1401058365

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jorge Fernando Moscoso Fernández Salvador con documento de identificación N° 0104429733, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE VIGAS ALTAS MEDIANTE EL MODELO DE PUNTALES Y TENSOIRES DEL ACI 318-19**, realizado por David Andrés Bermeo Suárez con documento de identificación N°0105534655 y por Josué Felipe Vázquez Brito con documento de identificación N°1401058365, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto de investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 15 de enero del 2025

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**JORGE FERNANDO
MOSCOSO FERNANDEZ
SALVADOR**

Ing. Jorge Fernando Moscoso Fernández Salvador, PhD.

0104429733

Dedicatoria

Dedico este trabajo con un profundo agradecimiento a las personas más significativas en mi vida, quienes me han brindado su apoyo incondicional y han hecho posible la realización de mis sueños. A mi querido padre, Ramiro, por su amor y guía constante, que siempre me han inspirado a seguir adelante. A mi madre, Rosa, por su inquebrantable fe en mí y por ser el pilar fundamental en cada paso de mi camino. A mi hermana, Lisbeth, por su apoyo y compañerismo, que me han motivado a alcanzar mis metas. A mis tíos Fabian, Cecilia F. y Cecilia B. quienes, con sus consejos, apoyo, y motivación desde mi niñez han sabido guiarme y motivarme a cada día superarme. A mi novia, Doménica, quien día tras día ha estado a mi lado, brindándome fuerzas y aliento para conseguir esta meta. Su amor y dedicación han sido un faro en este viaje. Este trabajo es un homenaje a todos ustedes, que han hecho posible este logro. A mis amigos de carrera, quienes han compartido conmigo no solo el esfuerzo académico, sino también risas, desafíos y momentos inolvidables.

Atte: David Bermeo

Dedicatoria

Con profunda gratitud, quiero dedicar estas líneas a quienes han sido pilares fundamentales en este camino. A mis padres, cuyo amor, esfuerzo y apoyo incondicional me brindaron la oportunidad de perseguir mis sueños. A mi abuela y a mi tía, quienes con generosidad y cariño me ofrecieron su ayuda y un hogar lleno de calidez. A mi novia, por su infinita paciencia, por estar a mi lado en los momentos difíciles y por ser siempre mi mayor fuente de motivación. Y, por último, a mis compañeros y amigos, quienes con su amistad y alegría hicieron de esta etapa una experiencia inolvidable y enriquecedora. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento

Atte: Josué Vázquez

Agradecimiento

Queremos expresar nuestro agradecimiento al Ing. Fernando Moscoso, por su valiosa guía y por compartir los conocimientos necesarios para llevar adelante este proyecto. Extendemos también nuestro reconocimiento a la Ing. Tania Orellana y a los técnicos docentes del laboratorio de Ingeniería Civil, quienes, con su experiencia y los recursos proporcionados, hicieron posible la realización de este estudio.

Atte: David Bermeo, Josué Vázquez

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	19
1. Antecedentes y Generalidades.....	19
1.1. Antecedentes.....	19
1.2. Estado del Arte.....	20
1.3. Descripción del Problema.	22
1.4. Importancia y Alcances.....	23
1.5. Justificación y Relevancia	24
1.6. Objetivos.....	25
1.6.1. Objetivo General.	25
1.6.2. Objetivos específicos.....	25
CAPÍTULO II	26
2. Marco Teórico	26
2.1. Hormigón Armado	26
2.2. Hormigón.....	26
2.3. Acero de Refuerzo	27
2.4. Teoría de Vigas Navier-Bernoulli	27
2.4.1. Zonas B.....	29
2.4.2. Zonas D	29
2.5. Puntales	30
2.6. Tensores.....	30
2.7. Vigas altas	31
2.8. Normativa Aplicable (ACI 318-19)	32
2.9. Ductilidad	36
CAPÍTULO III.....	38
3. Marco Metodológico.....	38
3.1. Variables.....	38
3.2. Caracterización y ensayos de materiales	38
3.2.1. Análisis granulométrico, determinación de porcentaje de finos y módulo de finura de árido fino y grueso	38
3.2.2. Malla Electrosoldada	44
3.3. Construcción de Vigas Altas de Hormigón Armado.	46

3.3.1.	Plan de Trabajo	46
3.3.2.	Matriz de Ensayo.....	47
3.3.3.	Elaboración del Encofrado.....	49
3.3.3.1.	Corte de Barras y Mallas	50
3.3.3.2.	Amarre de la Armadura.....	52
3.3.4.	Fundición de las Vigas	53
3.3.4.1.	Preparación De Los Materiales.....	53
3.3.4.2.	Adecuación De Los Moldes	53
3.3.4.3.	Elaboración Y Vertido Del Hormigón.....	54
3.3.4.4.	Curado De Las Vigas.....	55
3.3.5.	Ensayos De Vigas Altas De Hormigón Armado	56
3.3.5.1.	Medición Y Monitoreo De Las Grietas.....	56
3.3.5.2.	Registro y toma de datos.....	57
3.4.	Modelos Puntal Tensor	60
3.4.1.	Modelo Puntal Tensor 1.....	60
3.4.2.	Modelo Puntal Tensor 2.....	64
CAPÍTULO IV		68
4.	Resultados Y Análisis.....	68
4.1.	Niveles Y Patrones De Agrietamiento De Las Vigas	68
4.2.	Relación Ancho Máximo De Grieta Vs Carga Aplicada	83
4.2.	Relación fuerza-deformación bajo condiciones de ensayo.....	95
4.3.	Estimación De Carga Máxima	107
4.3.1.	Estimación De Carga Máxima Según El Modelo 1.....	107
4.3.2.	Estimación De Carga Máxima Según Modelo 2.....	113
4.4.	Determinación De Ductilidad	118
CAPÍTULO V.....		141
5.	Conclusiones	141
CAPÍTULO VI.....		143
6.	Referencias.....	143
CAPITULO VII.....		146
7.	Anexos	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.....	35
<i>Coeficiente B_s de acuerdo con cada caso</i>	<i>35</i>
Tabla 2.....	36
<i>El coeficiente B_n según el tipo de nodo.....</i>	<i>36</i>
Tabla 3.....	41
<i>Granulometría de árido fino.....</i>	<i>41</i>
Tabla 4.....	42
<i>Limites superior e inferior para Construcción de la curva granulométrica.....</i>	<i>42</i>
Tabla 5.....	43
<i>Granulometría de Árido Grueso</i>	<i>43</i>
Tabla 6.....	43
<i>Limites superior e inferior para Construcción de la curva granulométrica.....</i>	<i>43</i>
Tabla 7.....	45
<i>Esfuerzo de fluencia de mallas electrosoldadas.....</i>	<i>45</i>
Tabla 8.....	48
<i>Matriz de ensayo para elaboración de vigas altas.....</i>	<i>48</i>
Tabla 9.....	59
<i>Registro de medición de ancho de puntales probetas 1 y 2</i>	<i>59</i>
Tabla 10.....	96
<i>Tabla de registro de carga última y deformación máxima en el punto de falla</i>	<i>96</i>
Tabla 11.....	109
<i>Tabla de cargas máximas calculadas para puntales, tensores y nodos del modelo 1- Ensayo 1</i>	<i>109</i>
Tabla 12.....	109
<i>Tabla de cargas máximas calculadas en función de cada elemento – Ensayo 1</i>	<i>109</i>
Tabla 13.....	110
<i>Tabla de cargas máximas calculadas para puntales, tensores y nodos del modelo 1- Ensayo 2</i>	<i>110</i>
Tabla 14.....	111
<i>Tabla de cargas máximas calculadas en función de cada elemento – Ensayo 2</i>	<i>111</i>
Tabla 15.....	112

<i>Tabla de relación entre Carga ultima (Pu) y carga calculada PACI</i>	112
Tabla 16.....	115
<i>Tabla de cargas máximas calculadas para puntales, tensores y nodos del modelo 2</i>	115
Tabla 17	116
<i>Tabla de cargas máximas calculadas en función de cada elemento.....</i>	116
Tabla 18.....	117
<i>Tabla de relación entre carga ultima Pu y carga calculada PACI en el modelo 2</i>	117
Tabla 19.....	120
<i>Tabla de ductilidad de vigas ensayadas</i>	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	34
<i>Esquema grafico de A1 y la proyección de A2.</i>	34
Figura 2	40
<i>Extracción de árido grueso para futuros ensayos</i>	40
Figura 3	40
<i>Pesaje de árido grueso para realizar el ensayo de granulometría.....</i>	40
Figura 4	41
<i>Pesaje de árido grueso para realizar el ensayo de granulometría.....</i>	41
Figura 5	49
<i>Corte de MDF para la elaboración de encofrado.....</i>	49
Figura 6	50
<i>Encofrado de las vigas altas.....</i>	50
Figura 7	50
<i>Malla electrosoldada cortadas para posterior amarrado.....</i>	50
Figura 8	51
<i>Platinas cortadas (posteriormente serán colocadas en la fundición).....</i>	51
Figura 9	51
<i>Barras transversales y longitudinales.....</i>	51
Figura 10	52
<i>Amarre de la armadura.....</i>	52

Figura 12	54
<i>Armaduras correctamente alineadas en el encofrado.</i>	54
Figura 13	55
<i>Fundición y varillado de vigas altas</i>	55
Figura 14	56
<i>Colocación de viga en los apoyos y calibración de máquina de ensayos universal</i>	56
Figura 15	57
<i>Medición de grietas</i>	57
Figura 1c	58
<i>Probeta M1-T10 (ensayo 1) previo al ensayo</i>	58
Figura 17	62
<i>Fuerzas internas en el nodo 1 del Modelo Puntal Tensor 1</i>	62
Figura 18	64
<i>Fuerzas internas en el nodo 1 del Modelo Puntal Tensor 2</i>	64
Figura 1S	65
<i>Fuerzas internas en el nodo 2 del Modelo Puntal Tensor 2</i>	65
Figura 20	66
<i>Fuerzas internas en el nodo 3 del Modelo Puntal Tensor 2</i>	66
Figura 21	67
<i>Fuerzas internas en el punto de aplicación de carga y el puntal 2</i>	67
Figura 22	146
<i>Probeta M4-T8 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.</i>	146
Figura 23	146
<i>Probeta M4-T8 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.</i>	146
Figura 24	147
<i>Probeta M2-2T5(ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.</i>	147
Figura 25	147
<i>Probeta M2-2T5(ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.</i>	147
Figura 26	147
<i>Probeta M3-T8 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.</i>	147
Figura 27	148
<i>Probeta M3-T8 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.</i>	148

Figura 28	148
<i>Probeta M3-T5 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual. Falla a corte</i>	<i>148</i>
Figura 29	149
<i>Probeta M3-T5 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>149</i>
Figura 30	149
<i>Probeta M1-T8 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>149</i>
Figura 31	150
<i>Probeta M1-T8 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>150</i>
Figura 32	150
<i>Probeta M1-T5 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>150</i>
Figura 33	151
<i>Probeta M1-T5 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>151</i>
Figura 34	151
<i>Probeta M1 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>151</i>
Figura 35	152
<i>Probeta M1 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>152</i>
Figura 36	152
<i>Probeta M2 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>152</i>
Figura 37	153
<i>Probeta M2 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>153</i>
Figura 38	154
<i>Probeta M3 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>154</i>
Figura 3S	154
<i>Probeta M3 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>154</i>
Figura 40	154
<i>Probeta M4-T10 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>154</i>
Figura 41	155
<i>Probeta M4-T10 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>155</i>
Figura 42	155
<i>Probeta M4-Tc (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.</i>	<i>155</i>
Figura 43	156
<i>Probeta M4-T6 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.</i>	<i>156</i>

Figura 44	157
<i>Probeta M1-Tc (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.</i>	<i>157</i>
Figura 45	157
<i>Probeta M1-Tc (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.</i>	<i>157</i>
Figura 46	157
<i>Probeta M3-Tc (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.</i>	<i>157</i>
Figura 48	159
<i>Probeta M2-Tc (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.</i>	<i>159</i>
Figura 49	159
<i>Probeta M2-Tc (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.</i>	<i>159</i>
Figura 50	160
<i>Probeta M2-T5 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>160</i>
Figura 51	160
<i>Probeta M2-T5 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>160</i>
Figura 52	161
<i>Probeta M2-T10 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>161</i>
Figura 53	161
<i>Probeta M2-T10 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>161</i>
Figura 54	162
<i>Probeta M4-2T5 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>162</i>
Figura 55	162
<i>Probeta M4-2T5 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual</i>	<i>162</i>
Figura 56	163
<i>Probeta M1-T10 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>163</i>
Figura 57	163
<i>Probeta M1-T10 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>163</i>
Figura 58	164
<i>Probeta M2-T10-T5 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>164</i>
Figura 59	164
<i>Probeta M2-T10-T5 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.....</i>	<i>164</i>
Figura 60	164
<i>Probeta M2-2T10 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual</i>	<i>164</i>

Figura 61	165
<i>Probeta M2-2T10 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual</i>	165
Figura 62	166
<i>Probeta M3-T10 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual</i>	166
Figura 63	166
<i>Probeta M3-T10 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual</i>	166

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	42
<i>Curva granulométrica de árido fino</i>	42
Ilustración 2	44
<i>Curva granulométrica de Árido Grueso</i>	44
Ilustración 3	47
<i>Plano general de dimensiones de viga a construir</i>	47
Ilustración 4	53
<i>Plano general de viga peraltada con su respectiva malla y refuerzo longitudinal.</i>	53
Ilustración 5	59
<i>Esquema general de anchos de puntales</i>	59
Ilustración 6	61
<i>Esquema general del Modelo Puntal Tensor 1</i>	61
Ilustración 7	64
<i>Esquema general del Modelo Puntal Tensor 2</i>	64
Ilustración 8	70
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M1</i>	70
Ilustración 9	70
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M2</i>	70
Ilustración 10	71
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M3</i>	71
Ilustración 11	72
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M4-T8</i>	72
Ilustración 12	72

Patrones de agrietamiento en probetas M1-T5	72
Ilustración 13	73
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M3-T8</i>	<i>73</i>
Ilustración 14	74
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M3-T5</i>	<i>74</i>
Ilustración 15	74
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M1-T8</i>	<i>74</i>
Ilustración 16	75
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M2-2T5</i>	<i>75</i>
Ilustración 17	76
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M1- Tc</i>	<i>76</i>
Ilustración 18	76
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M2- Tc</i>	<i>76</i>
Ilustración 19	77
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M2- T10.....</i>	<i>77</i>
Ilustración 20	78
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M3- Tc</i>	<i>78</i>
Ilustración 21	78
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M4- Tc</i>	<i>78</i>
Ilustración 22	79
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M4- T10.....</i>	<i>79</i>
Ilustración 23	80
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M2- T5.....</i>	<i>80</i>
Ilustración 24	80
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M3- T10.....</i>	<i>80</i>
Ilustración 25	81
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M4- 2T5.....</i>	<i>81</i>
Ilustración 26	82
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M2- 2T10.....</i>	<i>82</i>
Ilustración 27	82
<i>Patrones de agrietamiento en probetas M1-T10</i>	<i>82</i>
Ilustración 28	83

<i>Patrones de agrietamiento en probetas M2-T10T5</i>	<i>83</i>
---	-----------

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1.....	85
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M1</i>	<i>85</i>
Gráfica 2.....	85
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2.....</i>	<i>85</i>
Gráfica 3.....	86
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M3.....</i>	<i>86</i>
Gráfica 4.....	86
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M1-T5</i>	<i>86</i>
Gráfica 5.....	87
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M4-T8</i>	<i>87</i>
Gráfica 6.....	87
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M3-T8</i>	<i>87</i>
Gráfica 7.....	88
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M3-T5</i>	<i>88</i>
Gráfica 8.....	88
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M1-T8</i>	<i>88</i>
Gráfica 9.....	89
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2-T5</i>	<i>89</i>
Gráfica 10.....	89
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2-T5</i>	<i>89</i>
Gráfica 11.....	90
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2-Tc.....</i>	<i>90</i>
Gráfica 12.....	90
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2-T10</i>	<i>90</i>
Gráfica 13.....	91
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M3-Tc.....</i>	<i>91</i>
Gráfica 14.....	91
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M4-Tc.....</i>	<i>91</i>
Gráfica 15.....	92

<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M4-T10</i>	<i>92</i>
Gráfica 16.....	92
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2-T5</i>	<i>92</i>
Gráfica 17.....	93
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M3-T10</i>	<i>93</i>
Gráfica 18.....	93
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M4-2T5</i>	<i>93</i>
Gráfica 19.....	94
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2-2T10</i>	<i>94</i>
Gráfica 20.....	94
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M1-T10</i>	<i>94</i>
Gráfica 21.....	95
<i>Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2-T10-T5</i>	<i>95</i>
Gráfica 22.....	97
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M1 ensayadas</i>	<i>97</i>
Gráfica 23.....	97
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2 ensayadas</i>	<i>97</i>
Gráfica 24.....	98
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M3 ensayadas</i>	<i>98</i>
Gráfica 25.....	98
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M1-T5 ensayadas</i>	<i>98</i>
Gráfica 26.....	99
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M4-T8 ensayadas</i>	<i>99</i>
Gráfica 27.....	99
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M3-T8 ensayadas</i>	<i>99</i>
Gráfica 28.....	100
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M3-T5 ensayadas</i>	<i>100</i>
Gráfica 29.....	100
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M1-T8 ensayadas</i>	<i>100</i>
Gráfica 30.....	101
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-2T5 ensayadas</i>	<i>101</i>
Gráfica 31.....	101

<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M1-Tc ensayadas</i>	101
Gráfica 32.....	102
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-Tc ensayadas</i>	102
Gráfica 33.....	102
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-T10 ensayadas</i>	102
Gráfica 34.....	103
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M3-Tc ensayadas</i>	103
Gráfica 35.....	103
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M4-Tc ensayadas</i>	103
Gráfica 36.....	104
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M4-T10 ensayadas</i>	104
Gráfica 37.....	104
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-T5 ensayadas</i>	104
Gráfica 38.....	105
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M3-T10 ensayadas</i>	105
Gráfica 39.....	105
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-2T10 ensayadas</i>	105
Gráfica 40.....	106
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M1-T10 ensayadas</i>	106
Gráfica 41.....	106
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-T10-T5 ensayadas</i>	106
Gráfica 42.....	121
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M1 ensayo 1.....</i>	121
Gráfica 43.....	121
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M1 ensayo 2.....</i>	121
Gráfica 44.....	122
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M2 ensayo 1.....</i>	122
Gráfica 45.....	122
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M2 ensayo 2.....</i>	122
Gráfica 46.....	122
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M3 ensayo 1.....</i>	122
Gráfica 47.....	123

<i>Gráfica de ductilidad de probeta M3 ensayo 2</i>	123
Gráfica 48.....	124
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M1-T5 ensayo 1</i>	124
Gráfica 50.....	125
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M4-T8 ensayo 1</i>	125
Gráfica 51.....	125
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M4-T8 ensayo 1</i>	125
Gráfica 53.....	126
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M3-T8 ensayo 2</i>	126
Gráfica 54.....	126
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M3-T8 ensayo 2</i>	126
Gráfica 55.....	127
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M3-T5 ensayo 1</i>	127
Gráfica 56.....	127
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M3-T5 ensayo 2</i>	127
Gráfica 57.....	128
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M1-T8 ensayo 1</i>	128
Gráfica 58.....	128
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M1-T8 ensayo 2</i>	128
Gráfica 59.....	129
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M2-2T5 ensayo 1</i>	129
Gráfica 60.....	129
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M2-2T5 ensayo 2</i>	129
Gráfica 61.....	130
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M1-Tc ensayo 1</i>	130
Gráfica 62.....	130
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M1-Tc ensayo 2</i>	130
Gráfica 63.....	131
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M2-Tc ensayo 1</i>	131
Gráfica 64.....	131
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M2-Tc ensayo 2</i>	131
Gráfica 65.....	132

<i>Gráfica de ductilidad de probeta M2-T10 ensayo 1</i>	132
Gráfica 66.....	132
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M2-T10 ensayo 2</i>	132
Gráfica 67.....	133
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M3-Tc ensayadas</i>	133
Gráfica 68.....	133
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M3-Tc ensayo 2</i>	133
Gráfica 69.....	134
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M4-Tc ensayo 1</i>	134
Gráfica 70.....	134
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M4-Tc ensayo 2</i>	134
Gráfica 71.....	135
<i>Gráfica de ductilidad de probeta M4-T10 ensayo 1</i>	135
Gráfica 72.....	135
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M4-T10 ensayo 2</i>	135
Gráfica 73.....	136
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M3-T10 ensayo 1</i>	136
Gráfica 74.....	136
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M3-T10 ensayo 2</i>	136
Gráfica 75.....	137
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M4-2T5 ensayo 1</i>	137
Gráfica 76.....	137
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M4-2T5 ensayo 2</i>	137
Gráfica 77.....	138
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-2T10 ensayo 1</i>	138
Gráfica 78.....	138
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-2T10 ensayo 2</i>	138
Gráfica 79.....	139
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M1-T10 ensayo 1</i>	139
Gráfica 80.....	139
<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M1-T10 ensayo 2</i>	139
Gráfica 81.....	140

<i>Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-T10-T5 ensayo 1</i>	<i>140</i>
---	------------

ÍNDICE DE ANEXOS

ÍNDICE DE ANEXOS	15
Anexo 1.....	168
<i>Cálculo de PACI, Modelo 1, ensayo 1 (fragmento 2)</i>	<i>168</i>
Anexo 2.....	169
<i>Cálculo de PACI, Modelo 1, ensayo 1 (fragmento 3)</i>	<i>169</i>
Anexo 3.....	170
<i>Cálculo de PACI, Modelo 1, ensayo 1 (fragmento 4)</i>	<i>170</i>
<i>Cálculo de PACI, Modelo 1, ensayo 2 (fragmento 1)</i>	<i>171</i>
Anexo 5.....	172
<i>Cálculo de PACI, Modelo 1, ensayo 2 (fragmento 2)</i>	<i>172</i>
Anexo 6.....	174
<i>Cálculo de PACI, Modelo 1, ensayo 2 (fragmento 3)</i>	<i>174</i>
Anexo 7.....	175
<i>Cálculo de PACI, Modelo 1, ensayo 2 (fragmento 4)</i>	<i>175</i>
Anexo 8.....	176
<i>Cálculo de PACI, Modelo 2 (fragmento 1)</i>	<i>176</i>
Anexo 9.....	178
<i>Cálculo de PACI, Modelo 2 (fragmento 2)</i>	<i>178</i>
Anexo 10.....	179
<i>Cálculo de PACI, Modelo 2 (fragmento 3)</i>	<i>179</i>
Anexo 11.....	180
<i>Cálculo de PACI, Modelo 2 (fragmento 4)</i>	<i>180</i>
Anexo 12.....	181
<i>Cálculo de PACI, Modelo 2 (fragmento 5)</i>	<i>181</i>
Anexo 13.....	182
<i>Cálculo de PACI, Modelo 2 (fragmento c).....</i>	<i>182</i>
Anexo 14.....	183
<i>Cálculo de PACI, Modelo 2 (fragmento 7)</i>	<i>183</i>

Resumen

El diseño estructural de elementos ha adquirido una relevancia significativa en la actualidad, lo que ha llevado al desarrollo e innovación de métodos que garantizan su eficiencia a lo largo del tiempo. En este contexto, el ACI 318-19 introduce el uso del Modelo Puntal Tensor como una herramienta esencial para el diseño y análisis de elementos de concreto reforzado. Este estudio tiene como objetivo analizar 42 modelos de vigas altas, diseñadas conforme a las especificaciones del ACI 318-19 y fabricadas según sus normativas, utilizando malla electrosoldada de 6, 7, 8 y 10 mm como refuerzo principal. Además, se implementaron varillas como refuerzo longitudinal en las áreas de mayor tracción siendo estos los tensores, siguiendo el modelo especificado. Para llevar a cabo este análisis, se realizaron ensayos granulométricos de áridos y pruebas de resistencia, así como un examen exhaustivo de las vigas altas bajo carga concentrada. Los resultados incluyeron patrones de agrietamiento, relaciones entre fuerza y deformación, así como la relación entre el ancho máximo de la grieta y la carga aplicada, además de la ductilidad. Se formularon dos hipótesis para el estudio, analizando dos Modelos Puntales Tensores. Los hallazgos demostraron la efectividad de un Modelo Puntal Tensor como herramienta de diseño, que permite estimar el comportamiento estructural de las vigas altas bajo carga concentrada. Los resultados obtenidos ofrecen lineamientos prácticos que contribuyen al cumplimiento de los estándares de calidad y seguridad en proyectos de ingeniería civil.

Abstract

The structural design of elements has acquired a significant relevance nowadays, which has led to the development and innovation of methods that guarantee their efficiency over time. In this context, ACI 318-19 introduces the use of the Tensile Strut Model as an essential tool for the design and analysis of reinforced concrete elements. This study aims to analyze 42 models of tall beams, designed according to ACI 318-19 specifications and fabricated according to its standards, using 6, 7, 8 and 10 mm electrowelded mesh as main reinforcement. In addition, rods were implemented as longitudinal reinforcement in the areas of greatest traction being these the tensioners, following the specified model. To carry out this analysis, aggregate grain size and strength tests were performed, as well as a thorough examination of the tall beams under concentrated loading. The results included cracking patterns, force-deformation relationships, as well as the relationship between maximum crack width and applied load, and ductility. Two hypotheses were formulated for the study, analyzing two Tensile Strut Models. The findings demonstrated the effectiveness of a Tensile Strut Model as a design tool, which allows estimating the structural behavior of tall beams under concentrated loading. The results obtained offer practical guidelines that contribute to the fulfillment of quality and safety standards in civil engineering projects.

CAPÍTULO I

1. Antecedentes y Generalidades

1.1. Antecedentes.

En el año 1987 Schlaich, Schäfer y Jennewein realizaron una investigación denominada “Toward a Consistent Design of Structural Concrete” en el que brindaron una idea clara sobre como plasmar el modelo puntal tensor en la ingeniería estructural. En dicha investigación se pudo llegar a la conclusión de cómo este modelo puede ofrecer una mejor representación del comportamiento estructural en comparación con métodos más tradicionales, subrayando la importancia de considerar no solo las cargas aplicadas, sino también las características del material y el comportamiento no lineal que puede presentarse en ciertas condiciones de carga (Schlaich, Schafer, & al, 1987). A partir de este trabajo se empezó a ensayar y generar hipótesis del comportamiento de las vigas altas y del uso que se le puede dar a estas en la industria de la construcción.

Debido a sus características geométricas o a la naturaleza de las cargas aplicadas, las vigas altas no cumplen con las hipótesis de comportamiento flexional estándar. Por este motivo es que este tipo de vigas son diseñadas con el modelo puntal tensor. Este enfoque, desarrollado inicialmente a partir de la teoría de campos de tensiones y el análisis plástico, permite representar de manera más precisa las trayectorias de fuerzas internas en estructuras de concreto armado. A través de este modelo, se conceptualizan las fuerzas internas en forma de elementos de compresión llamados puntales, y elementos de tracción denominados tensores.

De esta manera, el modelo no solo simplifica el proceso de diseño, sino que también proporciona una interpretación más clara e intuitiva del comportamiento real de las estructuras bajo condiciones no convencionales de carga o geometría. Esto ha permitido a los ingenieros abordar de manera eficiente diseños de estructuras más complejas, asegurando tanto la seguridad como la optimización del material y los recursos empleados (Schlaich, Schafer, & al, 1987).

Este trabajo se basa en el Modelo Puntal Tensor; donde surge la necesidad de profundizar la comprensión del comportamiento estructural de las vigas altas sometidas a cargas puntuales. Este tipo de vigas, debido a su geometría y las altas demandas a cortante, presentan comportamientos complejos que no siempre pueden ser predichos con precisión por los métodos tradicionales de diseño. El Modelo Puntal Tensor, que simplifica la distribución de esfuerzos en estructuras de hormigón armado, ofrece un enfoque alternativo que ha mostrado ser efectivo en el diseño y análisis de elementos profundos. Sin embargo, su aplicación a vigas altas, en combinación con ensayos experimentales bajo cargas puntuales, proporciona una oportunidad única para validar su capacidad predictiva y proponer mejoras en el diseño estructural.

1.2. Estado del Arte

Analizando el comportamiento estructural de las vigas altas dentro de las últimas décadas se ha impulsado la optimización de este diseño, considerando nuevas condiciones tal y como lo establece el ACI 318-19. Tomando en cuenta cada una de las directrices por la normativa, este trabajo busca estimar el comportamiento de vigas altas utilizando el Modelo Puntal

Tensor para poder comparar el comportamiento real de las vigas altas con modelos teóricos propuestos.

De acuerdo con lo ensayado por Myhailov et al. (2010), se realizaron 8 vigas diseñadas mediante el modelo de puntales y tensores, con una relación “a/d” que rondaba en un rango de 1.55 y 2.3 y con un refuerzo de acero de 0.1 %. Estas vigas altas fueron ensayadas hasta su punto de falla. Sus resultados mostraron fallas a cortante antes de que su armadura longitudinal trabajara considerablemente, y se evidenció fisuras de tamaños menores en el eje longitudinal de la viga debido al refuerzo colocado en cada una de ellas. La particularidad de este ensayo fue que sus cargas aplicadas fueron monótonas y también cíclicas.

Todisco & Karl-Heinz. (2015) presenta su investigación en donde centra su enfoque al ensayar 278 de vigas altas. Aplicando varios criterios de control y filtrado, se ensayó 178 vigas en la base de datos de evaluación que se pueden utilizar para comprobar el carácter conservador y preciso de las disposiciones de diseño pertinentes. La mayoría de los ensayos se realizaron para una resistencia a la compresión uniaxial del hormigón entre 15 y 30 MPa, lo que representó 93 ensayos igual al 52%. A demás se realizaron 39 pruebas que equivalen al 22% en vigas con $f'_c > 60$ MPa.

Como resultados a estos ensayos se evidenció como la línea de tendencia disminuye cuando la relación “a/d” también decrece y se lo representó en una gráfica que relaciona la flexión vs la relación “a/d”. Además, se evidenció gráficamente que la línea de tendencia de la flexión vs el refuerzo mecánico es casi horizontal lo cual nos indicó que el exceso de refuerzo no

aumentó las capacidades de flexión. Por lo tanto, se puede concluir que, para el rango de esbeltez a cortante considerado en este artículo ($a/d < 2,4$), las vigas con estribos exhibieron capacidades sólo marginalmente mayores que las que no los tenían.

De acuerdo con Vercesi & Rougier. (2020) en su artículo “Comportamiento de vigas de gran altura de hormigón armado y hormigón reforzado con fibras, propuesta de trabajo experimental y numérico” donde realizaron ensayos a flexión de 6 vigas altas de las mismas dimensiones, con dos tipos de hormigón (hormigón simple y HRFA) usando el método puntal tensor. Se llegó a la conclusión de que las vigas de hormigón con fibras de acero (HRFA) tuvieron un comportamiento muy satisfactorio en cuanto a resistencia y ductilidad, en comparación con las vigas de hormigón simple sin armadura de corte.

1.3. Descripción del Problema.

Una de las problemáticas en el diseño de estructuras de hormigón armado radica en la dificultad para analizar de manera precisa elementos con geometrías complejas o sometidos a cargas. Los enfoques de diseño, basados en suposiciones de comportamiento lineal y distribuciones uniformes de esfuerzos, son insuficientes para abordar elementos estructurales más complicados, como vigas altas, nodos en marcos rígidos o zonas de discontinuidad, donde las trayectorias de fuerzas y las distribuciones de esfuerzos son significativamente irregulares. En estos casos, aplicar métodos inadecuados puede dar lugar a diseños inseguros o ineficientes, incrementando el riesgo de fallos estructurales, el desperdicio de materiales y los costos adicionales de construcción. Esta

situación resalta la necesidad de métodos de diseño más avanzados y precisos, como el Modelo Puntal Tensor, el cual permite captar de manera más realista las trayectorias internas de las fuerzas y el comportamiento de estos elementos. Su implementación no solo mejora la seguridad estructural, sino que también optimiza el uso de los recursos, especialmente en proyectos con geometrías complejas o condiciones de carga no convencionales (Schlaich, Schafer, & al, 1987).

“Las zonas con mayor discontinuidad de esfuerzos son denominadas regiones D, y las zonas con esfuerzos uniformes se nombran regiones B. La estructura internamente se diseña con un reticulado imaginario que posee puntales de hormigón, tensores de acero y uniones entre ellos que se denominan nodos. El diseño de modelos puntal-tensor debe hacerse con una disposición de puntales, tensores y nodos lo más parecida posible a los caminos o flujos de esfuerzos que recorren internamente una estructura. El detallado de los elementos del modelo debe realizarse tomando en cuenta los esfuerzos y deformaciones a que son sometidos” (Aedo, 2004 en Bejarano & Pinzón., 2020).

1.4. Importancia y Alcances.

El Modelo Puntal Tensor es una herramienta valiosa, ya que simplifica la distribución de esfuerzos en estructuras de hormigón armado, además ofrece un enfoque alternativo más adecuado para abordar las discontinuidades que ocurren en elementos como las vigas altas. Según Holt (2018), "el Modelo Puntal Tensor proporciona una herramienta simplificada que ayuda a abordar las complejidades de los estados de esfuerzo en estructuras de hormigón

armado, facilitando un enfoque más intuitivo en el diseño de elementos que no se comportan según las teorías tradicionales".

La implementación del modelo en vigas altas, complementada con ensayos experimentales que simulan condiciones de carga puntual, no solo representa una oportunidad para validar su capacidad predictiva, sino que también abre la puerta a la formulación de mejoras significativas en el diseño estructural. Este estudio busca contribuir al desarrollo de metodologías más eficaces y seguras para el diseño de elementos estructurales críticos, asegurando así un enfoque más confiable y eficiente en la ingeniería civil.

1.5. Justificación y Relevancia

Conforme han pasado los años, dentro de la rama de la ingeniería estructural los requerimientos para asegurar la resiliencia de una estructura han sido más exigentes en cuanto a las necesidades presentes. Por lo cual el desarrollo de nuevos modelos y métodos para resolver problemas estructurales han permitido solventar la funcionalidad de estas en su máxima capacidad y con la mayor eficiencia.

El concepto de puntales y tensores busca introducirse tras la necesidad de tener un método que analice de manera global el diseño de elementos con comportamiento elástico y plástico y de esta manera poder reforzar sus zonas más críticas o de mayor sollicitación. (UNIVERSIDAD AUSTRAL, s/f)

Como objetivo el Modelo Puntal Tensor permite obtener un sistema idealizado en donde la región de la estructura a analizar se simplifica con un modelo compuesto por puntales y tensores que se conectan a través de nodos formando una celosía, obteniendo así un sistema con fuerzas en equilibrio. De

acuerdo con este modelo se garantiza la seguridad de la estructura para soportar cargas al colocar el refuerzo de una manera eficiente en las zonas donde existe mayor concentración de cargas. (Collins & Mitchell, 1997).

Los puntales representan las zonas de compresión y los tensores las zonas de tracción, lo que permite visualizar cómo se distribuyen las fuerzas dentro de una estructura. Este enfoque facilita el diseño en áreas donde las fuerzas no se distribuyen de manera uniforme, como en zonas discontinuas, asegurando que se identifiquen y refuercen correctamente los elementos que están bajo tensión o compresión (Rodríguez, 2007).

Analizando el comportamiento estructural Schlaich et al. (1987) afirma que “Algunas partes de las estructuras se diseñan con una precisión casi exagerada, mientras que otras se diseñan utilizando reglas empíricas o un criterio basado en la experiencia pasada.”

Con lo antes mencionado el presente estudio busca analizar mediante el Modelo Puntal Tensor el comportamiento de vigas altas ensayadas bajo una carga concentrada de acuerdo con las especificaciones del ACI 318-19 capítulo 23.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General.

- Analizar el comportamiento estructural de vigas altas de hormigon armado reforzadas con malla electrosoldada utilizando el Modelo Puntal Tensor del ACI 318-19S.

1.6.2. Objetivos específicos.

- Construir y ensayar una serie de vigas altas con propiedades

semejantes a las existentes en bases de datos.

- Analizar los modos de comportamiento de las vigas ensayadas.
- Evaluar los niveles y patrones de agrietamiento de las vigas ensayadas.
- Definir dos Modelos Puntal Tensor que aproximen el comportamiento observado en los ensayos.
- Determinar la ductilidad alcanzada por las vigas ensayadas.

CAPÍTULO II

2. Marco Teórico

2.1. Hormigón Armado

Según Mattheib (1980) el hormigón armado reúne las ventajas del hormigón para soportar la compresión y las del acero para soportar la tracción. Una vez combinados estos dos materiales se obtiene un trabajo en conjunto, lo cual desemboca en una mayor capacidad de absorber las cargas y esfuerzos aplicados, complementando cada uno la carencia del otro.

La organización American Concrete Institute (ACI) es la encargada de establecer las normas y directrices que se deben seguir en la utilización de hormigón armado, además incluye recomendaciones para las propiedades de cada tipo de hormigón, los refuerzos de acero y los procedimientos de construcción segura, lo cual asegura que las estructuras de hormigón armado logren cumplir con los diseños empleados y con el estándar de seguridad.

2.2. Hormigón.

Winter & Nilson (1986) expresan que el hormigón es un material constructivo que se obtiene a partir de la mezcla cuidadosa proporcionada de

cemento, agua, arena, grava y otros áridos. La mezcla entre cemento y agua provoca una reacción química por la cual los elementos mencionados anteriormente se unen en una sola masa solida que tienen la forma del molde o encofrado de la estructura deseada. La resistencia de este depende de la relación agua-cemento que se obtiene en el diseño, además también se debe procurar que la cantidad de agua sea la adecuada para la trabajabilidad de la mezcla, evitando zonas discontinuas que puedan provocar planos de falla.

2.3. Acero de Refuerzo

Nunilo et al. (2018) exponen que el acero es una aleación de metales especialmente de hierro y carbono. El acero al ser un material que soporta grades esfuerzos a tracción es utilizado para reforzar al hormigón en todas las obras civiles que a diferencia del hormigón este no posee grandes características para soportar dichos esfuerzos. Dentro de nuestro medio el acero se comercializa en varillas y mallas de diferentes diámetros y dependerá netamente del diseño su uso específico.

Tomando en cuenta la funcionalidad del acero los mismos autores mencionan que “Una estructura con más acero presentará un modo de fallo más dúctil y por lo tanto menos frágil”. Es por eso que dentro de las especificaciones para un diseño de un elemento donde se incorpore acero, la normativa ecuatoriana o la normativa a usar por el diseñador especifica una cantidad mínima de acero dependiendo de las secciones críticas a las que sea sometida el elemento.

2.4. Teoría de Vigas Navier-Bernoulli

Este modelo predice mediante la hipótesis del “principio de secciones planas” el cual nos indica que las secciones transversales de una viga permanecen planas y perpendiculares al eje neutro durante la flexión, el comportamiento (deformaciones y soporte) de las vigas al ser sometidas a cargas que alteren su estado de reposo (Mott, 2004).

En esta teoría se asume que el material empleado tiene un comportamiento elástico-lineal y que es homogéneo. Una de las características de que este método sea adecuado para analizar el comportamiento de las vigas es que ignora los efectos de la deformación producida por los esfuerzos a cortante (Allen, DeWolf, & Huber, 2006).

En el modelamiento de una estructura, existen áreas donde la distribución de los esfuerzos es relativamente uniforme, lo que facilita el análisis y diseño de los elementos. Estas zonas se las conoce como zonas B y son generalmente más fáciles de tratar, ya que los esfuerzos en ellas se distribuyen de manera predecible y lineal. Sin embargo, también existen zonas que presentan discontinuidades en la distribución de los esfuerzos, lo cual puede complicar el diseño y la evaluación de la estructura.

Estas discontinuidades son causadas por varios factores, como los cambios en la geometría de los elementos estructurales (por ejemplo, en las uniones o aberturas) y la distribución no lineal de los esfuerzos bajo carga (Holt, 2018). A estas zonas se les conoce como regiones perturbadas o zonas D, ya que los esfuerzos en ellas no siguen un patrón uniforme, lo que puede generar concentraciones de esfuerzos que aumentan el riesgo de fallas o fracturas.

En estas regiones, es crucial un análisis detallado para asegurar la seguridad estructural y una distribución adecuada de los refuerzos (Rodríguez,

2007). La implementación de modelos como el Modelo Puntal Tensor puede ser de gran utilidad en estas regiones, ya que permite capturar la complejidad de las distribuciones de esfuerzo y orientar el refuerzo de manera eficiente (Schlaich, Schäfer, & Jennewein, 1987).

2.4.1. Zonas B

Siguen la teoría de que las zonas planas permanecen planas después de que se haya sufrido una deformación como producto de la aplicación de una carga. Son las zonas de la estructura donde la distribución de esfuerzos es uniforme y pueden ser calculadas con métodos tradicionales como la teoría de Bernoulli. (Aedo, 2004 en Bejarano & Pinzón., 2020).

Cuando una estructura está formada en su mayoría por regiones B se la puede interpretar como un sistema estático. Para calcular y analizar estas zonas se puede utilizar métodos como la teoría de flexión y cortante y el análisis elástico lineal, debido a la distribución uniforme de tensiones. Esto facilita el diseño estructural, ya que las tensiones se distribuyen de forma predecible y lineal, cumpliendo con la hipótesis de que secciones planas se mantienen planas (Wang & Salmon, 2007)

2.4.2. Zonas D

En estas zonas las distribuciones de esfuerzos no son lineales debido a la presencia de discontinuidades como son los cambios bruscos de geometría. En este caso no se puede analizar dichas distribuciones con métodos tradicionales.

Para estas zonas es necesario aplicar un Modelo Puntal Tensor adecuado, el cual se adapte a la geometría de la estructura. Primero se debe realizar un diagrama de cuerpo libre de las zonas D. Posteriormente mediante

los métodos estáticos que satisfacen el equilibrio interno se calculan las fuerzas internas que presenta el sistema tanto en los puntales como en los tensores, siguiendo la norma del ACI 318-19. Por último, se deben diseñar los puntales y los tensores que soportan las cargas aplicadas en cada uno de ellos (Azócar, 2004).

2.5. Puntales

Son los elementos estructurales que están sometidos a compresión, su función principal es transmitir y distribuir la carga efectuada sobre la estructura hacia un soporte. El Modelo Puntal Tensor refleja una armadura hipotética comprendida por puntales de hormigón y tensores de acero.

La adecuada organización y diseño de los puntales es esencial para asegurar que las estructuras soporten las cargas aplicadas sin experimentar fallas anticipadas, lo que garantiza la estabilidad y el rendimiento estructural deseado (INESA Tech, s. f.).

2.6. Tensores

Elementos estructurales sometidos a tracción en un sistema de fuerzas internas, son los encargados de resistir dichas fuerzas proporcionando así la continuidad y estabilidad de la estructura modelada. En el Modelo Puntal Tensor son modelados como barras de acero debido a las propiedades de este material y su ductilidad.

El diseño de estos elementos debe ser realizado determinando su capacidad de carga y procurando la óptima transmisión de esfuerzos para así evitar deformaciones considerables que puedan comprometer el funcionamiento de la estructura (INESA Tech, s. f.).

De acuerdo con lo establecido en el ACI 318-19, la colocación de estos elementos estructurales debe ser en áreas donde se concentre la tracción como lo es en la parte inferior de vigas sometidas a flexión, para asegurar que los tensores tengan la capacidad de absorber la tracción empleada (Park & Paulay, 1975).

2.7. Vigas altas

Se puede definir a una viga alta como un elemento de gran altura conformado principalmente de hormigón armado cuya relación con la luz y su peralte es menor a “ $a/d < 2.4$ ”. Estos elementos, al tener una geometría diferente a la convencional, presentan un comportamiento diferente al momento de ser sometidos a cargas, ya sean puntuales o concentradas (ACI, 2019).

Analizando su comportamiento, el ACI 318-19 especifica que, dentro de estos elementos, el esfuerzo a corte controla el sistema, por lo que presentan mayor resistencia en elementos con menor altura. De acuerdo con la teoría, se dice que dichos esfuerzos pueden ser analizados con métodos de elasticidad bidimensional, elementos finitos o de otro tipo.

Debido a que las vigas altas presentan una mayor altura y una geometría particular, estos elementos experimentan una distribución de esfuerzos que no es uniforme y, por lo tanto, los métodos de diseño convencionales pueden no ser suficientes para garantizar su estabilidad bajo cargas concentradas. Según Park y Paulay (1975), el análisis de estas vigas requiere un enfoque detallado, donde el esfuerzo a corte juega un papel fundamental en su comportamiento, lo que hace necesario el uso de modelos estructurales avanzados como el Modelo Puntal Tensor para un diseño más preciso.

2.8. Normativa Aplicable (ACI 318-19)

El American Concrete Institute (ACI) brinda los parámetros de diseño a seguir para realizar un óptimo diseño de vigas altas utilizando el modelo puntal tensor.

Según lo establece la normativa ACI 318-19, las zonas discontinuas, comúnmente conocidas como zonas D, deben analizarse y diseñarse utilizando el Modelo Puntal Tensor. Este modelo simplifica el comportamiento complejo de estas regiones a través de elementos ideales, como los puntales, que representan los esfuerzos de compresión, y los tensores, que representan los esfuerzos de tracción.

El diseño debe incorporar factores de eficiencia que consideren las condiciones de confinamiento, geometría y propiedades del material, asegurando que las estructuras sean seguras y cumplan con los requisitos de desempeño establecidos por la normativa (American Concrete Institute, 2019).

Las cargas mayoradas se aplican al Modelo Puntal Tensor, y luego se calculan las fuerzas en todos los puntales, tensores y zonas nodales. Si existen varias combinaciones de carga, cada una debe ser analizada por separado. Para un puntal, tensor o zona nodal dado, F_u es la mayor fuerza en ese elemento para todos los casos de carga considerados (American Concrete Institute [ACI], 2019).

La resistencia en los puntales está definida de por la siguiente ecuación (ACI, 2019):

$$\Phi F_{ns} \geq F_{us} \quad (1)$$

F_{us} = Fuerza última del puntal.

$$F_{ns} = F_{ce} * A_{cs}$$

A_{cs} = Área transversal del puntal.

f_{ce} = Resistencia de compresión efectiva del puntal o nodo.

$$f_{ce} = 0.85 * B_c * B_s * f'_c \quad (2)$$

f'_c = Resistencia a la compresión del hormigón

La resistencia en los tensores se define por la siguiente ecuación (ACI, 2019):

$$\Phi F_{nt} \geq F_{ut} \quad (3)$$

F_{ut} = Fuerza última del tensor.

$$F_{nt} = A_{ts} * f_y \quad (4)$$

A_{ts} = Área de acero.

f_y = Fluencia del acero.

La resistencia en los nodos se define por la siguiente ecuación (ACI, 2019):

$$\Phi F_{nn} \geq F_{un} \quad (5)$$

F_{un} = Fuerza ultima en el nodo

$$F_{nn} = f_{ce} * A_{nz}$$

A_{nz} = Área transversal del nodo perpendicular a la línea de acción de la fuerza.

f_{ce} = Resistencia de compresión efectiva.

$$f_{ce} = 0.85 * B_c * B_n * f'_c \quad (6)$$

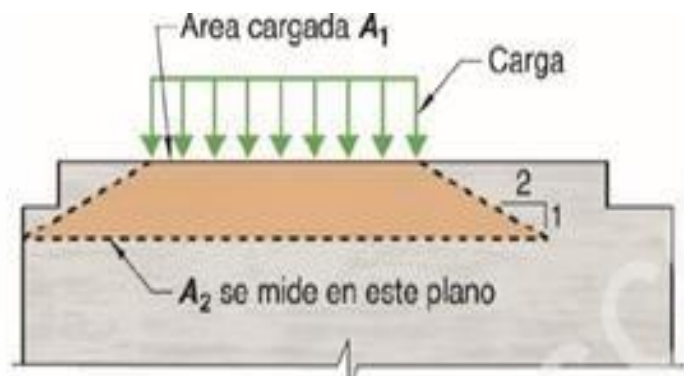
Coefficiente B_c

Este coeficiente tiene en cuenta el confinamiento del hormigón en la resistencia efectiva a compresión de un puntal o nodo. La superficie de apoyo puede ser una platina o el área de una carga de compresión bien definida de otro miembro, como una columna.

El valor de B_c proviene del menor valor entre $\sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$ Y 2 (ACI, 2019).

Figura 1

Esquema grafico de A_1 y la proyección de A_2 .



Nota: Extraído de Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary, por American Concrete Institute, 2019.

Coeficiente B_s .

Este coeficiente aplica en los puntales de borde y resulta en un estado de esfuerzos que es comparable al bloque de esfuerzos rectangular en la zona de compresión de una viga o columna. Los puntales de borde no están sometidos a tracción transversal y por lo tanto tienen una resistencia efectiva f_{ce} más alta que los puntales interiores (ACI, 2019).

El coeficiente B_s se define mediante la siguiente tabla:

Tabla 1

Coeficiente B_s de acuerdo con cada caso

Ubicación del puntal	Tipo de puntal	Criterio	B_s	
Miembros a tracción o zonas a tracción dentro de los miembros	Cualquiera	Todos los casos	0.4	(a)
Todos los otros casos	Puntales de borde	Todos los casos	1	(b)
	Puntales interiores	Refuerzo que cumple con (a) o (b) de la Tabla 23.5.1	0.75	(c)
		Localizados en regiones que cumplen con 23.4.4	0.75	(d)
		Nudos viga-columna	0.75	(e)
		Todos los otros casos	0.4	(f)

Nota: Adaptado de Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary, por American Concrete Institute, 2019.

Coefficiente B_n

El coeficiente B_n en el Modelo Puntal Tensor, de acuerdo con el ACI 318 (American Concrete Institute [ACI], 2019), se emplea para ajustar la resistencia efectiva de los nodos según los tipos de esfuerzos que los rodean. Los nodos se clasifican en tres categorías: C-C-C (totalmente confinados por compresión), C-C-T (con un tensor) y C-T-T o T-T-T (con dos o más tensores). Los valores del coeficiente B_n son 1.0, 0.8 y 0.6, respectivamente, lo que implica una reducción en la resistencia del nodo a medida que aumenta la cantidad de tensores y, por ende, los esfuerzos de tracción. Este ajuste es crucial para asegurar la seguridad del nodo y prevenir fallas prematuras en áreas críticas (ACI, 2019).

Tabla 2

El coeficiente B_n según el tipo de nodo

B_n	
Valor	Zona nodal
1	Zona nodal limitada solo por puntales y áreas de apoyo (C-C-C)
0.8	Zona nodal con un tensor presente (C-C-T)
0.6	Zona nodal con dos o más tensores (C-T-T o T-T-T)

Nota: Adaptado de Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary, por American Concrete Institute, 2019.

2.9. Ductilidad

Según Puigdomènech Franquesa (2003), la ductilidad es una propiedad importante de los elementos estructurales que permite que los mismos disipen energía antes de llegar a su estado de falla o zona plástica, presentando indicios

como las fisuras, las cuales sirven como advertencia de un futuro colapso de la estructura.

Según Park y Paulay (1975), la ductilidad se mide como la relación entre las deformaciones últimas y las deformaciones en el límite elástico, definida por el coeficiente de ductilidad (μ):

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

El ACI 318-19 establece criterios específicos para asegurar que los elementos estructurales posean una ductilidad adecuada, lo que incluye el uso de refuerzos longitudinales y transversales para controlar la fisuración y garantizar un comportamiento dúctil (American Concrete Institute, 2019).

2.9.1. Modelo Elastoplástico

El modelo elastoplástico permite analizar el comportamiento de materiales estructurales en función de una curva bilineal, dentro de esta se diferencia claramente la fase de la elasticidad y plasticidad. Durante la fase elástica la relación fuerza-desplazamiento es lineal, en esta fase se dice que el material recupera su forma original al dejar de aplicar la carga. Si el elemento supera la fase elástica este pasa a la fase plástica en donde el elemento experimenta deformaciones permanentes limitando así su funcionalidad (Park & Paulay, 1975).

El mismo autor expone que un elemento estructural con una mayor extensión en su zona plástica muestra una mejor capacidad de disipación de energía, lo que es esencial en el diseño de elementos que serán sometidos a grandes cargas.

CAPÍTULO III

3. Marco Metodológico

La presente investigación se realizó bajo un enfoque cuantitativo puesto que busca realizar un análisis estructural del Modelo Puntal Tensor en 42 vigas altas armadas con mallas electrosoldadas y con diferentes refuerzos longitudinales, de tal modo que de acuerdo con su comportamiento se pueda establecer un modelo representativo según las hipótesis planteadas aplicando los conceptos establecidos en el ACI 318-19. El estudio es de tipo experimental, dado que implica la realización de pruebas controladas en laboratorio para evaluar las propiedades de los materiales y el comportamiento estructural de vigas altas.

3.1. Variables.

Las variables consideradas en el estudio son las siguientes:

- Resistencia a la compresión del hormigón.
- Refuerzo longitudinal (tensores).
- Malla electrosoldada.

Las dimensiones de las vigas son constantes en cada probeta, porque se busca evaluar el comportamiento de estos elementos estructurales con diferentes cuantías de acero en una sección establecida y constante.

3.2. Caracterización y ensayos de materiales

3.2.1. Análisis granulométrico, determinación de porcentaje de finos y módulo de finura de árido fino y grueso

La evaluación granulométrica es un método crucial empleado para establecer la distribución de los tamaños de las partículas en los áridos fino y grueso, garantizando su idoneidad técnica para su uso en la producción de hormigón estructural.

De acuerdo con la normativa NTE INEN 695 y se realizó el muestreo de los áridos dentro de la Mina San Martín. Para la realización de los ensayos dentro del laboratorio se hizo uso de la misma normativa para poder clasificar los áridos para cada uno de los ensayos.

Para los áridos finos, se analizó el porcentaje de partículas que pasan por el tamiz No. 200, evitando niveles excesivos de limo o arcilla que puedan poner en riesgo la adhesión entre el cemento y los agregados, obteniendo como resultado una concentración de finos del 2.68%.

Conforme a la NTE INEN 696, se definió el módulo de finura y la clasificación de los áridos como factores esenciales para conseguir una mezcla homogénea y con condiciones de trabajo óptimas (INEN, 2014).

A partir de la Tabla 3 se puede verificar que el módulo de finura del árido fino es del 2.89%, de este modo se puede decir que el árido fino cumple con las características para ser usado dentro de un hormigón estructural.

Figura 2

Extracción de árido grueso para futuros ensayos.



Figura 3

Pesaje de árido grueso para realizar el ensayo de granulometría



Figura 4

Pesaje de árido grueso para realizar el ensayo de granulometría



Tabla 3

Granulometría de árido fino

CANTERA " San Martín "					
PESO INICIAL DE LA MUESTRA =					640.4 g
TAMIZ	PESO	PESO	RETENIDO	PASANTE	
PULGADAS	mm	RETENIDO	RETENIDO	ACUMULADO	ACUMULADO
		[gr]	[%]	[%]	[%]
3/8 "	9.50 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
N° 4	4.75 mm	2.30	0.36	0.36	99.64
N° 8	2.36 mm	89.80	14.06	14.42	85.58
N° 16	1.18 mm	131.90	20.64	35.06	64.94
N° 30	600.0 µm	167.00	26.14	61.20	38.80
N° 50	300.0 µm	143.10	22.40	83.60	16.40
N° 100	150.0 µm	70.40	11.02	94.62	5.38
N° 200	75.0 µm	25.50	3.99	98.61	1.39
FONDO		8.90	1.39	100.00	0.00
TOTAL [g]		638.90	100.00		

En la tabla 4 se muestra la relación entre el límite inferior, superior y pasante acumulado con la finalidad de obtener la curva granulométrica del árido fino de acuerdo con la normativa.

Tabla 4

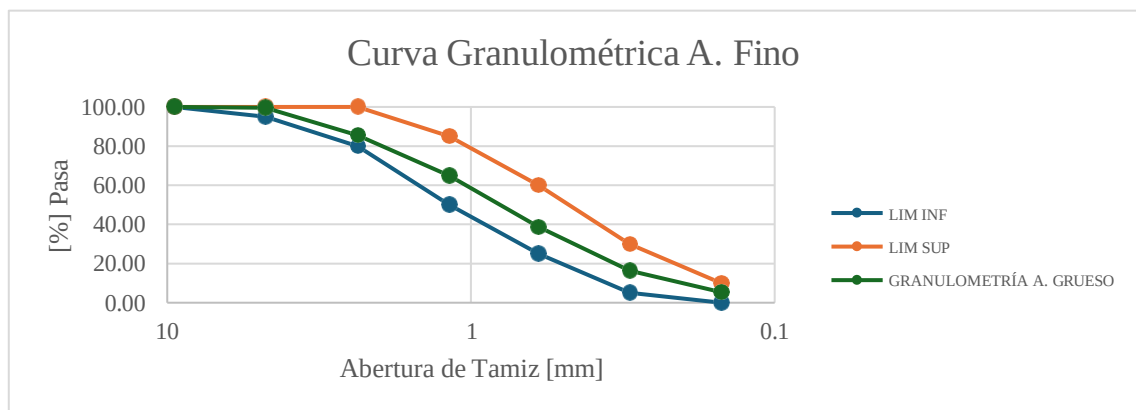
Limites superior e inferior para Construcción de la curva granulométrica

TAMIZ		LÍMITE INFERIOR	PASANTE ACUMULADO	LÍMITE SUPERIOR	CUMPLIMIENTO
PULGA	Mm	[%]	DO [%]	[%]	O
DAS					
3/8 "	9,50 mm	100,00	100,00	100,00	CUMPLE
N° 4	4,75 mm	95,00	99,64	100,00	CUMPLE
N° 8	2,36 mm	80,00	85,58	100,00	CUMPLE
N° 16	1,18 mm	50,00	64,94	85,00	CUMPLE
N° 30	600,0 µm	25,00	38,80	60,00	CUMPLE
N° 50	300,0 µm	5,00	16,40	30,00	CUMPLE
N° 100	150,0 µm	0,00	5,38	10,00	CUMPLE

Con respecto a lo establecido según la normativa NTE INEN 872 el pasante acumulado se encuentra dentro de los rangos establecidos (Ilustración 1).

Ilustración 1

Curva granulométrica de árido fino



Nota: Elaboración propia.

Tomando en cuentas las consideraciones anteriores establecidas por la normativa se realizó los ensayos respectivos para determinar la granulometría del árido grueso obteniendo la siguiente tabla granulométrica (Tabla 5).

Tabla 5*Granulometría de Árido Grueso*

CANTERA " San Martín "					
PESO INICIAL DE LA MUESTRA =				2.00 kg	
TAMIZ		PESO	PESO	RETENIDO	PASANTE
PULGADAS	mm	RETENIDO	RETENIDO	ACUMULADO	ACUMULADO
		[gr]	[%]	[%]	[%]
3/4 "	19.00 mm	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2 "	13.20 mm	59.20	2.96	2.96	97.04
3/8 "	9.50 mm	578.30	28.92	31.88	68.13
N° 4	4.75 mm	1185.10	59.26	91.13	8.87
N° 8	2.36 mm	157.10	7.86	98.99	1.01
N° 16	1.18 mm	17.80	0.89	99.88	0.12
N° 30	600.0 µm	2.50	0.13	100.00	0.00
TOTAL [g]		2000.00	100.00		

De acuerdo con la tabla 5 de la normativa INEN 872 “Requisitos de gradación para áridos gruesos” se ajustó la Tabla 6 para obtener la curva granulométrica donde el porcentaje de pasante acumulado cumpla de acuerdo con los límites establecidos por la normativa.

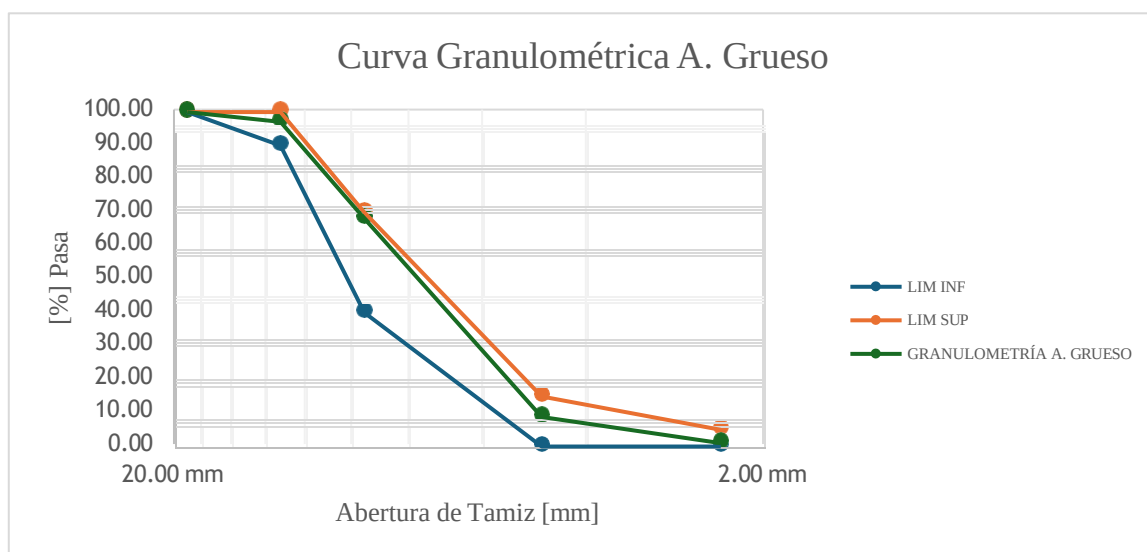
Tabla 6*Límites superior e inferior para Construcción de la curva granulométrica*

TAMIZ		LÍMITE	PASANTE	LÍMITE	CUMPLIMIENTO
PULGADAS	Mm	INFERIOR	ACUMULADO	SUPERIOR	
		[%]	[%]	[%]	
3/4 "	19.00 mm	100.00	100.00	100.00	CUMPLE
1/2 "	13.20 mm	90.00	97.04	100.00	CUMPLE
3/8 "	9.50 mm	40.00	68.13	70.00	CUMPLE
N° 4	4.75 mm	0.00	8.87	15.00	CUMPLE
N° 8	2.36 mm	0.00	1.01	5.00	CUMPLE

Para el caso del árido grueso según la Tabla 2 “Requisitos de gradación para áridos gruesos” de la normativa NTE INEN 872 el número de tamaño de la muestra seleccionada es 7, en donde de acuerdo con el porcentaje de pasante se obtiene la siguiente curva granulométrica (Ilustración 2).

Ilustración 2

Curva granulométrica de Árido Grueso



Nota: Elaboración propia.

Los materiales de la Mina San Martín ensayados en laboratorio, tanto de árido grueso y fino cumplen con las especificaciones de la normativa NTE INEN 872 de tal manera que se garantiza la calidad y adecuación de los materiales a utilizar para el diseño del hormigón estructural.

Dentro de este proceso se realizó una serie de ensayos normados con la finalidad de evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, asegurando que cumplan con los criterios establecidos por la NTE INEN 696 y normativas ASTM aplicables. Este análisis proporciona parámetros clave para optimizar las proporciones de la mezcla y garantizar la resistencia, durabilidad y calidad del hormigón estructural. (Consejo ACI 211, 2002).

3.2.2. Malla Electrosoldada

Para esta investigación, se seleccionó como muestra cuatro tipos de mallas electrosoldadas, con diámetros de 6, 7, 8 y 10 mm. Estas dimensiones fueron elegidas estratégicamente para evaluar el desempeño estructural de las vigas altas diseñadas, en función de la capacidad de las mallas para trabajar como refuerzo principal en el modelo estructural.

La selección se basó en la necesidad de cubrir un rango de diámetros que permitiera analizar cómo las variaciones en las propiedades geométricas y mecánicas de las mallas influyen en la distribución de esfuerzos y la resistencia global de las vigas.

Esta investigación al centrar su análisis en el comportamiento de vigas altas busca como objetivo evaluar cada uno de los materiales que la conforman, de tal forma que se pueda estimar su comportamiento frente a las cargas actuantes.

Tomando en consideración las especificaciones técnicas del material (Malla electrosoldada) se tiene que el límite de fluencia para los cuatro tipos de mallas es el siguiente (Tabla 5).

Tabla 7

Esfuerzo de fluencia de mallas electrosoldadas

Nombre de la Malla Electrosoldada	Límite de fluencia (Fy) (MPa)
Malla 1 15x15 ø 6mm	490
Malla 2 15x15 ø 7mm	490
Malla 3 15x15 ø 8mm	490
Malla 4 15x15 ø 10mm	490

Nota: El valor del Límite de fluencia fue extraído de la ficha técnica de acuerdo con el proveedor del material (ADELCA).

El uso de estos cuatro tipos de mallas como muestra permite explorar el impacto de diferentes diámetros en la rigidez y ductilidad de las vigas, proporcionando una base sólida para el análisis comparativo entre las configuraciones propuestas. Este enfoque experimental se alinea con el objetivo de validar la eficacia del Modelo Puntal Tensor en diseños estructurales que empleen este tipo de refuerzo.

3.3. Construcción de Vigas Altas de Hormigón Armado.

3.3.1. Plan de Trabajo

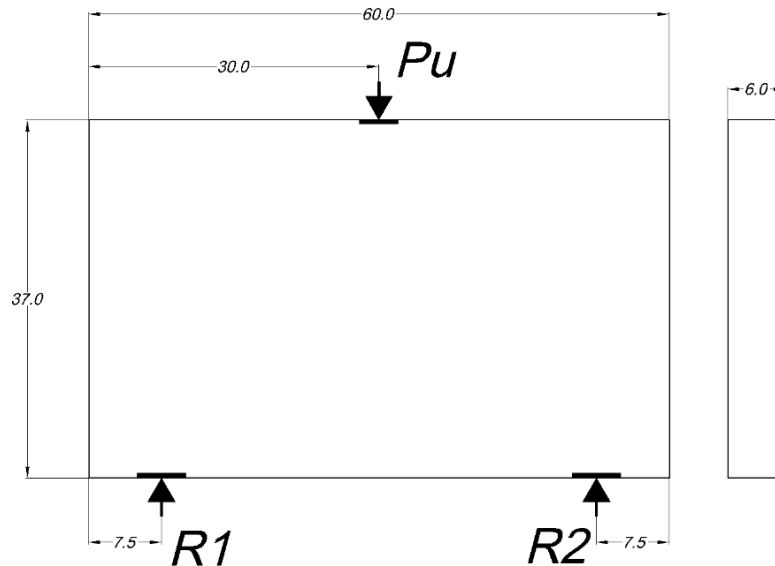
Se elaboró un plan de trabajo considerando las disponibilidades del laboratorio y los tiempos de ejecución. El objetivo principal fue construir 42 vigas en un periodo de un mes y medio, para lo cual se organizaron cuatro fundiciones consecutivas.

Tomando en cuenta la teoría estudiada de vigas altas se estableció las dimensiones de la viga de tal manera que cumpla con lo establecido según el ACI 318-19.

Para definir a una viga como una viga peraltada la relación entre su peralte (d) y la distancia al punto de aplicación de la carga (a) debe ser menor a 2 o 2.5. Bajo estas condiciones se estableció que la viga tendría una relación a/d igual a 0.81 (Ilustración 3).

Ilustración 3

Plano general de dimensiones de viga a construir



Nota: R_1 y R_2 representan la reacción en los apoyos y P_u la carga de aplicación.

Elaboración propia.

3.3.2. Matriz de Ensayo

En la tabla 8 se presenta la matriz de ensayo en donde se muestra el tipo de combinaciones de modelos que se realizarán en función del tipo de malla y de la variación del refuerzo longitudinal.

Se especifica en la tabla 8 el nombre del modelo identificándolo de la siguiente manera: Las mallas electrosoldadas con las que se trabajó en el proyecto, fueron de un diámetro de 6 mm, 7 mm, 8 mm y 10 mm; las cuales fueron denominadas M1, M2, M3 Y M4 respectivamente. El término “T” que acompaña a esta terminología se refiere al refuerzo de varilla longitudinal para cada probeta, denominada tensor, acompañada del número de diámetro de varilla a usar.

Tomar en cuenta que se realizaran dos especímenes con las mismas características por cada modelo, de tal manera que los resultados obtenidos puedan ser analizados y verificados con su semejante.

Para la tabla 6 la cuantía horizontal está en función del diámetro de la malla más el refuerzo longitudinal según sea el tipo de modelo.

La separación vertical (Sv) y horizontal (Sh) especificadas en la Tabla 6 representan las distancias máximas permitidas entre las barras longitudinales y transversales de la malla electrosoldada, de acuerdo con los criterios establecidos por el código ACI 318-19. Estas separaciones aseguran la adecuada distribución del refuerzo y el control de la fisuración, contribuyendo a un comportamiento estructural conforme a los requisitos normativos.

Tabla 8

Matriz de ensayo para elaboración de vigas altas

c/u	Nombre de Modelo	F'c	Refuerzo longitudinal	Ø Malla	Sv	Sh	ρ ver	ρ hor	Verificación
		MPa		mm	mm	mm			
2	M1	34	-	6	750	750	0.011	0.013	OK
2	M2	34	-	7	750	750	0.015	0.017	OK
2	M3	34	-	8	750	750	0.020	0.023	OK
2	M1-T5	24	1 tensor 5mm	6	750	750	0.011	0.015	OK
2	M4-T8	24	1 tensor 8mm	10	750	750	0.031	0.040	OK
2	M3-T8	24	1 tensor 8mm	8	750	750	0.020	0.027	OK
2	M3-T5	24	1 tensor 5mm	8	750	750	0.020	0.024	OK
2	M1-T8	24	1 tensor 8mm	6	750	750	0.011	0.017	OK
2	M2-2T5	24	2 tensores 5mm	7	750	750	0.015	0.021	OK
2	M1-T6	24	1 tensor 6mm	6	750	750	0.011	0.015	OK
2	M2-T6	24	1 tensor 6mm	7	750	750	0.015	0.020	OK
2	M2-T10	24	1 tensor 10mm	7	750	750	0.015	0.024	OK
2	M3-T6	24	1 tensor 6mm	8	750	750	0.020	0.025	OK
2	M4-T6	24	1 tensor 6mm	10	750	750	0.031	0.038	OK
2	M4-T10	24	1 tensor 10mm	10	750	750	0.031	0.042	OK
2	M2-T5	24	1 tensor 5mm	7	750	750	0.015	0.019	OK

2	M3-T10	24	1 tensor 10mm	8	750	750	0.020	0.030	OK
2	M4-2T5	24	2 tensores 5mm	10	750	750	0.031	0.039	OK
2	M2-2T10	24	2 tensores 10mm	7	750	750	0.015	0.031	OK
2	M1-T10	24	1 tensor 10mm	6	750	750	0.011	0.020	OK
2	M2-T10T5	24	1 tensor 10mm y 5mm	7	750	750	0.015	0.026	OK
Total		, de							
		vigas							
		42							

Nota: pver y phor representa la cuantía vertical y horizontal respectivamente.

3.3.3. Elaboración del Encofrado

En función del diseño y las dimensiones de las planchas MDF, se elaboraron planos detallados del encofrado requerido para el proyecto. Las planchas fueron cortadas mediante tecnología láser para garantizar precisión y evitar errores dimensionales. Las uniones se realizaron utilizando tornillos de $\frac{3}{4}$ de pulgada, asegurando la rigidez estructural de los moldes.

Se fabricaron 12 moldes reutilizables, optimizando así los recursos disponibles. Después de cada fundición, los moldes fueron limpiados y reacondicionados para su siguiente uso, garantizando su funcionalidad y durabilidad.

Figura 5

Corte de MDF para la elaboración de encofrado



Figura 6

Encofrado de las vigas altas



3.3.3.1. Corte de Barras y Mallas

El corte de las barras y mallas se realizó utilizando una cortadora eléctrica. A partir de los lotes de mallas adquiridos, se extrajeron las varillas individuales para ajustar a las dimensiones de separación máxima y las secciones de mallas según las dimensiones establecidas (Ilustración 4)..

Figura 7

Malla electrosoldada cortadas para posterior amarrado.



Figura 8

Platinas cortadas (posteriormente serán colocadas en la fundición)



Figura 9

Barras transversales y longitudinales.



Las mallas utilizadas presentan un espaciamiento de fábrica de 15 x 15 cm, el cual no cumplía con el espaciamiento máximo requerido por el Modelo Puntal Tensor (7.5 cm) según el ACI 318-19. Por lo tanto, se realizó un ajuste en el armado, redistribuyendo el refuerzo transversal y longitudinal para cumplir con los requisitos del modelo.

Es importante señalar que tanto las varillas para adecuar el armado como las mallas provenían del mismo lote de material, asegurando uniformidad en las propiedades mecánicas y garantizando que el acero tuviera una fluencia constante.

3.3.3.2. Amarre de la Armadura

La armadura se ensambló utilizando alambre de amarre, asegurando el espaciamiento mínimo y reforzando las áreas críticas de los tensores según los diseños específicos de cada viga. En las mallas y barras de mayor diámetro (8 mm y 10 mm), se aplicó un doble amarre para aumentar la estabilidad de la armadura.

En función de la tabla 6 se procedió a realizar el armado de la estructura tomando en cuenta el tipo de malla y refuerzo a utilizar en cada modelo.

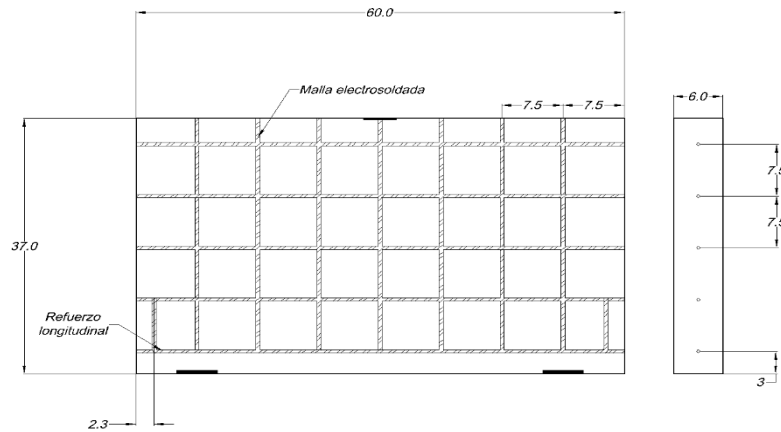
Figura 10

Amarre de la armadura



Ilustración 4

Plano general de viga peraltada con su respectiva malla electrosoldada y varilla de refuerzo longitudinal.



Nota: Elaboración propia

3.3.4. Fundición de las Vigas

3.3.4.1. Preparación De Los Materiales

Se determinaron las humedades de los áridos mediante pesaje en su estado natural, seguido de un proceso de secado en hornillas para realizar un segundo pesaje. Con estos datos, se ajustaron las proporciones de los materiales en el diseño del hormigón, obteniendo las cantidades exactas de áridos y agua requerida.

3.3.4.2. Adecuación De Los Moldes

Antes del vertido del hormigón, se aplicó aceite en las superficies internas de los moldes para facilitar el desencofrado. Las armaduras se posicionaron cuidadosamente en los moldes, asegurando una correcta alineación para evitar defectos en las vigas.

Figura 11

Alineación de la armadura en el encofrado.



Figura 12

Armaduras correctamente alineadas en el encofrado.



3.3.4.3. Elaboración Y Vertido Del Hormigón

El hormigón se preparó siguiendo las especificaciones del ACI (American Concrete Institute). En la mezcladora se colocaron primero el árido grueso, seguido del árido fino y el cemento. El agua se añadió de manera continua durante el mezclado para obtener una mezcla uniforme.

Antes del vertido, se realizó ensayo de asentamiento del hormigón se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C143/C143M (ASTM, 2024), el cual establece los pasos necesarios para determinar la consistencia del hormigón mediante el uso del cono de Abrams.

La mezcla se consideró aceptable cuando los rangos de asentamiento estuvieron entre 10 cm y 15 cm.

El hormigón se vertió en los moldes en capas, seguido de un proceso de varillado exhaustivo para eliminar vacíos y asegurar una estructura homogénea. Finalmente, se enrazó la superficie superior de las vigas.

Figura 13

Fundición y varillado de vigas altas



3.3.4.4. Curado De Las Vigas

Tras 24 horas del vertido, se procedió al desencofrado de las vigas. El curado se realizó mediante un proceso de humectación diaria hasta la fecha de ruptura, asegurando que el hormigón mantuviera su hidratación y alcanzara la resistencia requerida. Este proceso se llevó a cabo en condiciones similares al curado de losas, priorizando la conservación de humedad constante sobre la superficie de las vigas.

3.3.5. Ensayos De Vigas Altas De Hormigón Armado

Antes de iniciar el ensayo, se realizó una calibración precisa de la máquina de ensayos universal para garantizar su correcto funcionamiento. Se verificó la colocación simétrica de los apoyos respecto al eje longitudinal de la viga, asegurándose de que ambos estuvieran alineados dentro de las placas de contacto de la probeta. Asimismo, se comprobó que la carga puntual estuviera perfectamente centrada en el punto medio de la luz libre de la viga.

Figura 14

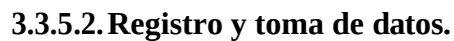
Colocación de viga en los apoyos y calibración de máquina de ensayos universal



3.3.5.1. Medición Y Monitoreo De Las Grietas

Previo a la rotura de cada viga, se estimó la carga última bajo la cual la probeta fallaría. Durante el ensayo, se programaron pausas controladas al 25%, 50%, 75% y 100% de la carga última estimada, permitiendo registrar el desarrollo de las fisuras generadas en cada intervalo. En cada pausa, las grietas emergentes se marcaron con un marcador para facilitar su identificación y registro. Este procedimiento permitió que las cámaras enfocaran con precisión las trayectorias de las grietas, contribuyendo al análisis detallado del patrón de falla.

Medición de grietas



Al finalizar el ensayo, se elaboró un esquema gráfico que representó de manera detallada la trayectoria y distribución de las grietas en los especímenes, proporcionando un análisis visual de su propagación. Adicionalmente, se generó la curva de esfuerzo-deformación, que fue crucial para obtener la gráfica de fuerza-deformación, la cual sirvió para evaluar la respuesta estructural de las probetas bajo carga y analizar el comportamiento del material en función de la deformación experimentada.

Una vez ensayados cada uno de los especímenes, se realizó la medición de los anchos de los puntales HP1 Y HP2 (ancho de puntales 1 y 2 respectivamente) formados en cada probeta ensayada después de su falla, con la finalidad de conocer la sección de estos para futuros cálculos (Tabla 9).

Figura 16

Probeta M1-T10 (ensayo 1) previo al ensayo



Figura 1

Probeta M1-T10 (ensayo 1) posterior al ensayo

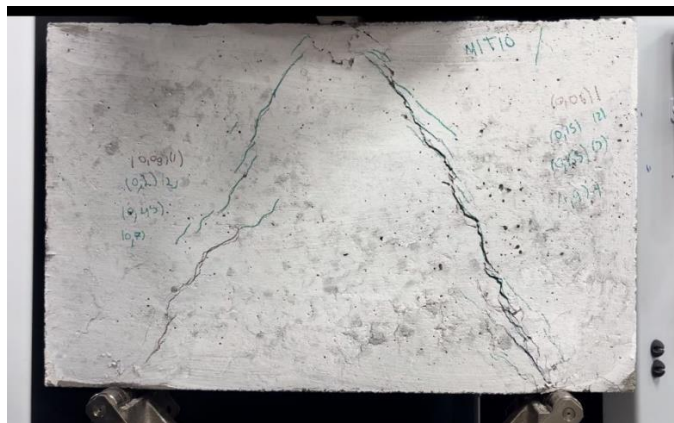
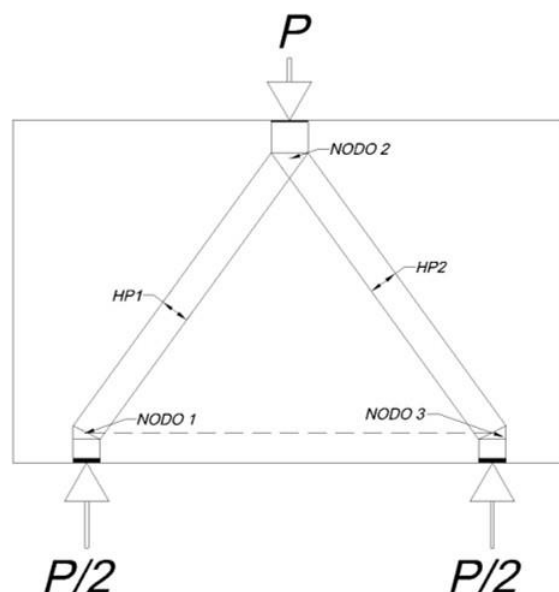


Ilustración 5

Esquema general de anchos de puntales



Nota: Elaboración propia.

Tabla 9

Registro de medición de ancho de puntales probetas 1 y 2

NOMBRE DEL MODELO	PROBETA 1		PROBETA 2	
	HP1	HP2	HP1	HP2
	mm	mm	mm	Mm
M1	52.69	41.30	53.43	43.36
M2	46.47	35.96	39.22	45.88
M3	41.30	45.10	41.70	44.70
M1-T5	53.72	45.88	44.55	57.13
M4-T8	33.70	41.70	42.70	50.10
M3-T8	38.90	41.30	35.20	46.60
M3-T5	39.00	44.40	42.40	40.00
M1-T8	44.90	43.07	39.70	41.90
M2-2T5	43.50	37.90	44.90	38.20
M1-T6	43.60	48.10	44.50	42.30
M2-T6	45.29	39.22	41.60	40.30
M2-T10	42.18	56.83	59.50	41.44
M3-T6	37.90	50.32	50.76	47.36
M4-T6	40.90	37.80	42.18	40.80
M4-T10	48.00	50.00	42.70	50.30

M2-T5	41.50	35.50	41.90	38.60
M3-T10	47.06	41.14	47.36	37.44
M4-2T5	37.40	41.70	50.00	36.20
M2-2T10	41.80	50.70	41.70	41.20
M1-T10	39.40	41.20	38.92	42.33
M2-T10T5	44.40	39.50	39.00	46.40

3.4. Modelos Puntal Tensor

El diseño de las vigas altas se desarrolla según las especificaciones de la **ACI 318-19**, considerando la geometría, las cargas y los refuerzos necesarios para garantizar un desempeño estructural adecuado.

Se emplea el Modelo Puntal Tensor para identificar las zonas de compresión y tensión dentro de las vigas, diseñando los refuerzos según la trayectoria de las fuerzas internas.

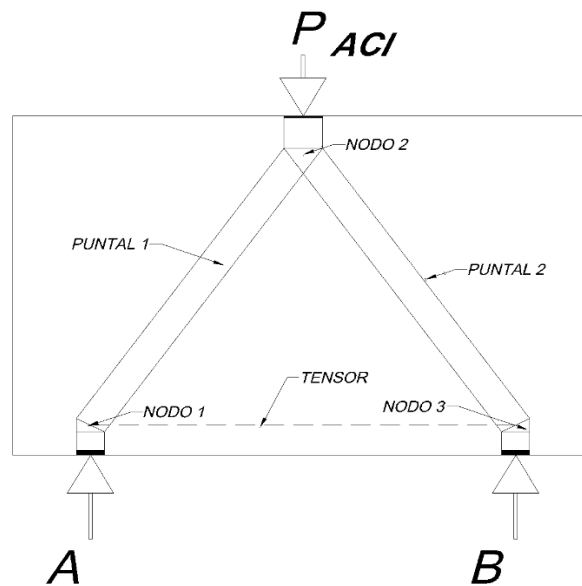
Como parte principal el modelo busca realizar un análisis estático dentro de las armaduras planteadas.

Como fundamento para el estudio, se llevó a cabo un análisis de dos modelos de puntales-tensores con el objetivo de identificar cuál de ellos es el más eficiente en la representación de los resultados obtenidos durante los ensayos (Ilustración 6 y 7). Este enfoque permite evaluar y comparar el rendimiento de ambos modelos, proporcionando una base sólida para determinar su efectividad en aplicaciones prácticas.

3.4.1. Modelo Puntal Tensor 1

Ilustración 6

Esquema general del Modelo Puntal Tensor 1



Nota: El valor de P_{ACI} será el valor determinado como carga máxima que resistirá la viga peraltada en función de sus elementos (puntales, tensores, nodos). Elaboración propia.

Nodo 1:

Para poder analizar el equilibrio interno de fuerzas en el nodo 1 se define

a:

“Fp1” como la fuerza máxima que resistirá el puntal.

“T” El valor de la resistencia máxima del tensor

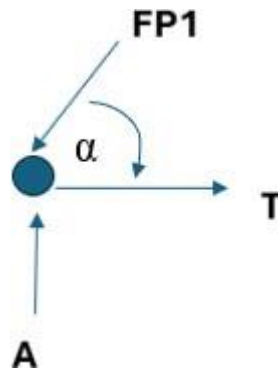
“A” representa la reacción en el apoyo

El ángulo α fue medido de acuerdo con la geometría propuesta de las vigas

$$\alpha = 52^\circ$$

Figura 17

Fuerzas internas en el nodo 1 del Modelo Puntal Tensor 1.



Nota: Elaboración propia

Partiendo de la sumatoria de fuerzas en el eje “y” se tiene que:

$$\Sigma Fy = 0$$

$$A - Fp1 * \text{sen}(\alpha) = 0 \quad (7)$$

Se determina la fuerza del puntal 1.

$$Fp1 = \frac{P_{ACI}}{2 * \text{sen}(\alpha)} \quad (13)$$

El P_{ACI} calculado en función del $Fp1$ es:

$$P_{ACI} = Fp1 * 2 * \text{sen}(\alpha) \quad (8)$$

Tomando en cuenta la sumatoria de fuerzas en el eje “x” se tiene que:

$$\Sigma FX = 0$$

$$T - Fp1 * \text{cos}(\alpha) = 0 \quad (9)$$

$$T = Fp1 * \cos(\alpha) \quad (10)$$

Determinamos la fuerza del tensor.

$$T = \frac{P_{ACI}}{2} * \arctan(\alpha) \quad (11)$$

El P_{ACI} calculado en función del T es:

$$P_{ACI} = T * 2 * \tan(\alpha) \quad (12)$$

Tomando en cuenta la ilustración 6, el nodo 3 se encuentra bajo las mismas condiciones por lo que se realiza el mismo análisis estático, la diferencia radica en el ancho de los puntales producidos al efectuar la carga puntual en la probeta, lo que define la fuerza del puntal 1 y 2 ($Fp1$ y $Fp2$), las cuales pueden no ser iguales, por lo tanto:

$$Fp2 = \frac{P_{ACI}}{2 * \sin(\alpha)} \quad (14)$$

El P_{ACI} calculado en función del $Fp2$ es:

$$P_{ACI} = Fp2 * 2 * \sin(\alpha) \quad (15)$$

Tomar en cuenta que dentro de los cálculos se toma el menor valor de los P_{ACI} calculados. Este valor representará la carga máxima que soportará el elemento.

3.4.2. Modelo Puntal Tensor 2

Para poder analizar el equilibrio interno de fuerzas en los nodos se define que:

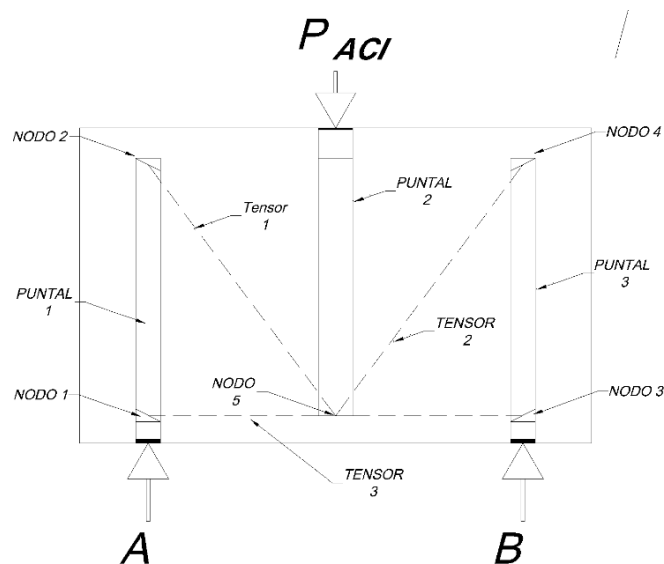
“Fp1, Fp2, Fp3” es la fuerza máxima que resistirá el puntal 1, 2 y 3.

“T1, T2 y T3” El valor de la resistencia máxima de los tensores 1, 2 y 3.

“A y B” representan las reacciones en los apoyos

Ilustración 7

Esquema general del Modelo Puntal Tensor 2

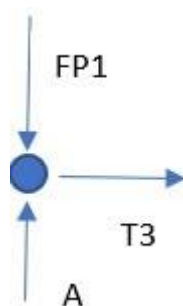


Nota: Elaboración propia

Nodo 1:

Figura 18

Fuerzas internas en el nodo 1 del Modelo Puntal Tensor 2.



Nota: Elaboración propia

En función de la sumatoria de las fuerzas internas en el eje “y” se tiene que:

$$\Sigma F_y = 0$$

$$A - F_{p1} = 0 \quad (16)$$

$$A = F_{p1} \quad (17)$$

Se determina la fuerza del puntal 1.

$$F_{p1} = \frac{P_{ACI}}{2} \quad (18)$$

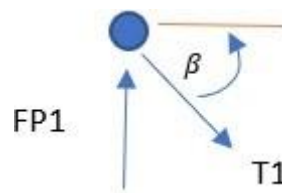
El P_{ACI} calculado en función del F_{p1} es:

$$P_{ACI} = F_{p1} * 2 \quad (19)$$

Nodo 2:

Figura 19

Fuerzas internas en el nodo 2 del Modelo Puntal Tensor 2.



Nota: Elaboración propia:

En función de la sumatoria de las fuerzas internas en el eje “y” se tiene que:

$$\Sigma F_y = 0$$

$$-T1 * \text{sen}\beta + Fp1 = 0 \quad (20)$$

$$T1 = \frac{Fp1}{\text{sen}(\beta)} \quad (21)$$

Se determina la fuerza del T1 teniendo en cuenta la ecuación (21).

$$T1 = \frac{P_{ACI}}{2 * \text{sen}(\beta)} \quad (22)$$

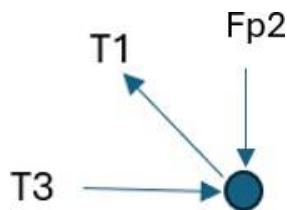
El P_{ACI} calculado en función del T1 es:

$$P_{ACI} = T1 * 2 * \text{sen}(\beta) \quad (23)$$

Nodo 3:

Figura 20

Fuerzas internas en el nodo 3 del Modelo Puntal Tensor 2.



Nota: Elaboración Propia

$$\Sigma F_x = 0$$

$$T3 - T1 * \cos(\beta) = 0 \quad (24)$$

$$T3 = T1 * \cos(\beta) \quad (25)$$

Determinamos la fuerza del T3.

$$T3 = \frac{P_{ACI}}{2} * \arctan(\beta) \quad (26)$$

$$P_{ACI} = 2 * T3 * \tan(\beta) \quad (29)$$

Cálculo del puntal 2 (Fp2)

Figura 21

Fuerzas internas en el punto de aplicación de carga y el puntal 2.



$$\Sigma Fy = 0$$

$$Fp2 - P_{ACI} = 0 \quad (30)$$

$$P_{ACI} = Fp2 \quad (31)$$

El cálculo del puntal 3 (Fp3) y tensor 2 (T2) se realiza igual a los cálculos del puntal 1 (Fp1) y tensor 1 (T1) respectivamente, el ancho de estos son los que hacen que los valores del P_{ACI} en cada elemento sea diferente.

CAPÍTULO IV

4. Resultados Y Análisis

4.1. Niveles Y Patrones De Agrietamiento De Las Vigas

Se realizaron mediciones del agrietamiento en función de la carga última de cada uno de los modelos. Obteniendo como resultados los siguientes patrones de agrietamiento.

El 15 % de las vigas altas (modelos M1, M2, M3) ensayadas fueron diseñadas con un hormigón con resistencia a la compresión (F'_c) de 34 MPa, estos modelos presentan un armado sin refuerzo longitudinal adicional, es decir están constituidas solo por la malla electrosoldada. Dentro de estos modelos se exhibieron patrones de agrietamiento perpendiculares al eje de la viga. En este grupo de vigas se obtiene como resultado que el modelo M2 soporta una carga ultima (P_u) de 170.55 kN en el ensayo 2, siendo este el valor de carga ultima máximo registrado.

Según los ensayos realizados en las probetas M1, M2 y M3, las cuales fueron diseñadas sin refuerzo longitudinal extra, se observó la aparición de grietas perpendiculares al eje de las vigas (Ilustración 8, 9 y 10). Este fenómeno indica que la ausencia de refuerzo longitudinal contribuye a una mayor flexión de las vigas, lo que a su vez genera el agrietamiento observado. Este

comportamiento se puede observar también en menor magnitud en las vigas altas con refuerzo longitudinal mínimo como son los modelos M1-T5 Y M1-T6 (Ilustración 12 y 17 respectivamente).

El comportamiento de las probetas durante las pruebas es significativo para comprender cómo la falta de refuerzo longitudinal afecta la integridad estructural de las vigas. En condiciones normales, el refuerzo longitudinal es esencial para mejorar la resistencia a la flexión y minimizar el riesgo de fisuras. Sin embargo, en este caso, la carencia de dicho refuerzo permitió que las vigas se deformaran más allá de su capacidad, resultando en la formación de grietas.

Las vigas ensayadas presentan una falla en común en la zona de aplicación de la carga P_u (Nodo 2). En este punto las vigas fallan por aplastamiento, generando la falla total del elemento.

Este tipo de vigas que están sometidas a cargas significativas es posible que la fibra superior de la viga experimente fallas por aplastamiento si la capacidad de compresión del concreto se ve superada antes de que se alcance la fluencia del acero de refuerzo. Este fenómeno es crítico en el diseño estructural, ya que el aplastamiento puede comprometer la integridad de la viga y, por ende, de toda la estructura.

La ilustración 8 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 162.45 kN y una grieta máxima de 0.65 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 147.89 kN y una grieta máxima de 0.4 mm.

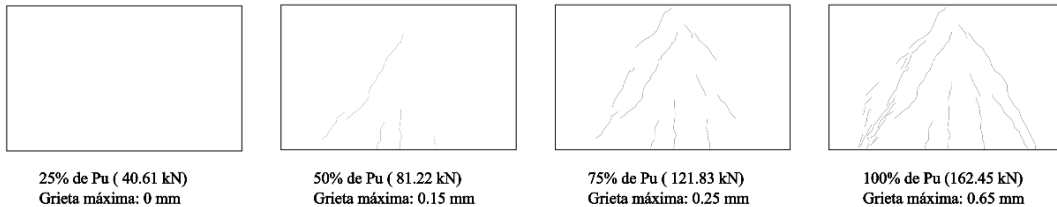
Ilustración 8

Patrones de agrietamiento en probetas M1

MUESTRA M1

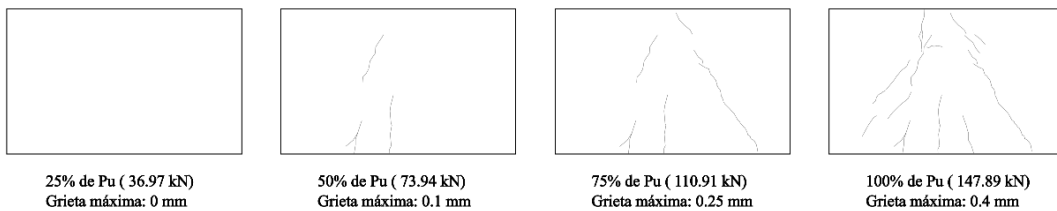
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 9 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 160.65 kN y una grieta máxima de 0.5 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 170.54 kN y una grieta máxima de 0.8 mm. Los dos especímenes fallaron por aplastamiento en el nodo 2.

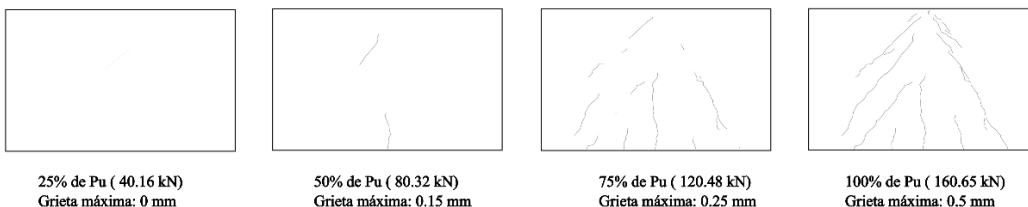
Ilustración 9

Patrones de agrietamiento en probetas M2

MUESTRA M2

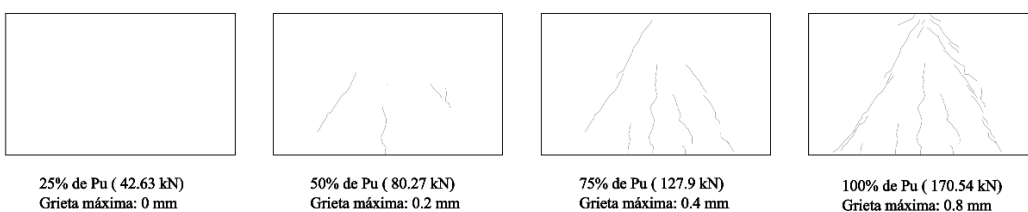
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 10 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 143.65 kN y una grieta máxima de 0.8 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 152.443 kN y una grieta máxima de 1 mm.

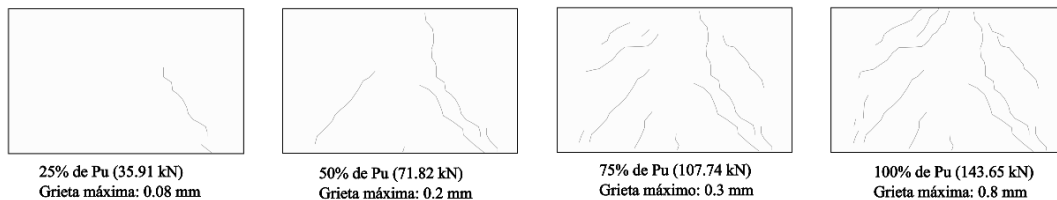
Ilustración 10

Patrones de agrietamiento en probetas M3

MUESTRA M3

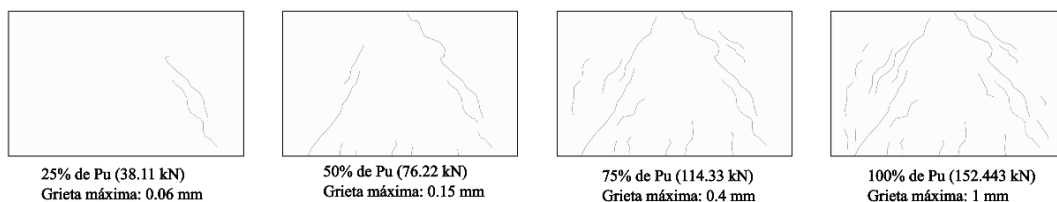
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 11 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 150.9 kN y una grieta máxima de 0.4 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 137.82 kN y una grieta máxima de 0.45 mm.

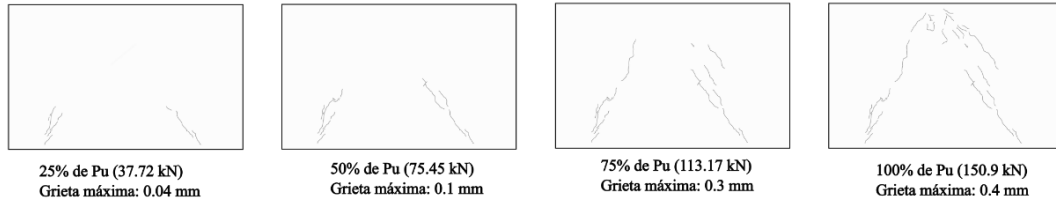
Ilustración 11

Patrones de agrietamiento en probetas M4-T8

MUESTRA M4-T8

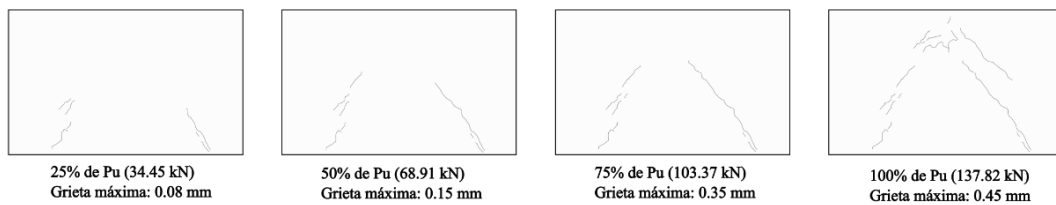
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 12 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 127.58 kN y una grieta máxima de 2.3 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 135.27 kN y una grieta máxima de 1.4 mm.

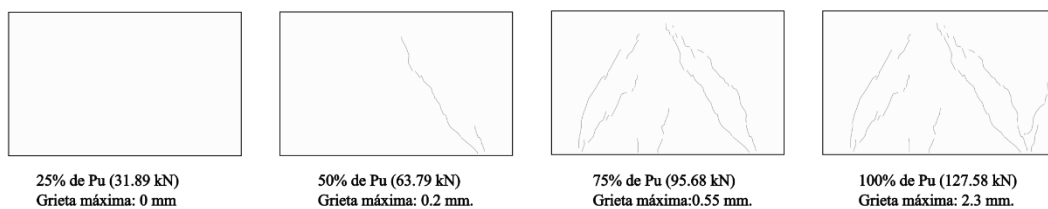
Ilustración 12

Patrones de agrietamiento en probetas M1-T5

MUESTRA M1-T5

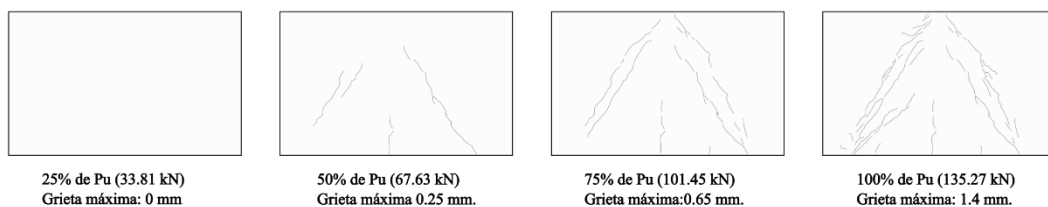
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 13 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 122.1 kN y una grieta máxima de 0.8 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 138.6 kN y una grieta máxima de 1 mm.

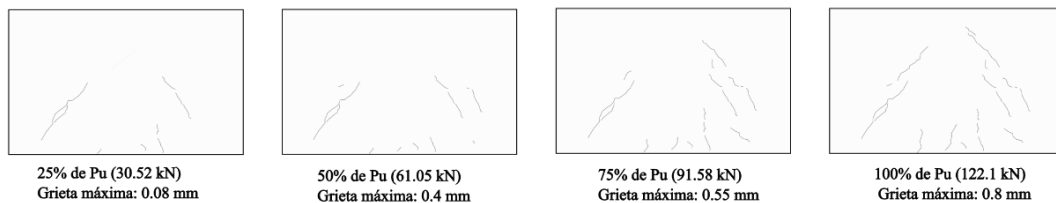
Ilustración 13

Patrones de agrietamiento en probetas M3-T8

MUESTRA M3-T8

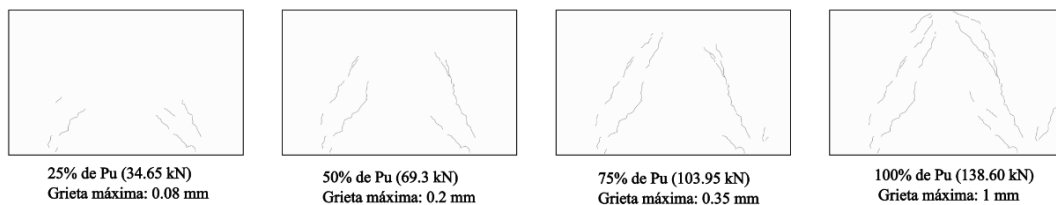
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 14 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 122.87 kN y una grieta máxima de 0.6 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 138.28 kN y una grieta máxima de 0.65 mm. Los dos especímenes fallaron por aplastamiento en el nodo 2.

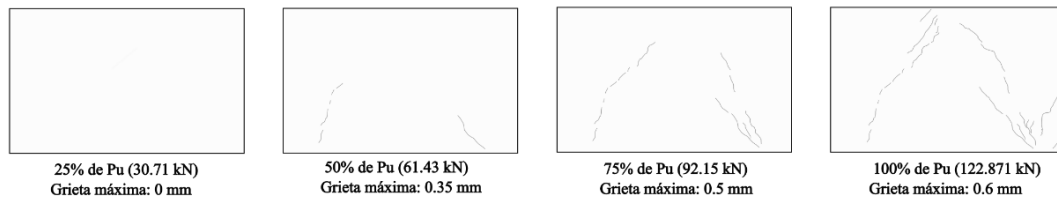
Ilustración 14

Patrones de agrietamiento en probetas M3-T5

MUESTRA M3-T5

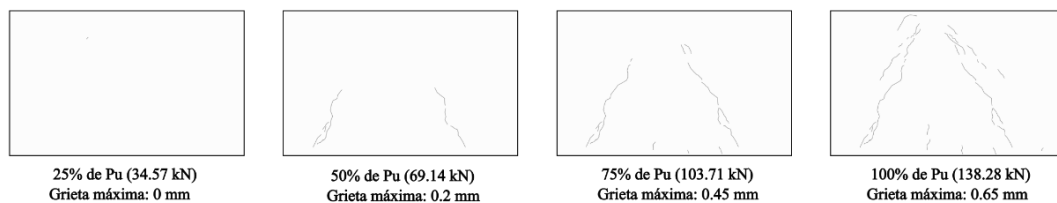
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 15 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 111.8 kN y una grieta máxima de 1.4 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 124.02 kN y una grieta máxima de 0.8 mm.

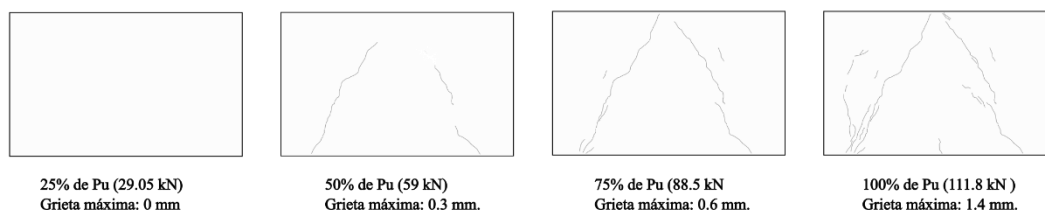
Ilustración 15

Patrones de agrietamiento en probetas M1-T8

MUESTRA M1-T8

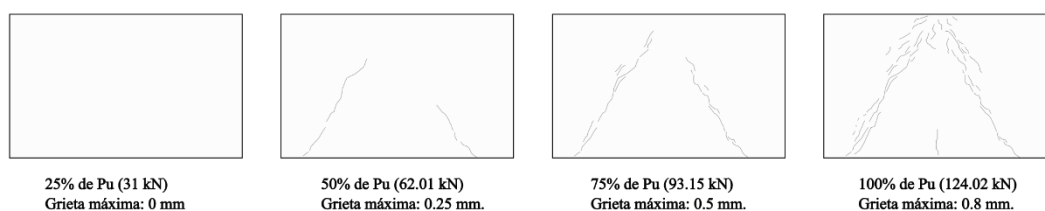
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 16 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 133.33 kN y una grieta máxima de 0.8 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 121.84kN y una grieta máxima de 0.8 mm.

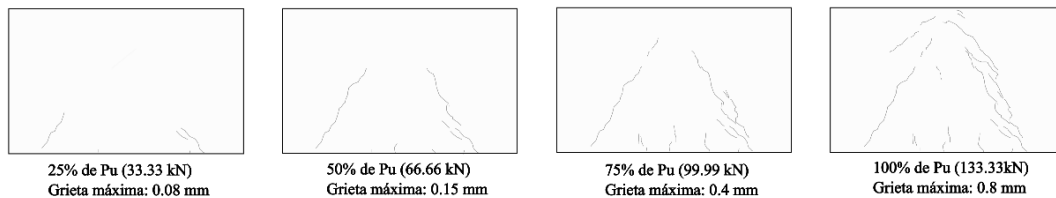
Ilustración 16

Patrones de agrietamiento en probetas M2-2T5

MUESTRA M2-2T5

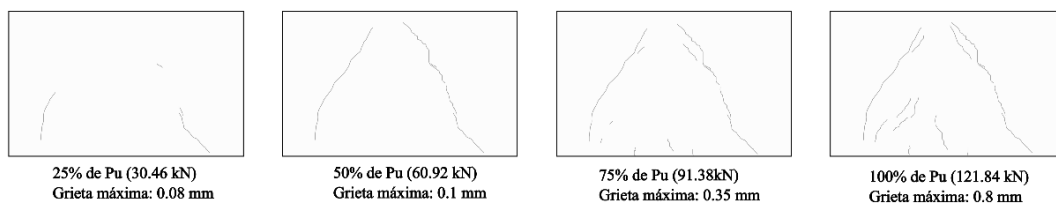
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 17 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 115.72 kN y una grieta máxima de 0.5 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 115.43 kN y una grieta máxima de 0.55 mm. Los dos especímenes fallaron por aplastamiento en el nodo 2.

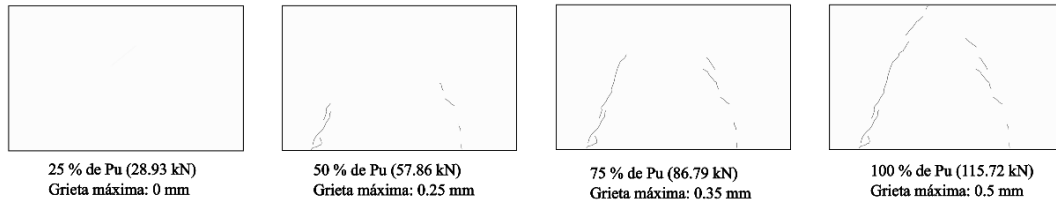
Ilustración 17

Patrones de agrietamiento en probetas M1- T6

MUESTRA M1-T6

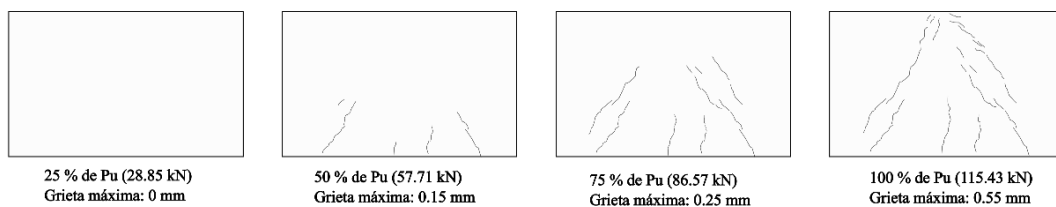
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia

La ilustración 18 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 131.17 kN y una grieta máxima de 1.6 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 120.81 kN y una grieta máxima de 1.8 mm.

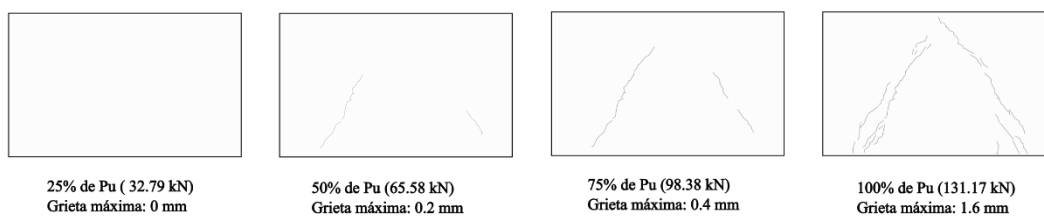
Ilustración 18

Patrones de agrietamiento en probetas M2- T6

MUESTRA M2-T6

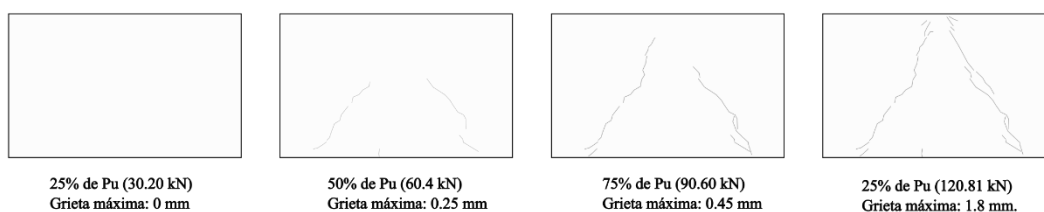
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 19 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 117.36 kN y una grieta máxima de 2.2 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 127.31kN y una grieta máxima de 1.1 mm.

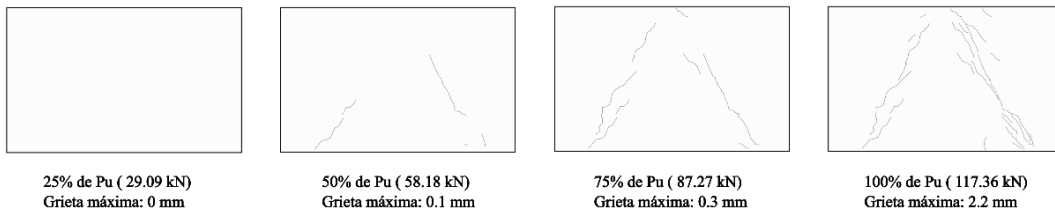
Ilustración 19

Patrones de agrietamiento en probetas M2- T10

MUESTRA M2-T10

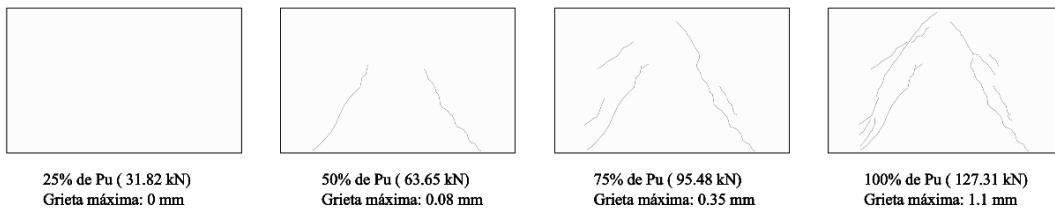
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 20 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 126.45 kN y una grieta máxima de 1.3 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 129.25kN y una grieta máxima de 1.3 mm.

Ilustración 20

Patrones de agrietamiento en probetas M3- T6

MUESTRA M3-T6

PROBETA 1

a)



25% de Pu (31.61 kN)
Grieta máxima: 0 mm



50% de Pu (63.22 kN)
Grieta máxima: 0.25 mm



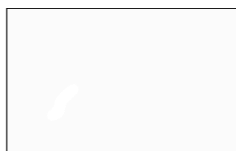
75% de Pu (94.84 kN)
Grieta máxima: 0.4 mm



100% de Pu (126.45 kN)
Grieta máxima: 1.3 mm

PROBETA 2

b)



25% de Pu (32.31 kN)
Grieta máxima: 0 mm



50% de Pu (64.62 kN)
Grieta máxima: 0.2 mm



75% de Pu (96.94 kN)
Grieta máxima: 0.35 mm



100% de Pu (129.25 kN)
Grieta máxima: 1.3 mm

Nota: Elaboración propia.

La ilustración 21 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 151.54 kN y una grieta máxima de 0.5 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 133.26 kN y una grieta máxima de 0.65 mm.

Ilustración 21

Patrones de agrietamiento en probetas M4- T6

MUESTRA M4-T6

PROBETA 1

a)



25% de Pu (37.88 kN)
Grieta máxima: 0 mm



50% de Pu (75.77 kN)
Grieta máxima: 0.08 mm



75% de Pu (113.65 kN)
Grieta máxima: 0.35 mm



100% de Pu (151.54 kN)
Grieta máxima: 0.5 mm

PROBETA 2

b)



25% de Pu (33.31 kN)
Grieta máxima: 0 mm



50% de Pu (66.63 kN)
Grieta máxima: 0.15 mm



75% de Pu (99.94 kN)
Grieta máxima: 0.4 mm



100% de Pu (133.26 kN)
Grieta máxima: 0.65 mm

Nota: Elaboración propia.

La ilustración 22 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 146.56 kN y una grieta máxima de 0.35 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 156.6kN y una grieta máxima de 0.4 mm.

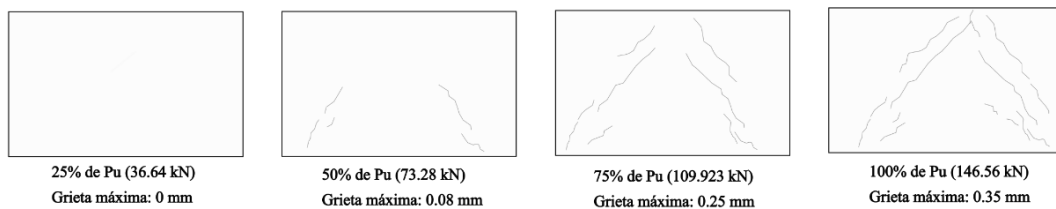
Ilustración 22

Patrones de agrietamiento en probetas M4- T10

MUESTRA M4-T10

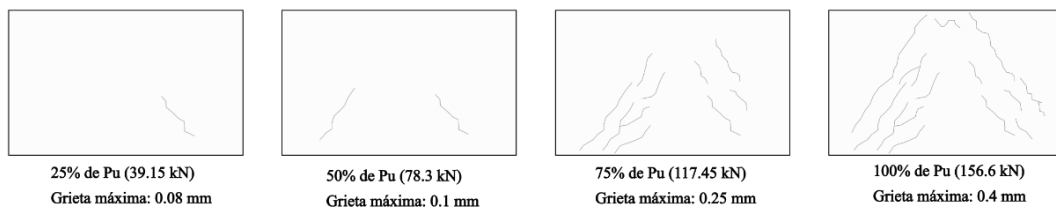
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 23 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 110.52 kN y una grieta máxima de 0.4 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 91.03 kN y una grieta máxima de 0.6 mm.

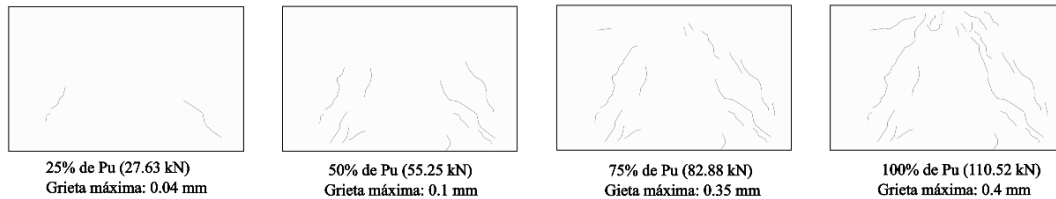
Ilustración 23

Patrones de agrietamiento en probetas M2- T5

MUESTRA M2T5

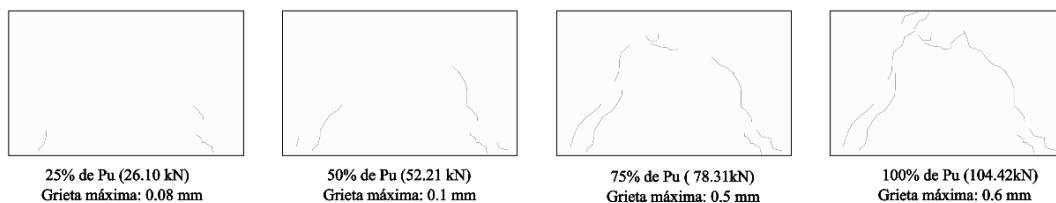
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 24 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 109 kN y una grieta máxima de 0.8 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 104.09 kN y una grieta máxima de 0.65 mm.

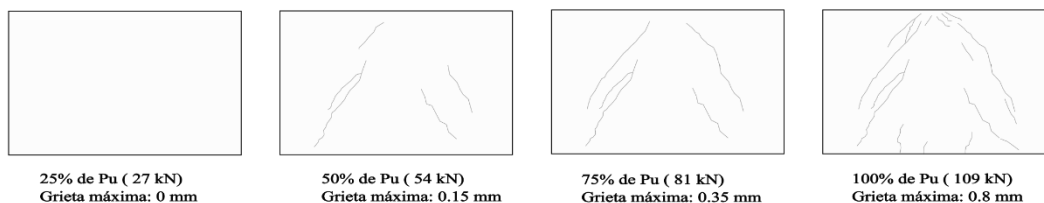
Ilustración 24

Patrones de agrietamiento en probetas M3- T10

MUESTRA M3-T10

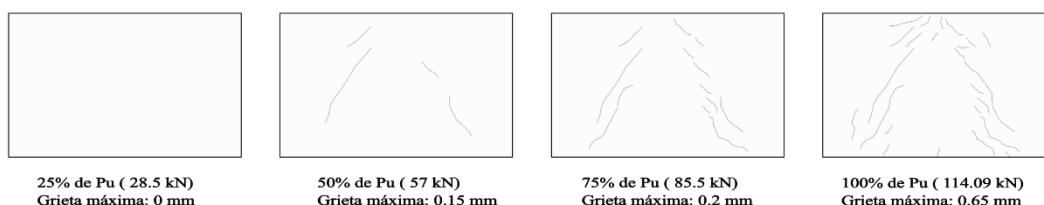
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 25 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 120.12 kN y una grieta máxima de 0.8 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 122.94 kN y una grieta máxima de 0.55 mm.

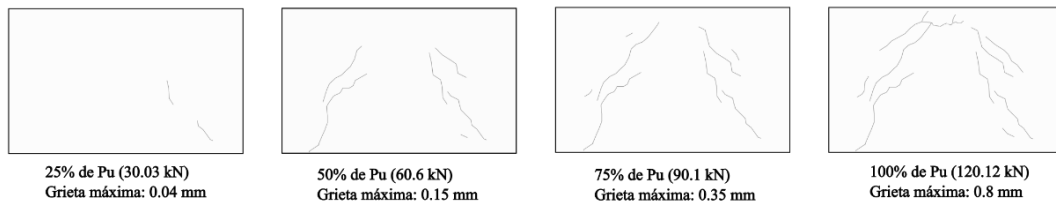
Ilustración 25

Patrones de agrietamiento en probetas M4- 2T5

MUESTRA M4-2T5

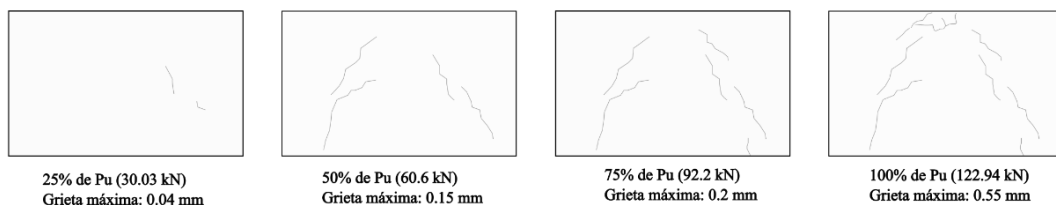
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 26 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 111.91 kN y una grieta máxima de 0.5 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 119.46kN y una grieta máxima de 0.6 mm.

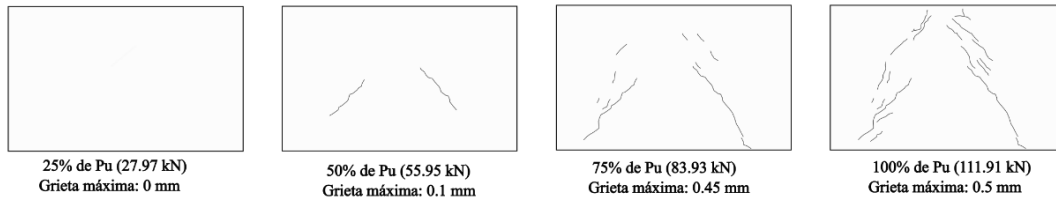
Ilustración 26

Patrones de agrietamiento en probetas M2- 2T10

MUESTRA M2-2T10

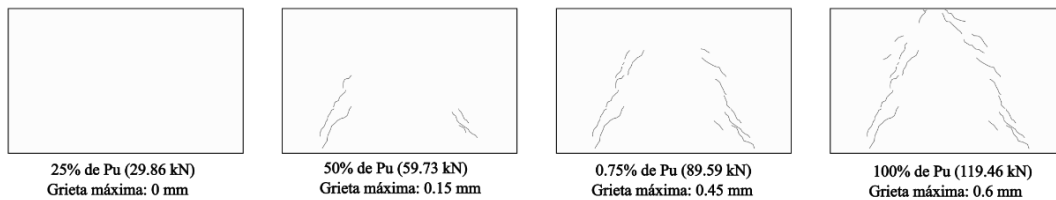
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 27 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 115 kN y una grieta máxima de 1.2 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 101.69 kN y una grieta máxima de 1.9 mm.

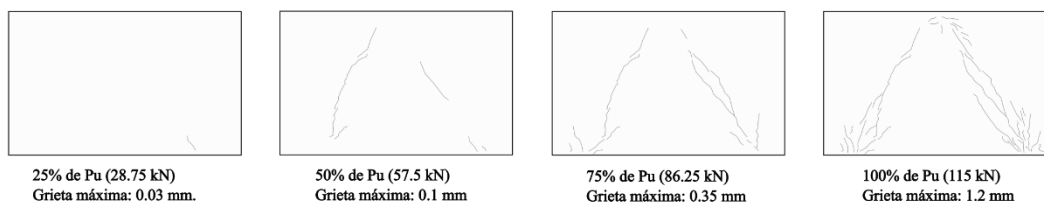
Ilustración 27

Patrones de agrietamiento en probetas M1-T10

MUESTRA M1-T10

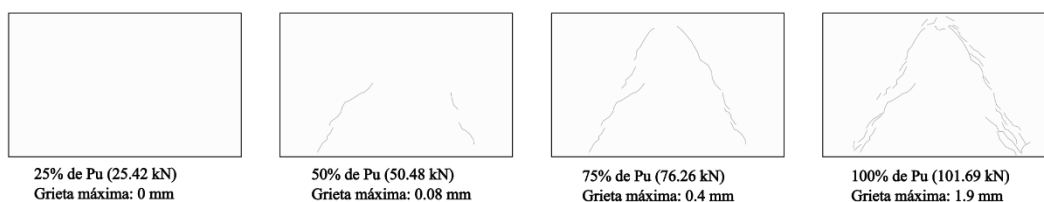
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

La ilustración 28 registra una carga máxima en el ensayo 1 de 113.98 kN y una grieta máxima de 0.45 mm, mientras que en el ensayo 2 se registra una carga máxima de 116.2kN y una grieta máxima de 0.5 mm. Los dos especímenes fallaron por aplastamiento en el nodo 2.

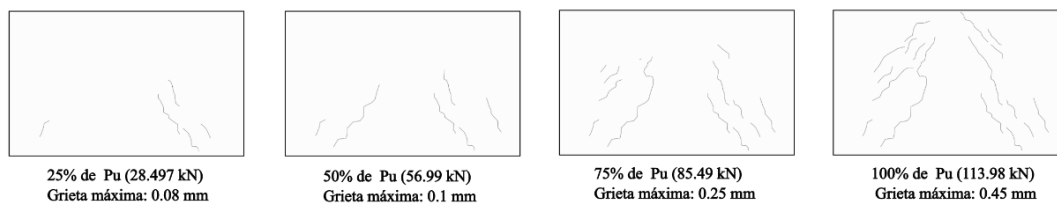
Ilustración 28

Patrones de agrietamiento en probetas M2-T10T5

MUESTRA M2-T10T5

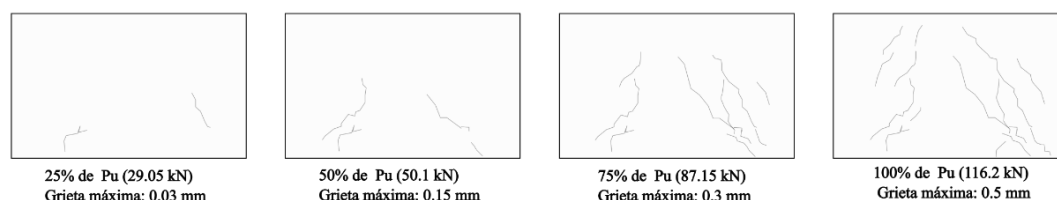
PROBETA 1

a)



PROBETA 2

b)



Nota: Elaboración propia.

Se registran fotografías recopiladas de cada ensayo realizado en la sección de anexos.

4.2. Relación Ancho Máximo De Grieta Vs Carga Aplicada

Las siguientes gráficas permiten evaluar el inicio del agrietamiento de las vigas y su progresión a medida que la carga puntual aumenta, lo que a su vez refleja el desempeño de las vigas altas a lo largo del ensayo. De igual

manera, se puede observar el ancho máximo de grieta antes del colapso de la estructura, un parámetro relevante que puede ser utilizado como indicador en el control de servicio y durabilidad.

Se evidenció cierta variación en los anchos máximos de grieta entre especímenes semejantes, lo que puede atribuirse a varios factores inherentes al proceso constructivo y a las propiedades del material:

Existen ligeras diferencias en la homogeneidad del concreto, ya sea por el proceso de varillado, compactación o fraguado, lo que influye en la resistencia y comportamiento del material durante el ensayo.

La redistribución de los esfuerzos internos de las vigas es similar, pero no idéntica, lo que genera pequeñas variaciones en los anchos de grieta observados.

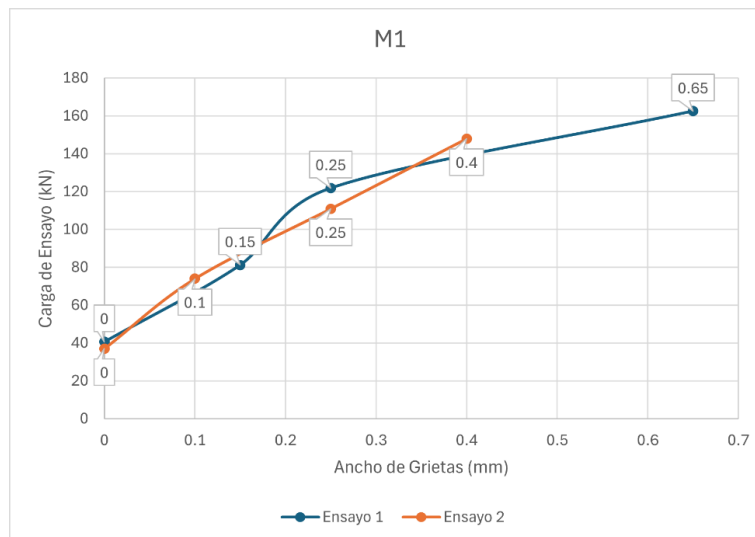
Durante el proceso de construcción, pueden ocurrir pequeñas imperfecciones en la alineación de las armaduras, así como ligeras variaciones en las distancias entre las placas y los apoyos de la máquina universal de ensayos, lo que contribuye a la discrepancia en los anchos máximos de grieta entre los especímenes.

El valor máximo del ancho de grieta en el punto de falla durante el ensayo fue registrado en el modelo M1-T5 (ensayo 1), presentando un ancho de grieta de 2.3 mm bajo una carga de 127.58 kN. Este modelo exhibe una cuantía de 0.015. En contraste, el modelo que mostró un ancho de grieta mínimo en el colapso fue el M4-T10 (ensayo 1), con un ancho de grieta de 0.35 mm, y una cuantía correspondiente de 0.042. Adicionalmente, el ancho de grieta más frecuente observado fue de 0.8 mm, el cual se presentó en el 15% de las probetas

ensayadas. Por otro lado, el valor menos común registrado fue 0.35 mm, que se evidenció únicamente en una viga específica (M4-T10).

Gráfica 1

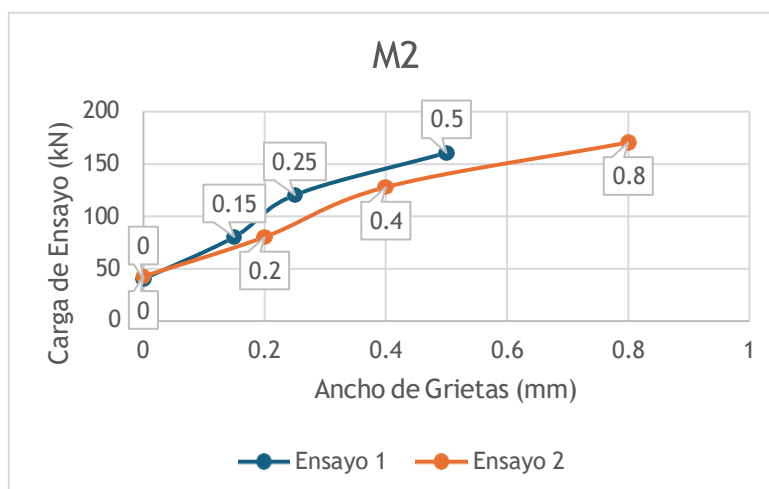
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M1



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 2

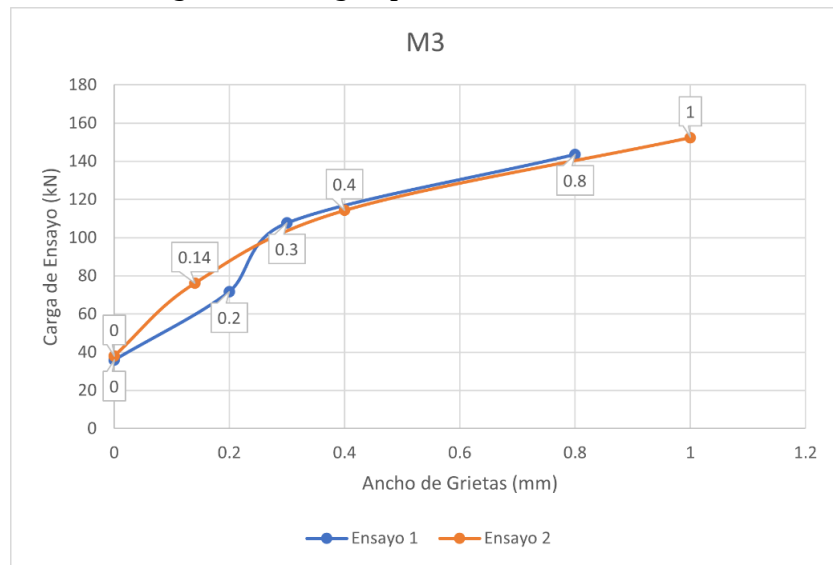
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 3

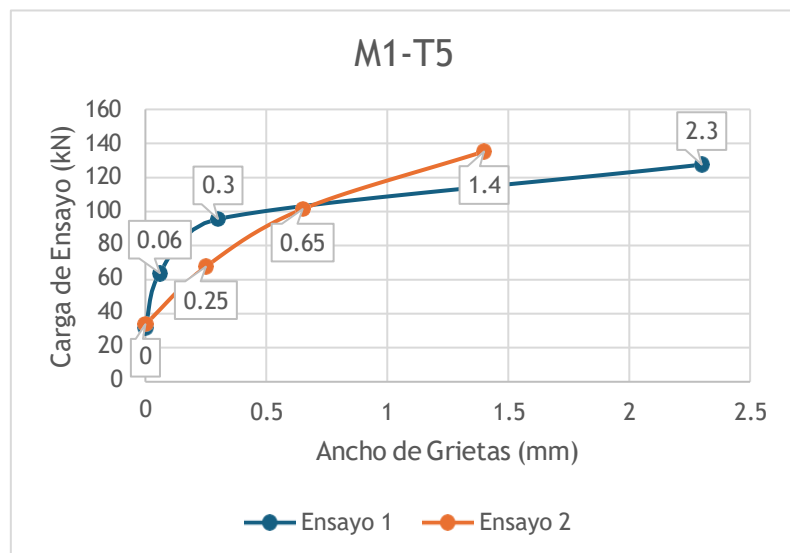
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M3



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 4

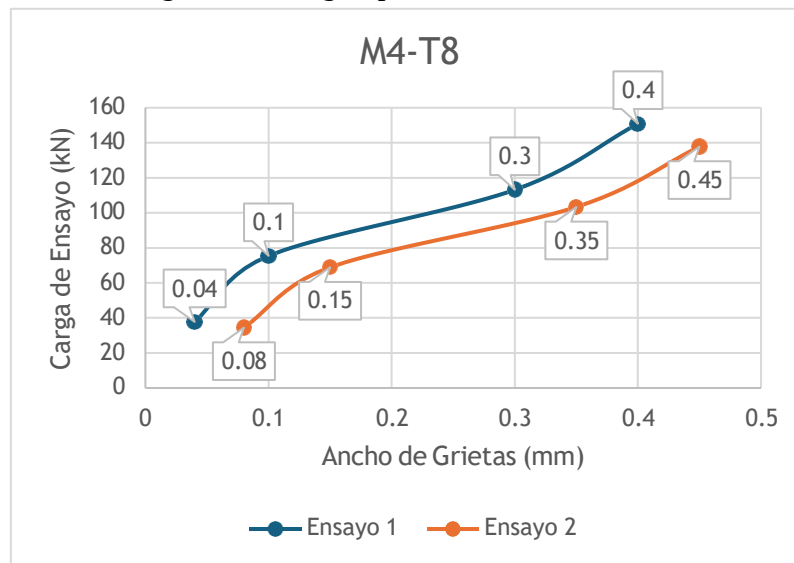
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M1-T5



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 5

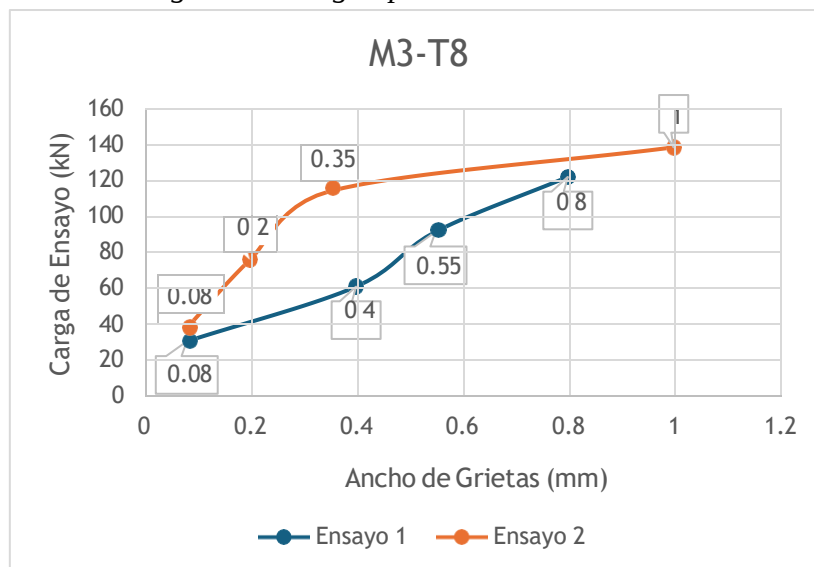
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M4-T8



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 6

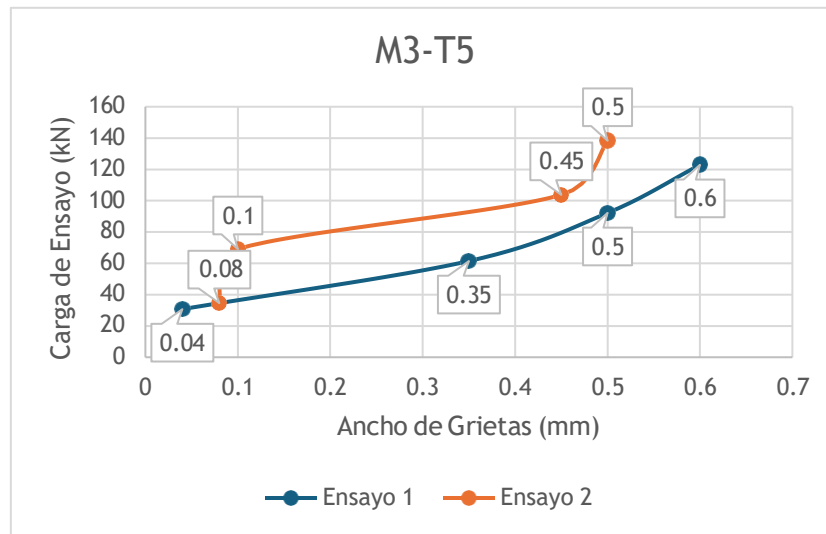
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M3-T8



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 7

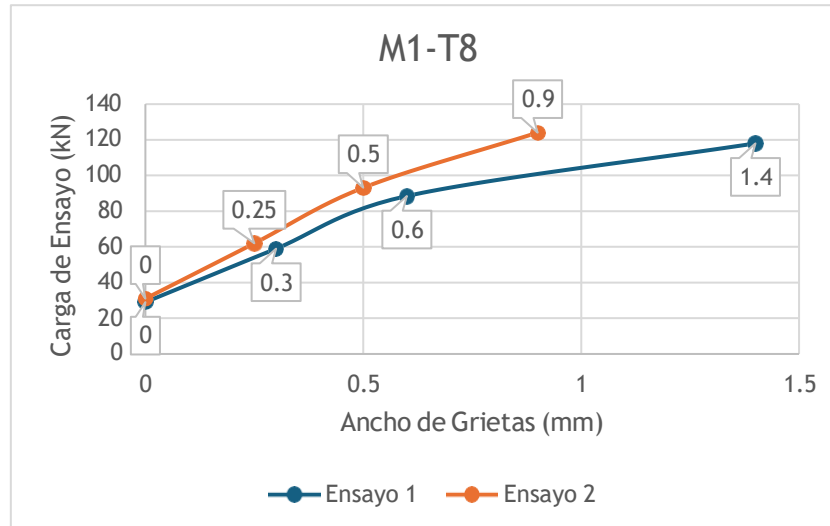
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M3-T5



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 8

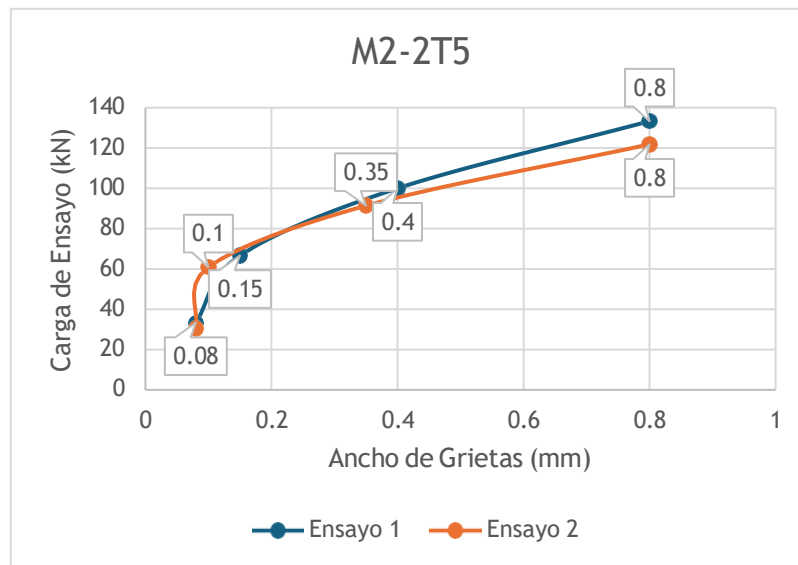
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M1-T8



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 9

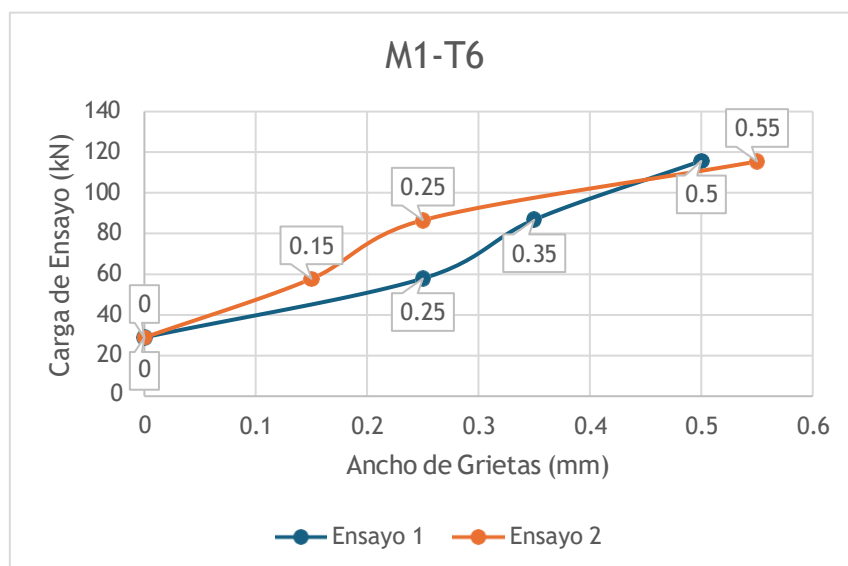
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2-T5



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 10

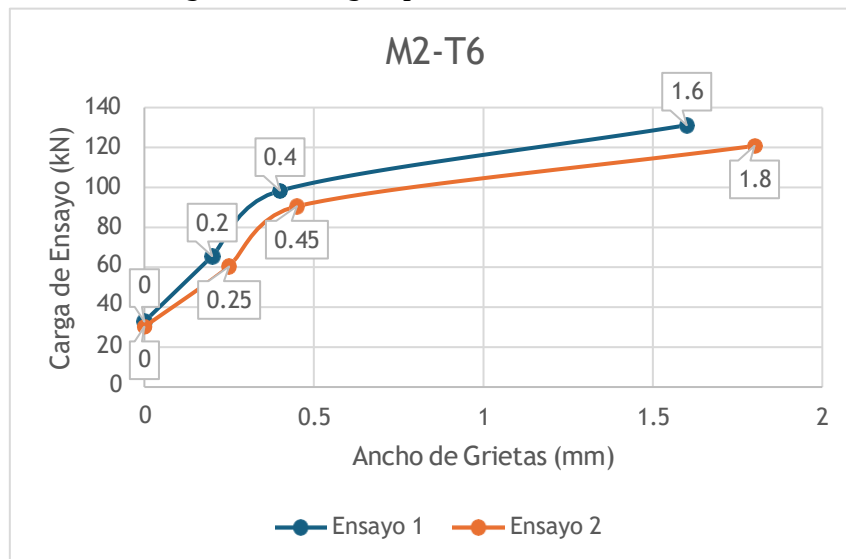
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2-T5



Nota: Elaboración propia

Gráfica 11

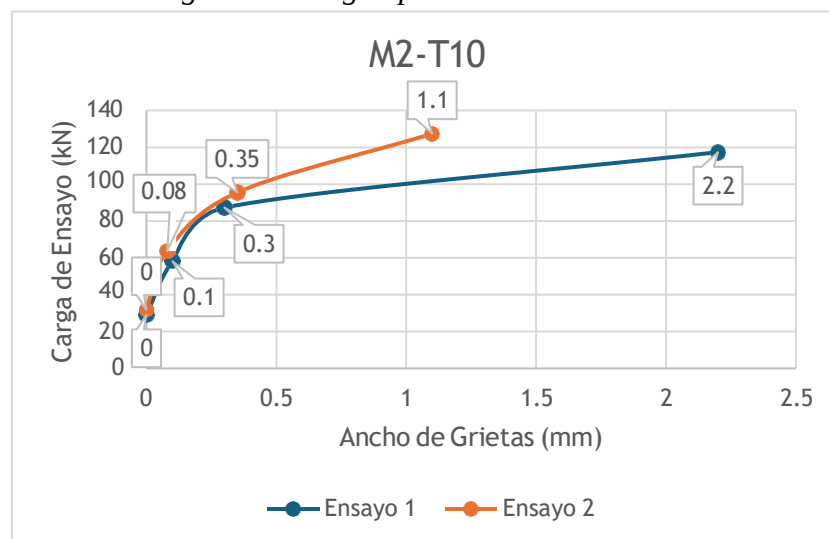
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2-T6



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 12

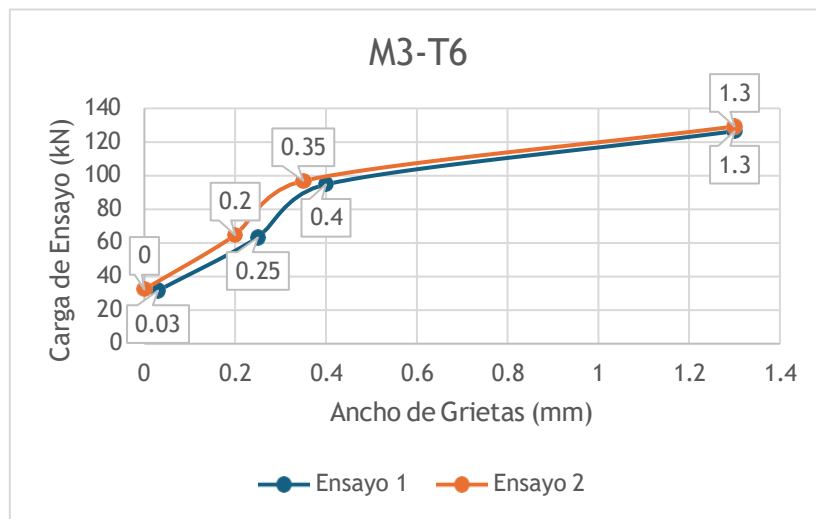
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2-T10



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 13

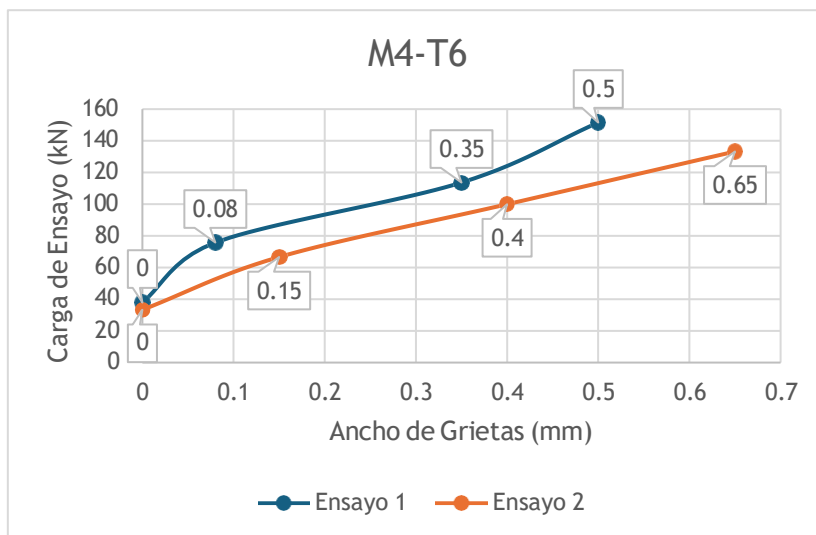
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M3-T6



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 14

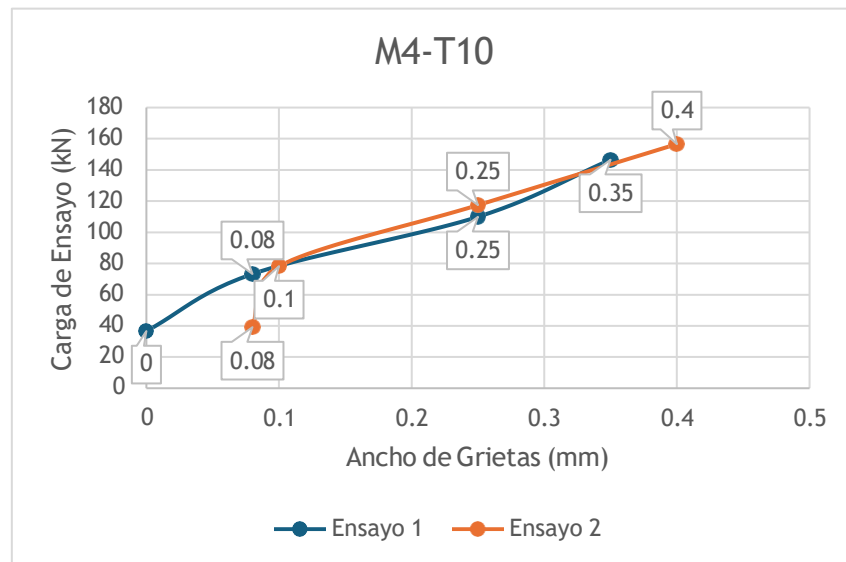
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M4-T6



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 15

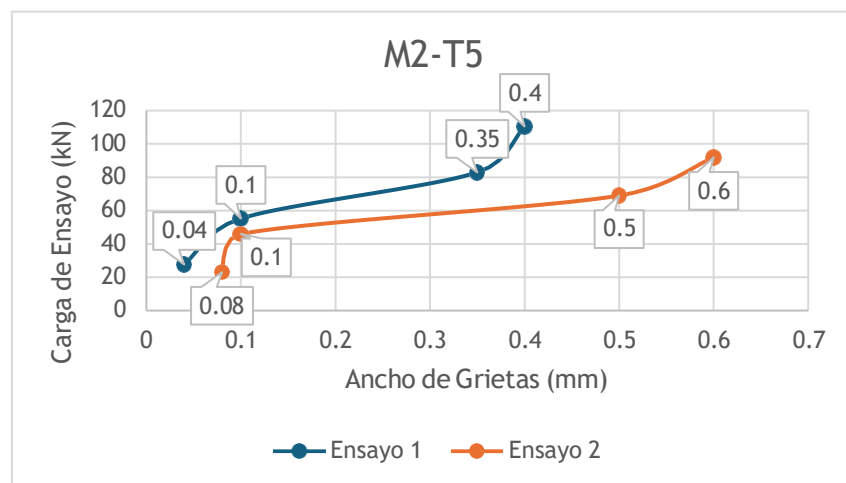
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M4-T10



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 16

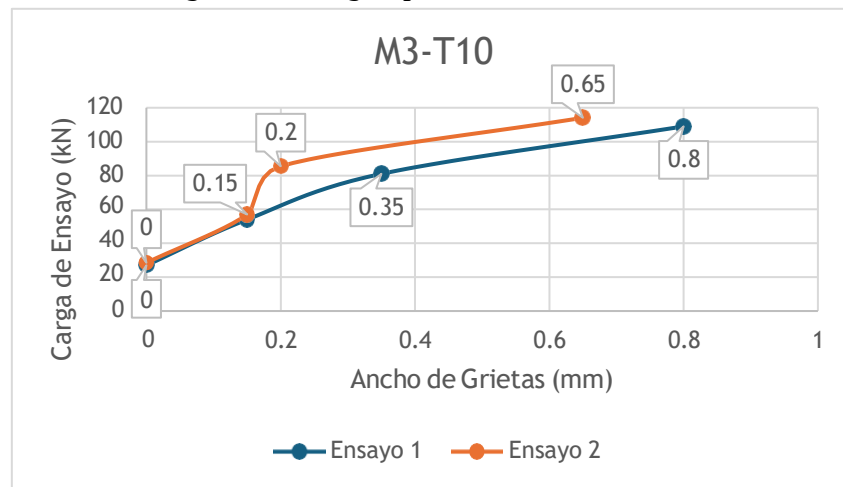
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2-T5



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 17

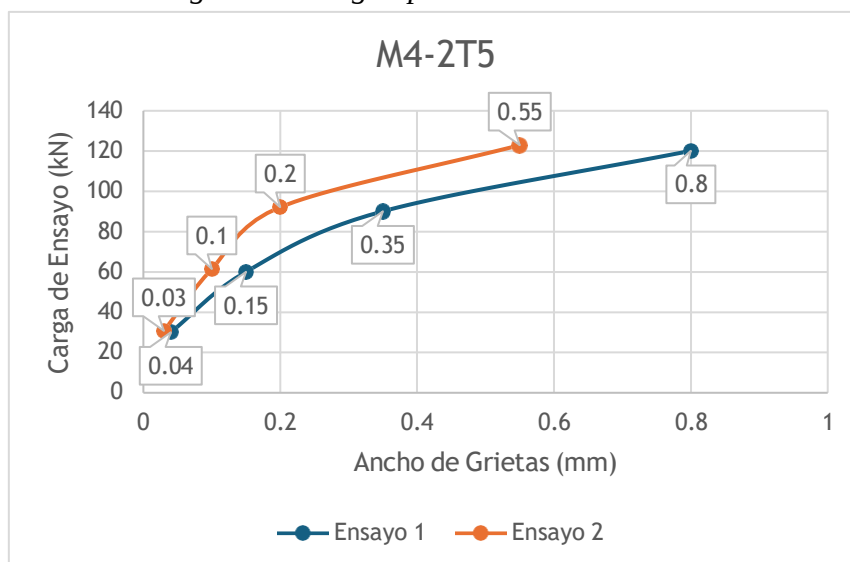
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M3-T10



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 18

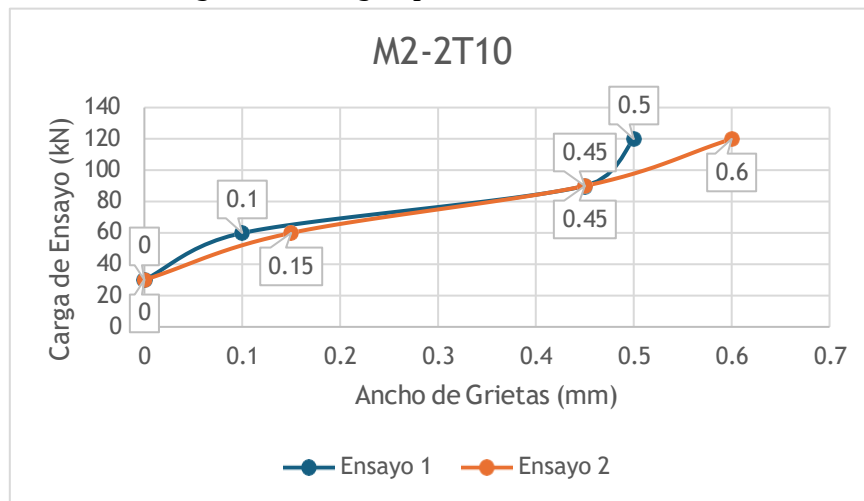
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M4-2T5



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 19

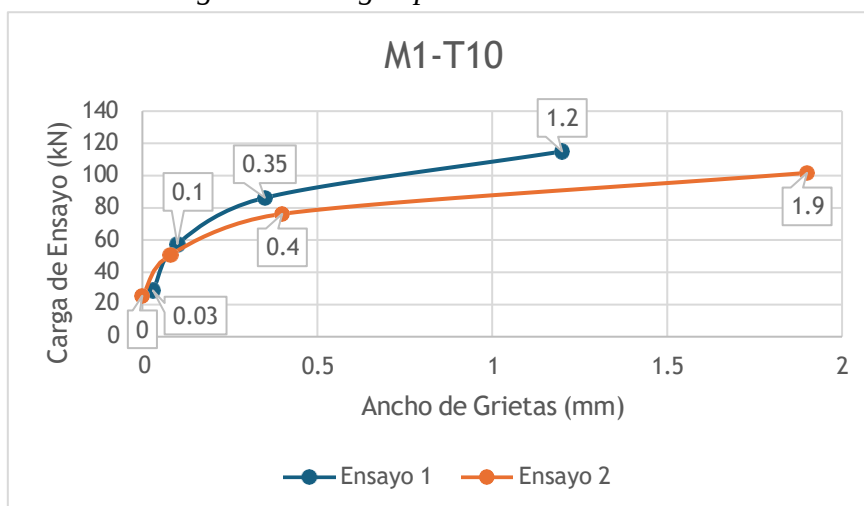
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2-2T10



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 20

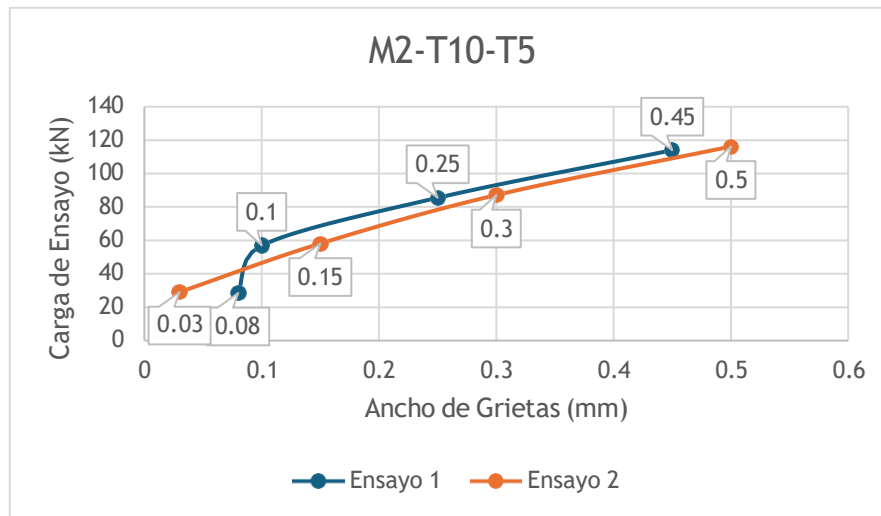
Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M1-T10



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 21

Relación ancho máximo de grieta vs carga aplicada M2-T10-T5



Nota: Elaboración propia.

4.2. Relación fuerza-deformación bajo condiciones de ensayo.

A partir de los ensayos realizados, en la tabla 10 se presentan los resultados experimentales de las vigas altas evaluadas. En este análisis, se detallan la carga última y la deformación máxima alcanzada por cada modelo hasta el momento de su falla.

Las gráficas generadas a partir de los ensayos permiten una evaluación exhaustiva del comportamiento estructural de las vigas altas bajo la aplicación de una carga monótona. Esto se traduce en una representación clara de la curva que relaciona la fuerza con la deformación para cada modelo, facilitando así la comparación entre ellos.

La carga última es un indicador crítico, ya que revela el límite máximo que puede soportar cada viga antes de fallar. Por otro lado, la deformación máxima proporciona información sobre la elasticidad y ductilidad del material utilizado en cada modelo.

Al realizar las pruebas en los pares de modelos constructivamente idénticos, se encontró que el 76 % de las vigas altas exhiben un error absoluto que es menor o igual a 15 kN. En contraste, el 24 % de las vigas analizadas presentan un error absoluto que supera los 15 kN, pero que se mantiene dentro del rango de 19.8 kN.

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 8, se observa que las deformaciones máximas de las vigas altas analizadas oscilan entre 2.99 mm y 5.87 mm en su punto de falla. Tomando en cuenta este rango de deformaciones se puede observar cómo están actuando las vigas al ser sometidas a una carga monótona.

Tabla 10

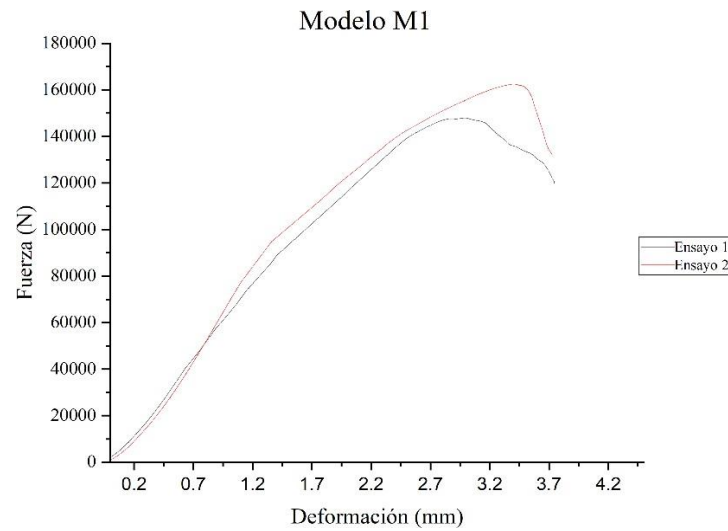
Tabla de registro de carga última y deformación máxima en el punto de falla

MODELO	REGISTRO DE CARGA ÚLTIMA Y DEFORMACIÓN MÁXIMA				
	Ensayo 1		Ensayo 2		ERROR
	Pu	DEF. MAX.	Pu	DEF. MAX.	Pu
	kN	mm	kN	mm	kN
M1	147.90	2.99	162.46	3.32	14.56
M2	160.65	4.30	170.55	4.04	9.89
M3	152.44	4.88	143.65	4.16	8.79
M1-T5	127.58	4.63	135.28	4.55	7.70
M4-T8	150.91	3.49	137.82	4.86	13.09
M3-T8	122.11	4.99	138.60	4.12	16.50
M3-T5	122.87	4.28	138.28	4.12	15.41
M1-T8	118.00	3.77	137.81	4.63	19.81
M2-2T5	133.33	3.76	121.84	4.64	11.49
M1-T6	115.73	4.66	115.43	4.93	0.29
M2-T6	131.18	4.76	120.81	4.07	10.37
M2-T10	127.31	4.15	117.36	4.63	9.95
M3-T6	126.46	3.94	129.26	4.49	2.80
M4-T6	151.55	3.96	133.27	4.02	18.28
M4-T10	146.56	3.94	156.61	4.94	10.04
M2-T5	110.52	5.19	91.43	4.67	19.08
M3-T10	114.09	5.27	109.08	4.57	5.01
M4-2T5	120.12	5.77	122.94	5.86	2.82
M2-2T10	119.46	5.23	111.91	4.75	7.55
M1-T10	101.69	4.65	115.01	5.87	13.32

M2-T10T5	116.20	5.23	113.99	3.92	2.21
-----------------	--------	------	--------	------	------

Gráfica 22

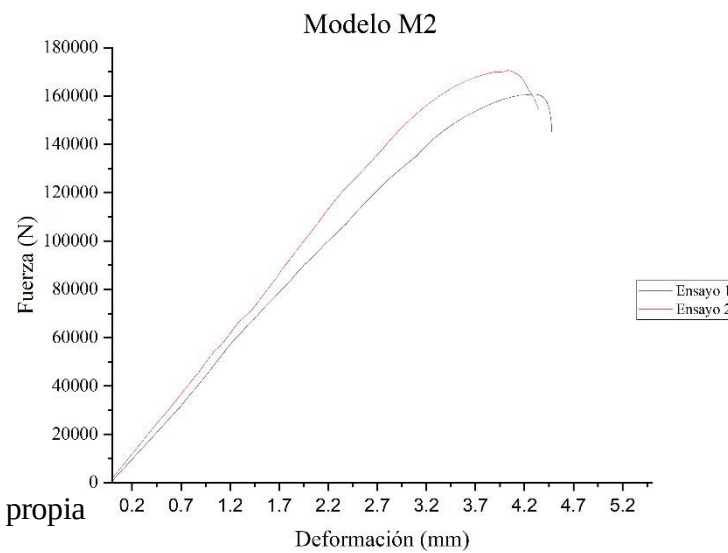
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M1 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 23

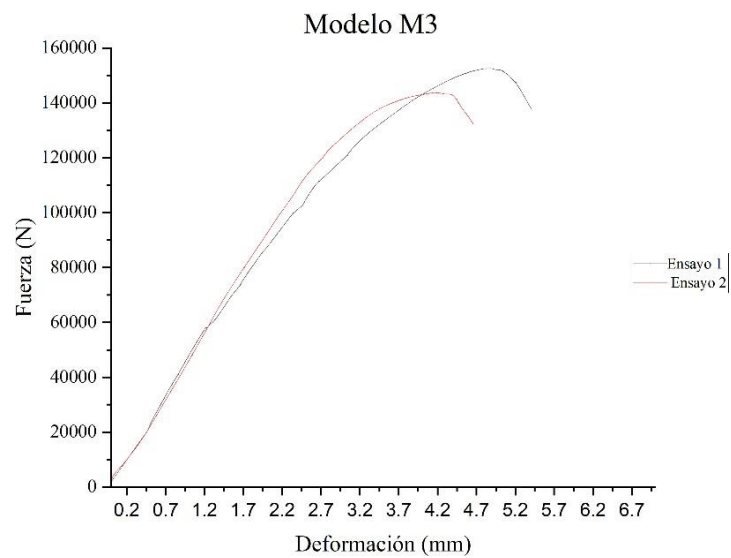
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 24

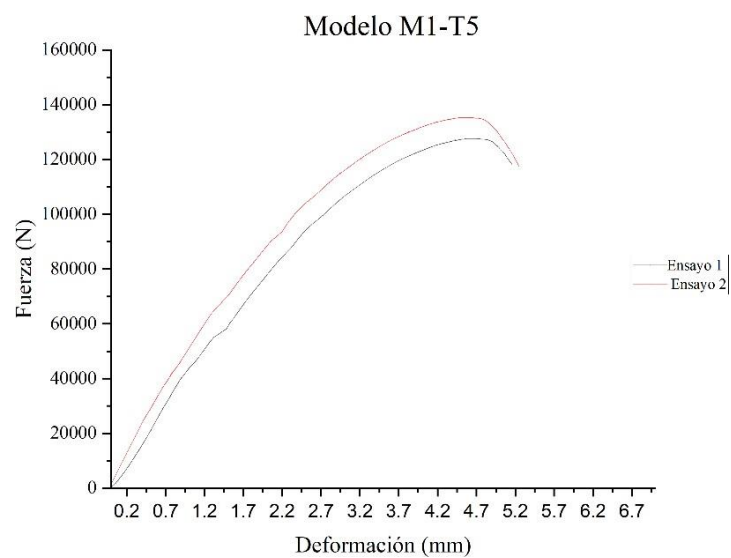
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M3 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 25

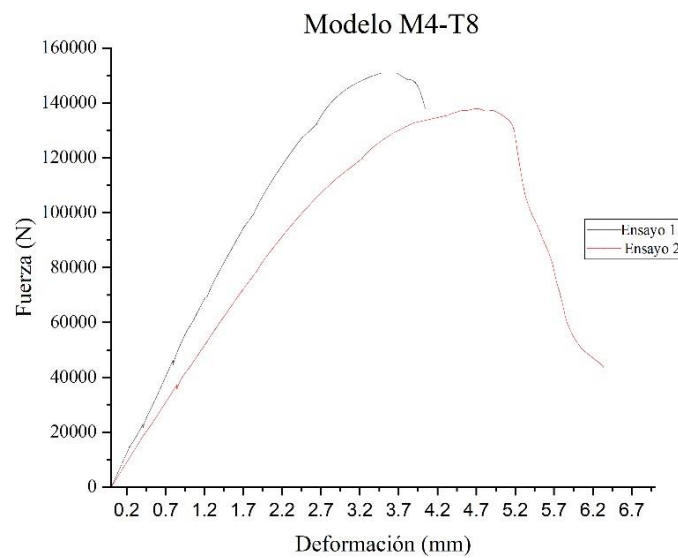
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M1-T5 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 26

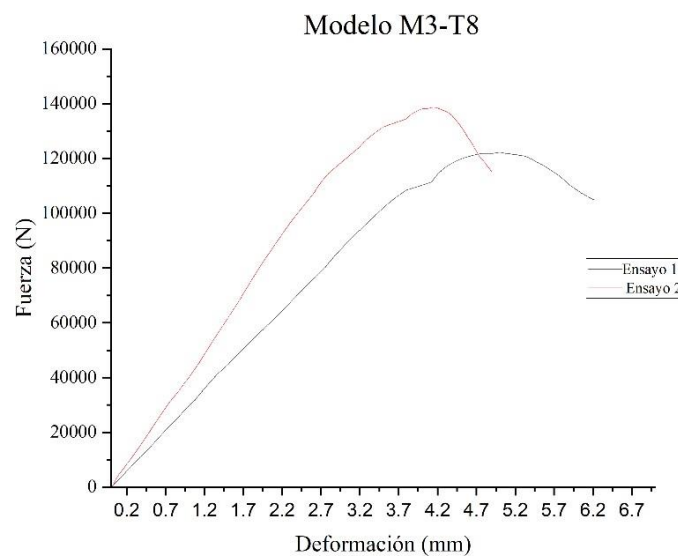
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M4-T8 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 27

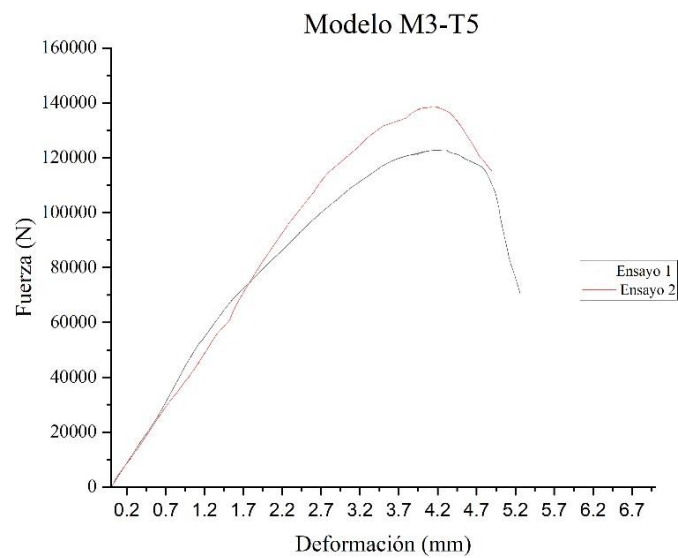
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M3-T8 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 28

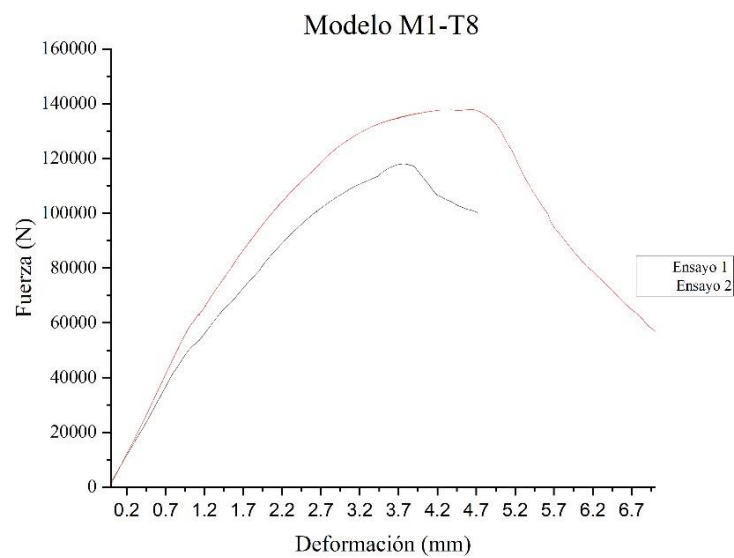
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M3-T5 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 29

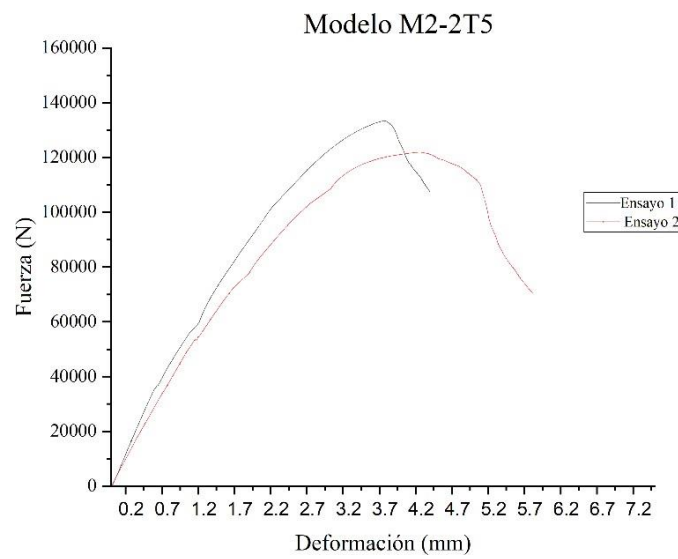
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M1-T8 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 30

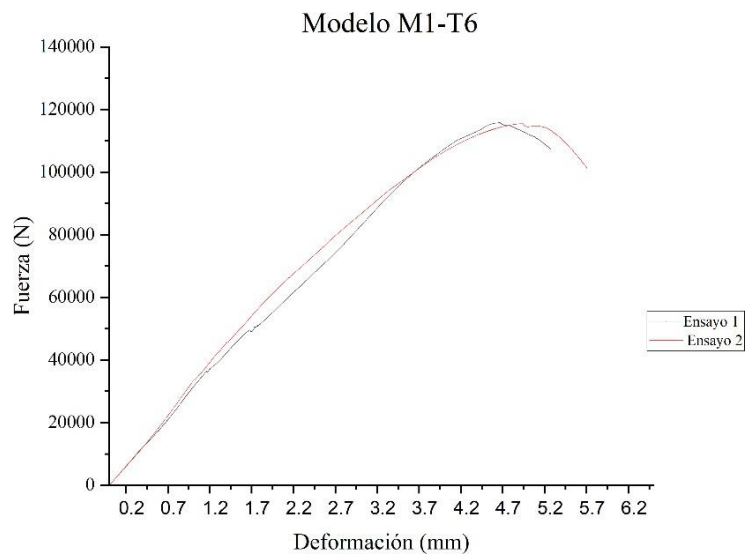
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-2T5 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 31

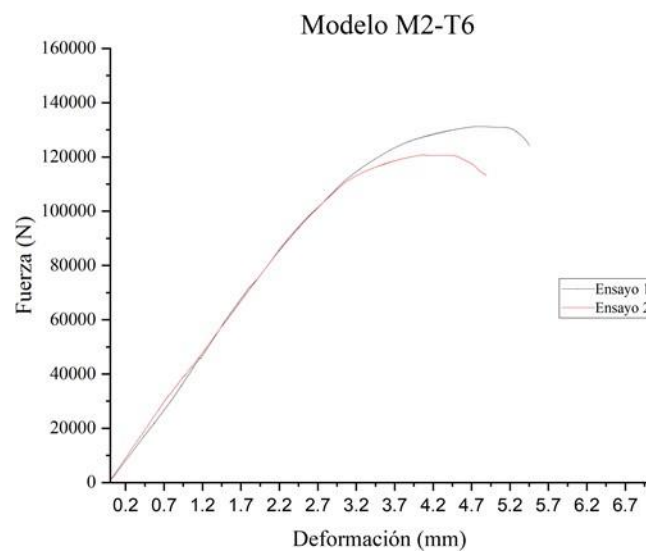
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M1-T6 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 32

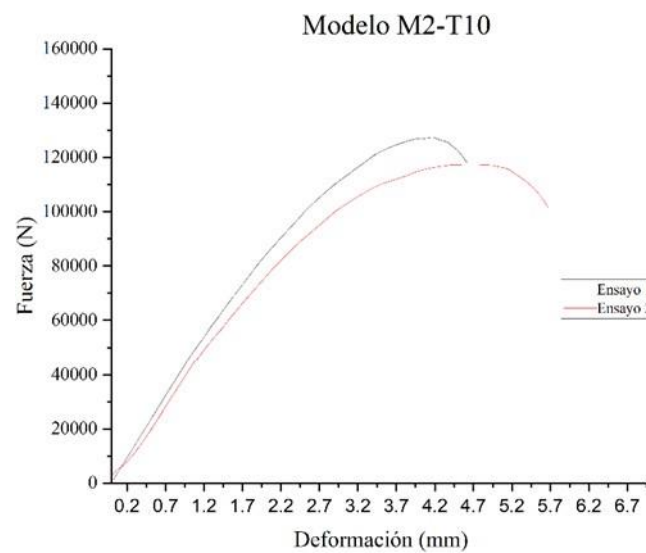
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-T6 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 33

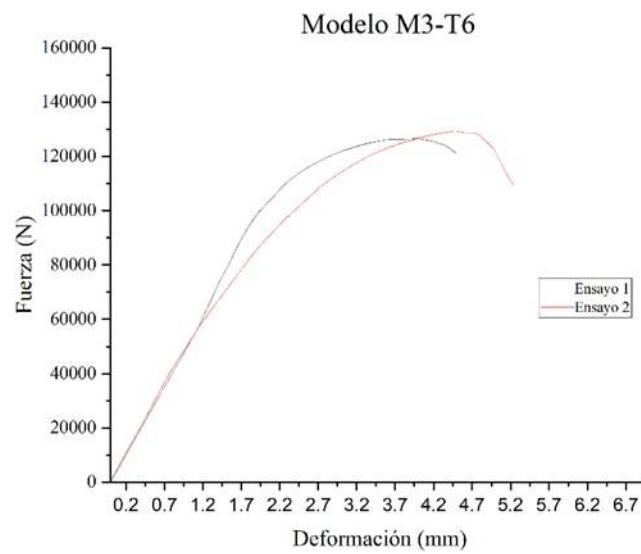
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-T10 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 34

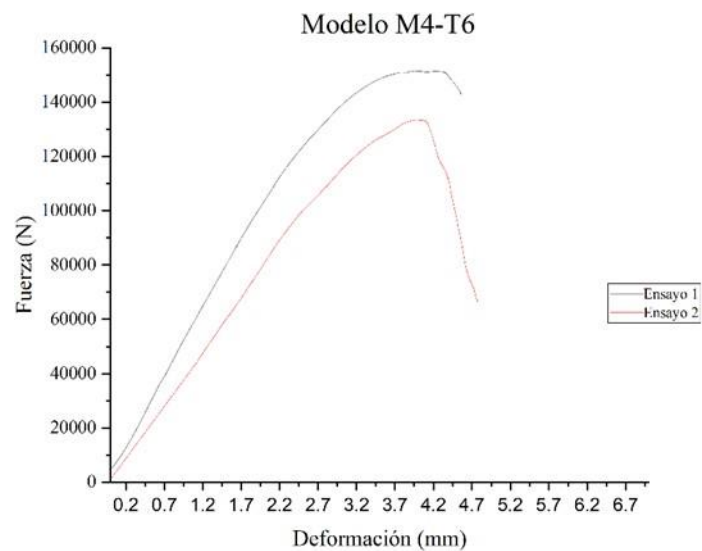
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M3-T6 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 35

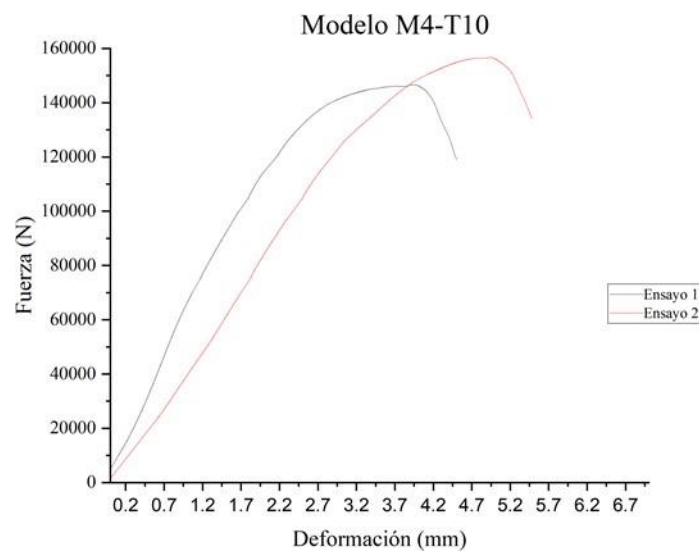
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M4-T6 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 36

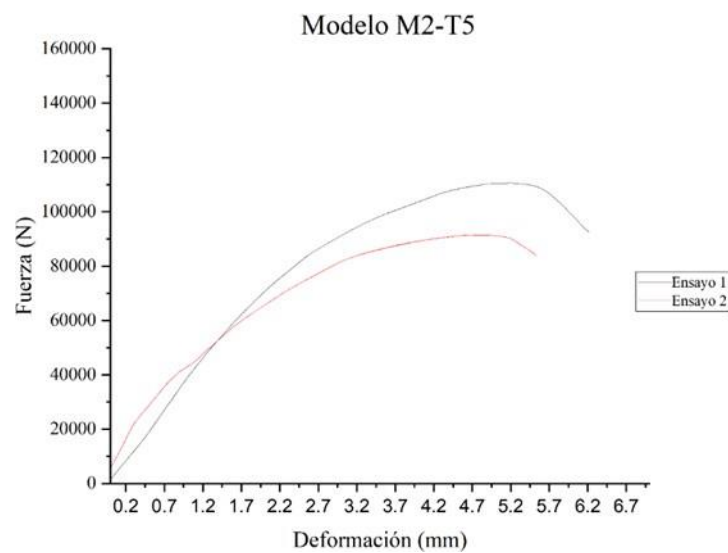
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M4-T10 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 37

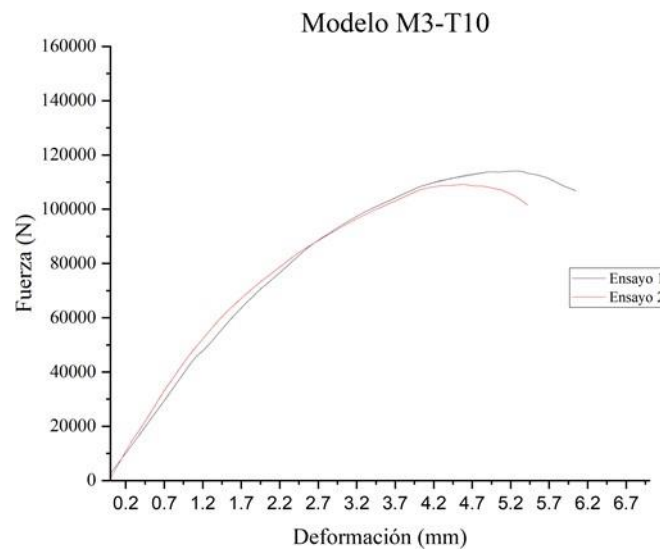
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-T5 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 38

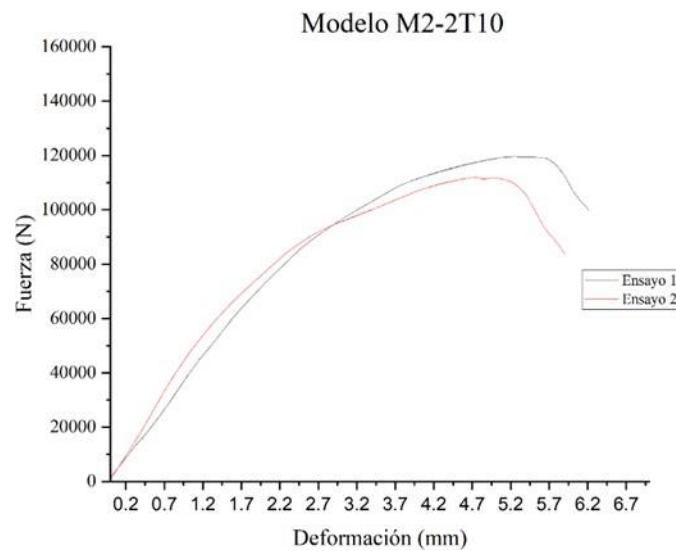
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M3-T10 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 39

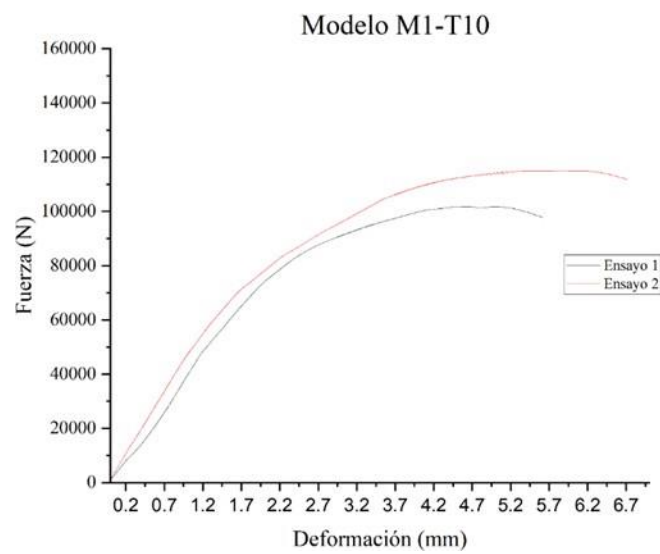
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-2T10 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 40

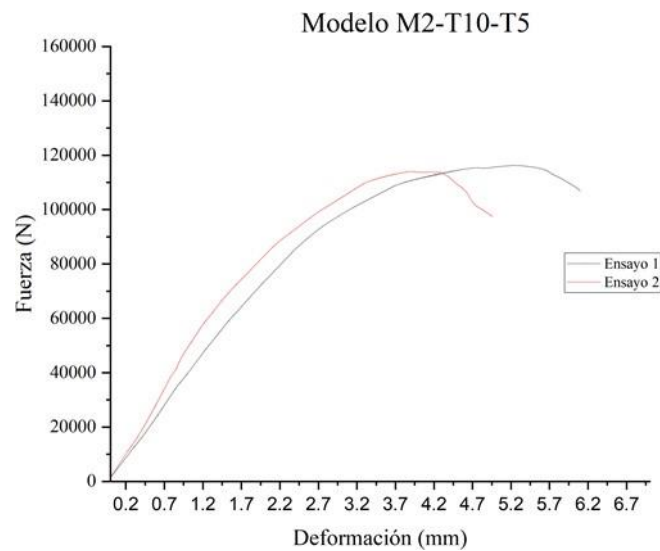
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M1-T10 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 41

Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-T10-T5 ensayadas



Nota: Elaboración propia

4.3. Estimación De Carga Máxima

4.3.1. Estimación De Carga Máxima Según El Modelo 1

En la tabla 11 y tabla 13 se presenta las cargas máximas de cada elemento (puntales, y nodos) determinadas en función de la normativa ACI. Se realizaron dos análisis similares tomando en cuenta el ensayo 1 y 2 y la tabla 9 que representa los anchos de los puntales en cada modelo divididos de igual manera por cada ensayo realizado

El cálculo de F_{p1} y F_{p2} se llevó a cabo considerando los anchos de los puntales, previamente medidos y documentados en la tabla 9.

Para calcular la fuerza máxima de cada puntal (F_{ns}) se determina mediante la multiplicación del factor f_{ce} (según la ecuación 2) por el área transversal del puntal.

El área transversal del puntal viene dada por la multiplicación del ancho del puntal por el espesor de la viga (60 mm).

Para el parámetro B_c , según el ACI 318-19 se selecciona el menor valor entre 2 y $\sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$, siendo A_1 el área de aplastamiento y A_2 el área de la base

inferior de la pirámide formada con pendiente 1:2, dando como resultado un valor de “2” debido a que los puntales son de gran altura al realizar el análisis respecto al área 1, esta es muy pequeña en comparación al área 2.

Los puntales utilizados en este modelo son clasificados como puntales de borde, lo que implica que el valor de B_s sea igual a 1, conforme a la tabla 1.

En cuanto al valor de f'_c , los modelos M1, M2 y M3 presentan una resistencia a la compresión de 34 MPa, mientras que los demás modelos tienen un valor de f'_c de 24 MPa.

Para realizar el análisis de cada nodo se toma en cuenta que los nodos 1 y 3 (ver Ilustración 6) están conformados por un puntal y un tensor, por lo que el valor de B_n según la tabla 2 del ACI, es de 0.8.

Para el caso del nodo 2 que está conformado por dos puntales, su coeficiente B_n según la tabla 2 del ACI es de 1.

Para cumplir con lo establecido en el ACI se debe satisfacer la ecuación (5) de tal modo que se verifique su aplastamiento en función de la carga P_{ACI} .

El cálculo del P_{ACI} para cada elemento se realiza después de un análisis estático en la estructura, donde se debe definir el valor de la fuerza en los apoyos (ecuación 8), el proceso está explicado en el capítulo 3.4.

Tomando en cuenta que el valor de la fuerza del puntal (F_p) es igual a F_{ns} y la fuerza del tensor (T) es igual a F_{nt} se obtiene las siguientes ecuaciones para determinar los valores de carga máxima teórica (P_{ACI}) en función de estos elementos, tomar en cuenta que se debe contemplar el análisis de los nodos en cada cara de aplastamiento.

$$P_{ACI} = F_{p1} * 2 * \text{sen}(\alpha)$$

$$P_{ACI} = F_{p2} * 2 * \text{sen}(\alpha)$$

$$P_{ACI} = T * 2 * \tan(\alpha)$$

Dentro de la tabla 12 y tabla 14 se exponen los resultados obtenidos de los valores de carga máxima teórica calculados en función de las ecuaciones y en base a los ensayos 1 y 2 respectivamente para cada elemento del Modelo 1 .

Tabla 11

Tabla de cargas máximas calculadas para puntales, tensores y nodos del modelo 1- Ensayo 1

MODELO	ELEMENTOS DEL MODELO 1									
	Fp1	Fp2	T	Pn11	Pn12	Pn21	Pn22	Pn23	Pn31	Pn32
	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN
M1	137.041	107.421	13.854	146.18	131.78	182.72	138.72	143.23	114.58	131.78
M2	120.874	93.542	18.857	128.93	131.78	161.16	138.72	124.72	99.78	131.78
M3	107.421	117.305	24.630	114.58	131.78	143.23	138.72	156.41	125.13	131.78
M1-T5	98.637	84.236	23.476	105.21	93.02	131.52	97.92	112.31	89.85	93.02
M4-T8	61.873	76.561	63.115	66.00	93.02	82.50	97.92	102.08	81.67	93.02
M3-T8	71.420	75.827	49.260	76.18	93.02	95.23	97.92	101.10	80.88	93.02
M3-T5	71.604	81.518	34.251	76.38	93.02	95.47	97.92	108.69	86.95	93.02
M1-T8	82.436	79.073	38.485	87.93	93.02	109.92	97.92	105.43	84.34	93.02
M2-2T5	79.866	69.584	38.100	85.19	93.02	106.49	97.92	92.78	74.22	93.02
M1-T6	80.050	88.312	27.709	85.39	93.02	106.73	97.92	117.75	94.20	93.02
M2-T6	83.149	72.008	32.712	88.69	93.02	110.87	97.92	96.01	76.81	93.02
M2-T10	77.442	104.344	57.342	82.61	93.02	103.26	97.92	139.12	111.30	93.02
M3-T6	69.584	92.388	38.485	74.22	93.02	92.78	97.92	123.18	98.55	93.02
M4-T6	75.092	69.401	52.339	80.10	93.02	100.12	97.92	92.53	74.03	93.02
M4-T10	88.128	91.800	76.969	94.00	93.02	117.50	97.92	122.40	97.92	93.02
M2-T5	76.194	65.178	28.479	81.27	93.02	101.59	97.92	86.90	69.52	93.02
M3-T10	86.410	75.540	63.115	92.17	93.02	115.21	97.92	100.72	80.58	93.02
M4-2T5	68.666	76.561	57.727	73.24	93.02	91.56	97.92	102.08	81.67	93.02
M2-2T10	76.745	93.085	95.826	81.86	93.02	102.33	97.92	124.11	99.29	93.02
M1-T10	72.338	75.643	52.339	77.16	93.02	96.45	97.92	100.86	80.69	93.02
M2-T10T5	81.518	72.522	66.963	86.95	93.02	108.69	97.92	96.70	77.36	93.02

Tabla 12

Tabla de cargas máximas calculadas en función de cada elemento – Ensayo 1

MODELO	CARGAS CALCULADAS EN FUNCION DE CADA ELEMENTO SEGUN EL ACI									
	Fp1	Fp2	T	Pn11	Pn12	Pn21	Pn22	Pn23	Pn31	P32
	P _{ACI 1}	P _{ACI 2}	P _{ACI 3}	P _{ACI 4}	P _{ACI 5}	P _{ACI 6}	P _{ACI 7}	P _{ACI 8}	P _{ACI 9}	P _{ACI 10}
	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN
M1	218.89	171.58	36.77	233.49	263.57	291.86	138.72	228.77	183.02	263.57
M2	193.07	149.41	50.05	205.94	263.57	257.42	138.72	199.22	159.37	263.57
M3	171.58	187.37	65.37	183.02	263.57	228.77	138.72	249.82	199.86	263.57
M1-T5	157.55	134.55	62.31	168.05	186.05	210.07	97.92	179.40	143.52	186.05
M4-T8	98.83	122.29	167.51	105.42	186.05	131.77	97.92	163.05	130.44	186.05
M3-T8	114.08	121.12	130.74	121.68	186.05	152.10	97.92	161.49	129.19	186.05
M3-T5	114.37	130.21	90.91	122.00	186.05	152.49	97.92	173.61	138.89	186.05
M1-T8	131.67	126.30	102.14	140.45	186.05	175.56	97.92	168.40	134.72	186.05
M2-2T5	127.57	111.15	101.12	136.07	186.05	170.09	97.92	148.19	118.55	186.05
M1-T6	127.86	141.06	73.54	136.38	186.05	170.48	97.92	188.08	150.46	186.05

M2-T6	132.81	115.02	86.82	141.67	186.05	177.08	97.92	153.35	122.68	186.05
M2-T10	123.70	166.66	152.19	131.94	186.05	164.93	97.92	222.22	177.78	186.05
M3-T6	111.15	147.57	102.14	118.55	186.05	148.19	97.92	196.76	157.41	186.05
M4-T6	119.94	110.85	138.91	127.94	186.05	159.92	97.92	147.80	118.24	186.05
M4-T10	140.76	146.63	204.28	150.15	186.05	187.69	97.92	195.51	156.40	186.05
M2-T5	121.70	104.11	75.58	129.82	186.05	162.27	97.92	138.81	111.05	186.05
M3-T10	138.02	120.66	167.51	147.22	186.05	184.03	97.92	160.88	128.70	186.05
M4-2T5	109.68	122.29	153.21	116.99	186.05	146.24	97.92	163.05	130.44	186.05
M2-2T10	122.58	148.68	254.33	130.75	186.05	163.44	97.92	198.24	158.59	186.05
M1-T10	115.54	120.82	138.91	123.25	186.05	154.06	97.92	161.10	128.88	186.05
M2-T10T5	130.21	115.84	177.73	138.89	186.05	173.61	97.92	154.45	123.56	186.05

Tabla 13

Tabla de cargas máximas calculadas para puntales, tensores y nodos del modelo 1- Ensayo 2

ELEMENTOS DEL MODELO 1-ENSAYO 2										
MODELO	Fp1	Fp2	T	Pn11	Pn12	Pn21	Pn22	Pn23	Pn31	Pn32
	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN
M1	138.966	112.790	13.854	148.23	131.78	185.29	138.72	150.39	120.31	131.78
M2	102.011	119.334	18.857	108.81	131.78	136.01	138.72	159.11	127.29	131.78
M3	108.462	116.265	24.630	115.69	131.78	144.62	138.72	155.02	124.02	131.78
M1-T5	81.790	104.887	23.476	87.24	93.02	109.05	97.92	139.85	111.88	93.02
M4-T8	78.397	91.984	63.115	83.62	93.02	104.53	97.92	122.64	98.12	93.02
M3-T8	64.627	85.558	49.260	68.94	93.02	86.17	97.92	114.08	91.26	93.02
M3-T5	77.846	73.440	34.251	83.04	93.02	103.80	97.92	97.92	78.34	93.02
M1-T8	72.889	76.928	38.485	77.75	93.02	97.19	97.92	102.57	82.06	93.02
M2-2T5	82.436	70.135	38.100	87.93	93.02	109.92	97.92	93.51	74.81	93.02
M1-T6	81.702	77.663	27.709	87.15	93.02	108.94	97.92	103.55	82.84	93.02
M2-T6	76.378	73.991	32.712	81.47	93.02	101.84	97.92	98.65	78.92	93.02
M2-T10	109.235	76.084	57.342	116.52	93.02	145.65	97.92	101.45	81.16	93.02
M3-T6	93.203	86.953	38.485	99.42	93.02	124.27	97.92	115.94	92.75	93.02
M4-T6	77.442	74.909	52.339	82.61	93.02	103.26	97.92	99.88	79.90	93.02
M4-T10	78.397	92.351	76.969	83.62	93.02	104.53	97.92	123.13	98.51	93.02
M2-T5	76.928	70.870	28.479	82.06	93.02	102.57	97.92	94.49	75.59	93.02
M3-T10	86.953	68.747	63.115	92.75	93.02	115.94	97.92	91.66	73.33	93.02
M4-2T5	91.800	66.463	57.727	97.92	93.02	122.40	97.92	88.62	70.89	93.02
M2-2T10	76.561	75.643	95.826	81.67	93.02	102.08	97.92	100.86	80.69	93.02
M1-T10	71.464	77.714	52.339	76.23	93.02	95.29	97.92	103.62	82.90	93.02
M2-T10T5	71.604	85.190	66.963	76.38	93.02	95.47	97.92	113.59	90.87	93.02

Tabla 14

Tabla de cargas máximas calculadas en función de cada elemento – Ensayo 2

CARGAS CALCULADAS EN FUNCION DE CADA ELEMENTO SEGUN EL ACI										
	Fp1	Fp2	T	Pn11	Pn12	Pn21	Pn22	Pn23	Pn31	P32
MODELO	P_{ACI} 1	P_{ACI} 2	P_{ACI} 3	P_{ACI} 4	P_{ACI} 5	P_{ACI} 6	P_{ACI} 7	P_{ACI} 8	P_{ACI} 9	P_{ACI} 10
	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN
M1	221.97	180.16	36.77	236.76	263.57	295.96	138.72	240.21	192.17	263.57
M2	162.94	190.61	50.05	173.80	263.57	217.25	138.72	254.14	203.32	263.57
M3	173.24	185.71	65.37	184.79	263.57	230.99	138.72	247.61	198.09	263.57
M1-T5	130.64	167.53	62.31	139.35	186.05	174.19	97.92	223.38	178.70	186.05
M4-T8	125.22	146.92	167.51	133.57	186.05	166.96	97.92	195.90	156.72	186.05
M3-T8	103.23	136.66	130.74	110.11	186.05	137.64	97.92	182.21	145.77	186.05
M3-T5	124.34	117.30	90.91	132.63	186.05	165.79	97.92	156.40	125.12	186.05
M1-T8	116.42	122.88	102.14	124.19	186.05	155.23	97.92	163.83	131.07	186.05
M2-2T5	131.67	112.02	101.12	140.45	186.05	175.56	97.92	149.37	119.49	186.05
M1-T6	130.50	124.05	73.54	139.20	186.05	174.00	97.92	165.40	132.32	186.05
M2-T6	122.00	118.18	86.82	130.13	186.05	162.66	97.92	157.58	126.06	186.05
M2-T10	174.48	121.53	152.19	186.11	186.05	232.64	97.92	162.04	129.63	186.05
M3-T6	148.87	138.89	102.14	158.79	186.05	198.49	97.92	185.18	148.15	186.05
M4-T6	123.70	119.65	138.91	131.94	186.05	164.93	97.92	159.53	127.63	186.05
M4-T10	125.22	147.51	204.28	133.57	186.05	166.96	97.92	196.68	157.34	186.05
M2-T5	122.88	113.20	75.58	131.07	186.05	163.83	97.92	150.93	120.74	186.05
M3-T10	138.89	109.81	167.51	148.15	186.05	185.18	97.92	146.41	117.13	186.05
M4-2T5	146.63	106.16	153.21	156.40	186.05	195.51	97.92	141.55	113.24	186.05
M2-2T10	122.29	120.82	254.33	130.44	186.05	163.05	97.92	161.10	128.88	186.05
M1-T10	114.15	124.13	138.91	121.76	186.05	152.20	97.92	165.51	132.41	186.05
M2-T10T5	114.37	136.07	177.73	122.00	186.05	152.49	97.92	181.43	145.14	186.05

En la tabla 15, P_u es la carga ultima que resistieron las probetas en los ensayos realizados, mientras que P_{ACI} es la carga máxima teórica de los diseños realizados, debido a que la menor carga de los diseños es la que define el elemento que va a fallar primero.

$$P_{ACI} = P_u - X * P_u$$

En los resultados obtenidos, la resistencia teórica calculada (P_{ACI}) corresponde a un porcentaje de la resistencia última experimental (P_u), ajustado por un término proporcional representado por el factor X. Este factor, expresado

en términos porcentuales, indica qué fracción de la resistencia experimental no es explicada por el modelo teórico y permite conocer en qué porcentaje el modelo subestima la resistencia última con respecto al valor experimental real.

Dentro de lo ensayado, tomando en cuenta el Modelo Puntal Tensor 1 propuesto se obtiene que el modelo normativo subestima la resistencia última en las vigas en un rango de 3.71% al 37.47 % (Tabla 16), sin embargo, el modelo 1 satisface al comportamiento real de las vigas al presentar que su punto de falla más consecuente se encuentra en el nodo 2 (Pn22) por la aplicación de la carga, fenómeno que se ve representado durante los ensayos.

En los modelos en donde el refuerzo longitudinal no existe o es mínimo, las vigas presentan una gran discrepancia en cuanto a su resistencia última, sin embargo, según el análisis de ductilidad realizado, se dice que las vigas poseen una propiedad para absorber y disipar mayores cantidades de energía durante eventos de carga extrema.

Tabla 15

Tabla de relación entre Carga última (P_u) y carga calculada P_{ACI}

MODELO	ENSAYO 1			ENSAYO 2		
	P_U	P_{ACI}	% VARIACIÓN (X)	P_U	P_{ACI}	% VARIACIÓN (X)
	kN	kN	%	kN	kN	%
M1	147.90	36.77	75.14	162.46	36.77	77.37
M2	160.65	50.05	68.85	170.55	50.05	70.65
M3	152.44	65.37	57.12	143.65	65.37	54.49
M1-T5	127.58	62.31	51.16	135.28	62.31	53.94
M4-T8	150.91	97.92	35.11	137.82	97.92	28.95
M3-T8	122.11	97.92	19.81	138.60	97.92	29.35
M3-T5	122.87	90.91	26.02	138.28	90.91	34.26
M1-T8	118.00	97.92	17.02	137.81	97.92	28.95
M2-2T5	133.33	97.92	26.56	121.84	97.92	19.63
M1-T6	115.73	73.54	36.45	115.43	73.54	36.29
M2-T6	131.18	86.82	33.82	120.81	86.82	28.14

M2-T10	127.31	97.92	23.09	117.36	97.92	16.57
M3-T6	126.46	97.92	22.57	129.26	97.92	24.24
M4-T6	151.55	97.92	35.39	133.27	97.92	26.52
M4-T10	146.56	97.92	33.19	156.61	97.92	37.47
M2-T5	110.52	75.58	31.61	104.42	75.58	27.61
M3-T10	114.09	97.92	14.17	109.08	97.92	10.23
M4-2T5	120.12	97.92	18.48	122.94	97.92	20.35
M2-2T10	119.46	97.92	18.03	111.91	97.92	12.50
M1-T10	101.69	97.92	3.71	115.01	97.92	14.86
M2-T10T5	116.20	97.92	15.73	113.99	97.92	14.10

4.3.2. Estimación De Carga Máxima Según Modelo 2

En la tabla 16 se muestra la carga máxima de resistencia de todos los elementos que forman el modelo 2 tomando en cuenta las siguientes directrices. Para el caso del modelo 2 se tiene que el coeficiente B_c , al igual que en el modelo anterior sigue teniendo un valor de 2.

Los puntales 1 y 3 son puntales de borde, según la tabla 1 su valor es de “1”. Para el caso del puntal 2 se determina un valor de B_s de “0.75”, ya que la tabla 1 establece ese valor para puntales interiores.

En los Nudo 1, 2, 3 y 4 definidos en el esquema general del modelo 2, se dice que estos nodos están conformados por un puntal y un tensor, por lo que el valor de B_n según la tabla 2, es de 0.8.

Para el caso del nodo 5 en donde este está conformado por 4 tensores y un puntal su valor según la tabla 2 es de 0.6. El cálculo del P_{ACI} para cada elemento se realiza después de un análisis estático en la estructura, donde se debe definir el valor de la fuerza en los apoyos

De acuerdo con el modelo 2 las cargas máximas se determinan de la siguiente manera:

$$P_{ACI} = Fp1 * 2$$

$$P_{ACI} = Fp3 * 2$$

$$P_{ACI} = T1 * 2 * \text{sen}(\beta)$$

$$P_{ACI} = T2 * 2 * \text{sen}(\beta)$$

$$P_{ACI} = T3 * 2 * \tan(\alpha)$$

$$P_{ACI} = Fp2$$

En función de cada elemento y con las ecuaciones anteriormente descritas se procede a determinar la carga máxima teórica (PACI). Para el caso de los nodos tomar en cuenta que solo se analiza la cara que presenta aplastamiento (Tabla 17).

Los cálculos realizados están expuestos en los anexos al final del documento.

Tabla 16

Tabla de cargas máximas calculadas para puntales, tensores y nodos del modelo 2

MODELO	CARGA MÁXIMA DE CADA ELEMENTO														
	Fp1 kN	Fp2 kN	Fp3 kN	Pt1 kN	Pt2 kN	Pt3 kN	Pn11 kN	Pn12 kN	Pn21 kN	Pn31 kN	Pn32 kN	Pn41 kN	Pn51 kN	Pn52 kN	Pn61 kN
M1	182.72	100.09	143.23	118.75	118.75	118.75	146.18	131.78	146.18	114.58	131.78	114.58	133.45	204.00	80.07
M2	161.16	93.54	124.72	161.63	161.63	161.63	290.10	131.78	290.10	224.50	131.78	224.50	249.45	204.00	74.83
M3	124.85	117.31	156.41	211.12	211.12	211.12	349.57	131.78	349.57	437.94	131.78	437.94	469.22	204.00	93.84
M1-T5	131.52	84.24	112.31	118.75	118.75	201.22	631.28	93.02	631.28	539.11	93.02	539.11	561.57	144.00	67.39
M4-T8	82.50	76.56	102.08	329.87	329.87	540.98	478.49	93.02	478.49	592.07	93.02	592.07	612.49	144.00	61.25
M3-T8	79.56	68.12	101.10	211.12	211.12	422.23	541.01	93.02	541.01	687.50	93.02	687.50	635.75	144.00	54.49
M3-T5	83.23	81.52	108.69	211.12	211.12	293.58	649.21	93.02	649.21	847.79	93.02	847.79	869.53	144.00	65.21
M1-T8	147.10	79.07	105.43	118.75	118.75	329.87	1294.44	93.02	1294.44	927.79	93.02	927.79	948.87	144.00	63.26
M2-2T5	106.49	64.63	92.78	161.63	161.63	326.57	1043.58	93.02	1043.58	909.24	93.02	909.24	861.70	144.00	51.70
M1-T6	53.86	42.23	117.75	118.75	118.75	237.50	581.64	93.02	581.64	1271.69	93.02	1271.69	619.34	144.00	33.78
M2-T6	110.87	72.01	96.01	161.63	161.63	280.39	1308.21	93.02	1308.21	1132.92	93.02	1132.92	1152.13	144.00	57.61
M2-T10	103.26	104.34	139.12	161.63	161.63	491.50	1321.68	93.02	1321.68	1780.80	93.02	1780.80	1808.62	144.00	83.47
M3-T6	87.32	92.39	123.18	211.12	211.12	329.87	1204.95	93.02	1204.95	1699.93	93.02	1699.93	1724.57	144.00	73.91
M4-T6	75.00	64.13	92.53	329.87	329.87	448.62	1109.95	93.02	1109.95	1369.51	93.02	1369.51	1282.56	144.00	51.30
M4-T10	117.50	91.80	122.40	329.87	329.87	659.73	1856.56	93.02	1856.56	1933.92	93.02	1933.92	1958.40	144.00	73.44
M2-T5	101.59	65.18	86.90	161.63	161.63	244.10	1706.75	93.02	1706.75	1459.99	93.02	1459.99	1477.37	144.00	52.14
M3-T10	115.21	75.54	100.72	211.12	211.12	540.98	2050.79	93.02	2050.79	1792.83	93.02	1792.83	1812.97	144.00	60.43
M4-2T5	91.56	76.56	102.08	329.87	329.87	494.80	1721.24	93.02	1721.24	1919.13	93.02	1919.13	1939.55	144.00	61.25
M2-2T10	81.52	56.37	124.11	161.63	161.63	821.37	1614.06	93.02	1614.06	2457.45	93.02	2457.45	1503.07	144.00	45.09
M1-T10	90.21	71.46	100.86	118.75	118.75	448.62	1876.44	93.02	1876.44	2097.84	93.02	2097.84	2001.00	144.00	57.17
M2-T10T5	108.69	72.52	96.70	161.63	161.63	573.97	2369.47	93.02	2369.47	2107.97	93.02	2107.97	2127.31	144.00	58.02

Tabla 17

Tabla de cargas máximas calculadas en función de cada elemento

CARGAS CALCULADAS EN FUNCION DE CADA ELEMENTO SEGUN EL ACI															
	Fp1	Fp2	Fp3	T1	T2	T3	Pn11	Pn12	Pn21	Pn31	Pn32	Pn41	Pn51	Pn52	Pn61
MODELO	P_{ACI} 1	P_{ACI} 2	P_{ACI} 3	P_{ACI} 4	P_{ACI} 5	P_{ACI} 6	P_{ACI} 7	P_{ACI} 8	P_{ACI} 9	P_{ACI} 10	P_{ACI} 11	P_{ACI} 12	P_{ACI} 13	P_{ACI} 14	P_{ACI} 15
	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN	kN
M1	365.44	100.09	286.46	190.00	190.00	316.67	292.36	263.57	292.36	229.17	263.57	229.17	133.45	204.00	80.07
M2	322.33	93.54	249.45	258.62	258.62	431.02	580.19	263.57	580.19	449.00	263.57	449.00	249.45	204.00	74.83
M3	249.70	117.31	312.81	337.78	337.78	562.97	699.15	263.57	699.15	875.88	263.57	875.88	469.22	204.00	93.84
M1-T5	263.03	84.24	224.63	190.00	190.00	316.67	1262.56	186.05	1262.56	1078.22	186.05	1078.22	561.57	144.00	67.39
M4-T8	165.00	76.56	204.16	527.79	527.79	879.64	956.97	186.05	956.97	1184.15	186.05	1184.15	612.49	144.00	61.25
M3-T8	159.12	68.12	202.20	337.78	337.78	562.97	1082.02	186.05	1082.02	1374.99	186.05	1374.99	635.75	144.00	54.49
M3-T5	166.46	81.52	217.38	337.78	337.78	562.97	1298.42	186.05	1298.42	1695.58	186.05	1695.58	869.53	144.00	65.21
M1-T8	294.19	79.07	210.86	190.00	190.00	316.67	2588.88	186.05	2588.88	1855.58	186.05	1855.58	948.87	144.00	63.26
M2-2T5	212.98	64.63	185.56	258.62	258.62	431.02	2087.16	186.05	2087.16	1818.47	186.05	1818.47	861.70	144.00	51.70
M1-T6	107.71	42.23	235.50	190.00	190.00	316.67	1163.29	186.05	1163.29	2543.37	186.05	2543.37	619.34	144.00	33.78
M2-T6	221.73	72.01	192.02	258.62	258.62	431.02	2616.41	186.05	2616.41	2265.85	186.05	2265.85	1152.13	144.00	57.61
M2-T10	206.51	104.34	278.25	258.62	258.62	431.02	2643.37	186.05	2643.37	3561.59	186.05	3561.59	1808.62	144.00	83.47
M3-T6	174.63	92.39	246.37	337.78	337.78	562.97	2409.90	186.05	2409.90	3399.86	186.05	3399.86	1724.57	144.00	73.91
M4-T6	149.99	64.13	185.07	527.79	527.79	879.64	2219.91	186.05	2219.91	2739.02	186.05	2739.02	1282.56	144.00	51.30
M4-T10	235.01	91.80	244.80	527.79	527.79	879.64	3713.13	186.05	3713.13	3867.84	186.05	3867.84	1958.40	144.00	73.44
M2-T5	203.18	65.18	173.81	258.62	258.62	431.02	3413.49	186.05	3413.49	2919.97	186.05	2919.97	1477.37	144.00	52.14
M3-T10	230.43	75.54	201.44	337.78	337.78	562.97	4101.57	186.05	4101.57	3585.65	186.05	3585.65	1812.97	144.00	60.43
M4-2T5	183.11	76.56	204.16	527.79	527.79	879.64	3442.48	186.05	3442.48	3838.27	186.05	3838.27	1939.55	144.00	61.25
M2-2T10	163.04	56.37	248.23	258.62	258.62	431.02	3228.13	186.05	3228.13	4914.90	186.05	4914.90	1503.07	144.00	45.09
M1-T10	180.43	71.46	201.72	190.00	190.00	316.67	3752.89	186.05	3752.89	4195.68	186.05	4195.68	2001.00	144.00	57.17
M2-T10T5	217.38	72.52	193.39	258.62	258.62	431.02	4738.94	186.05	4738.94	4215.95	186.05	4215.95	2127.31	144.00	58.02

Dentro de la tabla 18 se encuentra la relación entre la carga teórica PACI y su variación en cuanto a la carga ultima, dentro de este modelo la variación en cuanto a que el modelo subestima la carga máxima de diseño esta entre el 28.87% y el 70.81 % además sus resultados teóricos no concuerdan con el punto de falla observado durante los ensayos, por lo que el modelo 2 no satisface al comportamiento real de la viga peraltada

Tabla 18

Tabla de relación entre carga ultima P_u y carga calculada PACI en el modelo 2

MODELO	PACI	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
		P_u	VARIACION	P_u	VARIACION
	kN	kN	%	kN	%
M1	80.07	147.90	45.86	162.46	50.71
M2	74.83	160.65	53.42	170.55	56.12
M3	93.84	152.44	38.44	143.65	34.67
M1-T5	67.39	127.58	47.18	135.28	50.18
M4-T8	61.25	150.91	59.41	137.82	55.56
M3-T8	54.49	122.11	55.37	138.60	60.68
M3-T5	65.21	122.87	46.92	138.28	52.84
M1-T8	63.26	118.00	46.39	137.81	54.10
M2-2T5	51.70	133.33	61.22	121.84	57.57
M1-T6	33.78	115.73	70.81	115.43	70.73
M2-T6	57.61	131.18	56.09	120.81	52.32
M2-T10	83.47	127.31	34.43	117.36	28.87
M3-T6	73.91	126.46	41.55	129.26	42.82
M4-T6	51.30	151.55	66.15	133.27	61.50
M4-T10	73.44	146.56	49.89	156.61	53.10
M2-T5	52.14	110.52	52.82	104.42	50.06
M3-T10	60.43	114.09	47.03	109.08	44.60
M4-2T5	61.25	120.12	49.01	122.94	50.18
M2-2T10	45.09	119.46	62.25	111.91	59.71
M1-T10	57.17	101.69	43.78	115.01	50.29
M2-T10T5	58.02	116.20	50.07	113.99	49.10

4.4. Determinación De Ductilidad

El proceso para obtener la gráfica de ductilidad comienza con la representación de la curva fuerza-desplazamiento, la cual se deriva de datos experimentales o simulaciones estructurales. Para facilitar el análisis de esta curva, se divide en tramos consecutivos, y se calcula el área bajo cada segmento utilizando el teorema del trapecio.

Este método permite estimar la energía total absorbida por el sistema durante el ensayo. A continuación, se desarrolla un modelo elastoplástico idealizado que consta de dos tramos: uno elástico, cuya rigidez inicial está definida por la pendiente de la curva hasta alcanzar el punto de fluencia, y otro plástico que representa el comportamiento posterior a la fluencia, caracterizado por una rigidez reducida o constante.

Los parámetros del modelo elastoplástico se ajustan para que las áreas bajo ambas curvas la experimental y la teórica sean equivalentes. Este ajuste es fundamental para asegurar que se represente correctamente la capacidad de absorción de energía del sistema. Una vez validados los ajustes, se grafican las curvas experimental y elastoplástica en un mismo plano, resaltando el desplazamiento de fluencia (Δy) y el desplazamiento último (Δu). (Ver graficas 42 en adelante)

El desplazamiento ultimo depende de la serie de datos que se tenga del ensayo, este valor varía dependiendo de si se puede obtener el desplazamiento último en función del 85% de la carga ultima, caso contrario se usa el desplazamiento máximo de la viga.

Estos desplazamientos son utilizados para calcular el factor de ductilidad ($\mu = \Delta u / \Delta y$), que es un indicador crucial del comportamiento del sistema.

Este gráfico proporciona una visualización clara de la capacidad del sistema para deformarse más allá del límite elástico, lo que resulta esencial para evaluar su desempeño estructural ante cargas extremas.

La ductilidad es un atributo clave en el diseño de estructuras, ya que permite que estas absorban energía y se deformen sin colapsar, contribuyendo así a la seguridad y estabilidad general de las edificaciones.

En la tabla 19 se presentan las ductilidades obtenidas por cada uno de los ensayos realizados.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el rango de ductilidad de las vigas ensayadas se sitúa entre 1.26 y 2.10. Estos valores permiten establecer que las vigas con ductilidad cercana al límite inferior presentan un comportamiento más frágil en comparación con aquellas que poseen un valor de ductilidad superior. Como conclusión a esto se dice que las vigas poseen grandes propiedades para la absorción y liberación de energía evitando así la fractura rápida en ciertos elementos como lo son en los modelos (M1, M2, M3) y otros con refuerzo longitudinal mínimo.

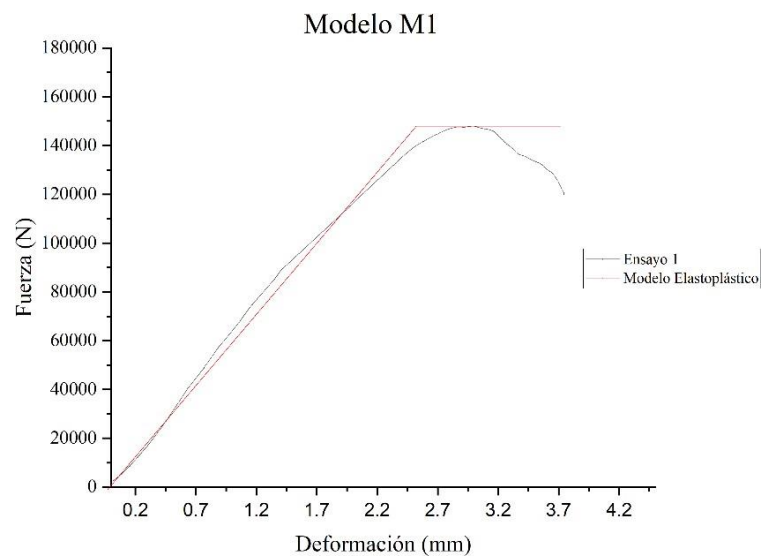
Las vigas que exhiben un mayor factor de ductilidad demuestran una mejor capacidad para soportar deformaciones plásticas, lo que indica que son capaces de absorber más energía antes de alcanzar el fallo.

Tabla 19*Tabla de ductilidad de vigas ensayadas*

MODELO	DUCTILIDAD					
	ENSAYO 1		u	ENSAYO 2		u
	Δy	Δu		Δy	Δu	
	mm	mm		mm	mm	
M1	2.59	3.54	1.37	2.49	3.69	1.48
M2	3.62	4.48	1.24	3.43	4.45	1.30
M3	3.77	5.4	1.43	3.26	4.66	1.43
M1-T5	3.48	5.15	1.48	3.27	5.25	1.61
M4-T8	2.86	4.04	1.41	3.51	5.23	1.49
M3-T8	4.38	6.22	1.42	3.49	4.87	1.40
M3-T5	3.21	4.95	1.54	3.49	4.82	1.38
M1-T8	2.91	4.70	1.62	2.91	5.26	1.81
M2-2T5	3.01	4.2	1.40	3.077	5.16	1.68
M1-T6	4.19	5.28	1.26	4.18	5.7	1.36
M2-T6	3.57	5.45	1.53	3.22	4.89	1.52
M2-T10	3.64	4.66	1.28	3.17	5.57	1.76
M3-T6	2.61	4.48	1.72	3.13	5.23	1.67
M4-T6	3.02	4.56	1.51	3.78	4.77	1.26
M4-T10	2.61	4.5	1.72	3.96	5.48	1.38
M2-T5	3.55	6.21	1.75	3	5.74	1.91
M3-T10	3.47	6.04	1.74	3.11	5.41	1.74
M4-2T5	4.17	6.35	1.52	4.2	6.44	1.53
M2-2T10	3.71	6.21	1.67	3.3	5.9	1.79
M1-T10	2.99	5.61	1.88	3.19	6.7	2.10
M2-T10T5	3.42	6.09	1.78	2.87	4.95	1.72

Gráfica 42

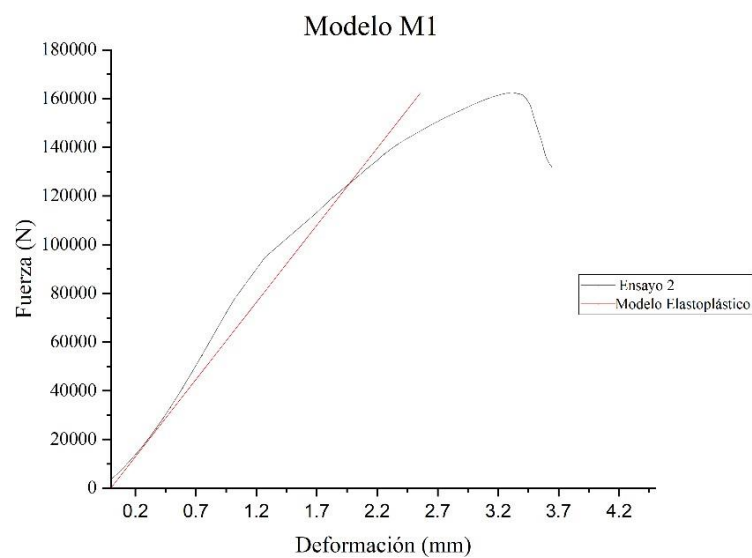
Gráfica de ductilidad de probeta M1 ensayo 1



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 43

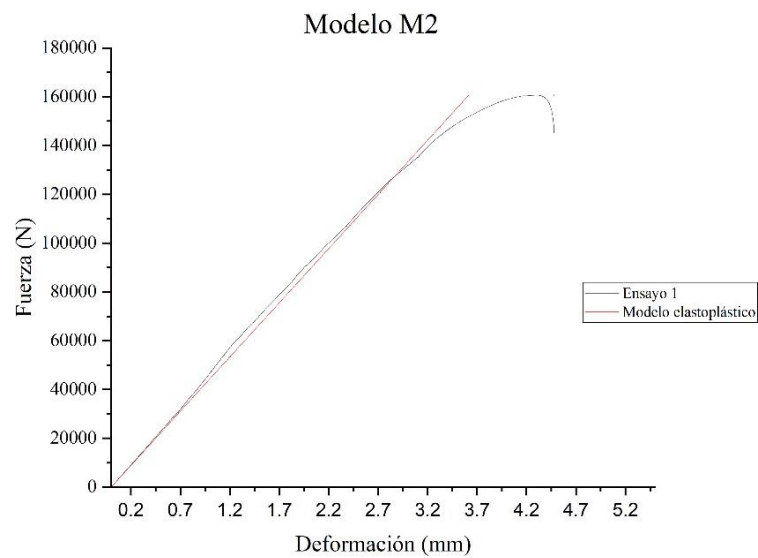
Gráfica de ductilidad de probeta M1 ensayo 2



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 44

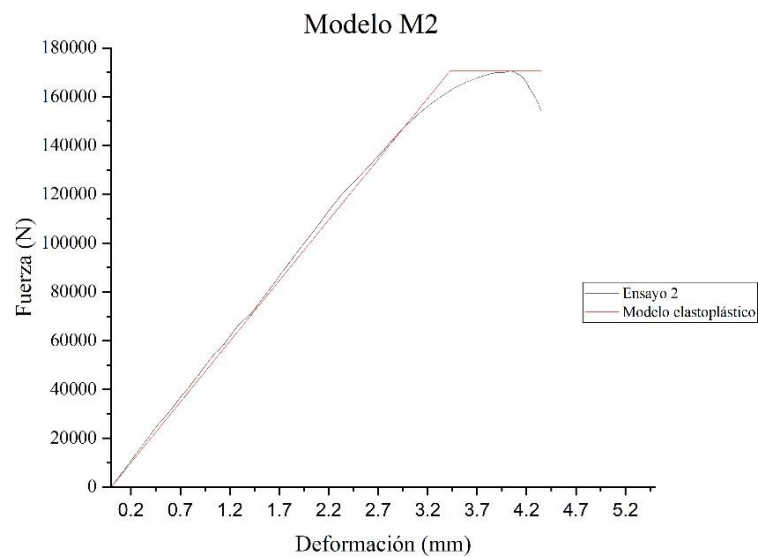
Gráfica de ductilidad de probeta M2 ensayo 1



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 45

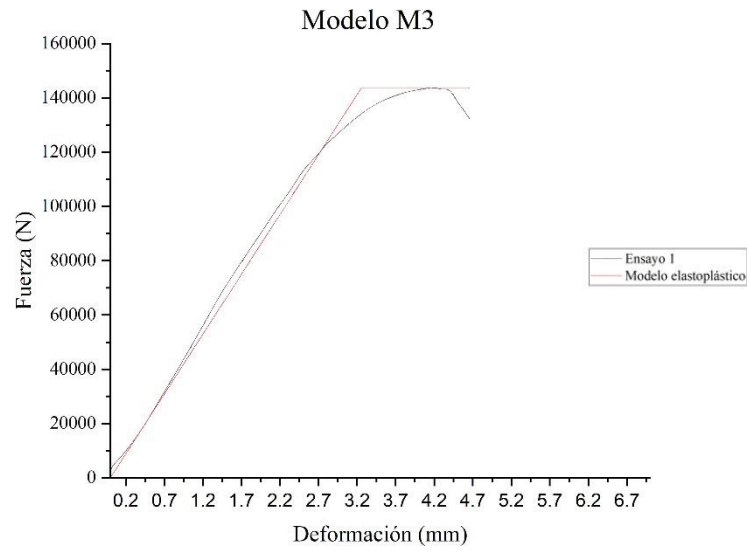
Gráfica de ductilidad de probeta M2 ensayo 2



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 46

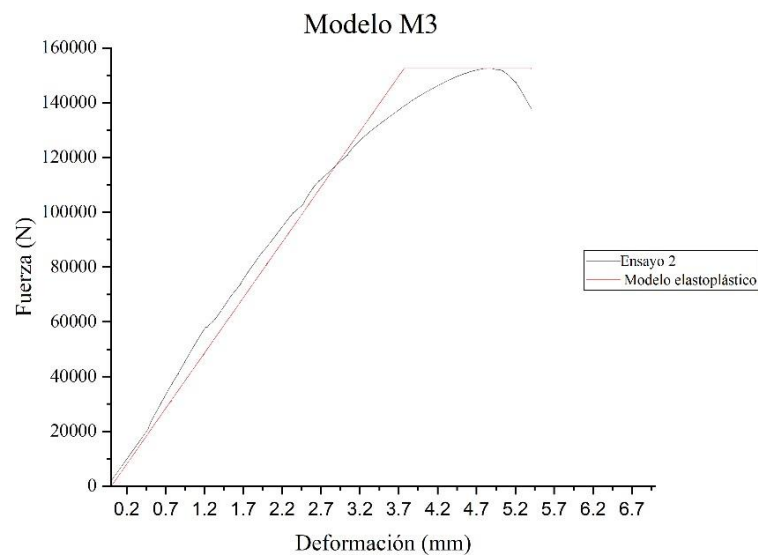
Gráfica de ductilidad de probeta M3 ensayo 1



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 47

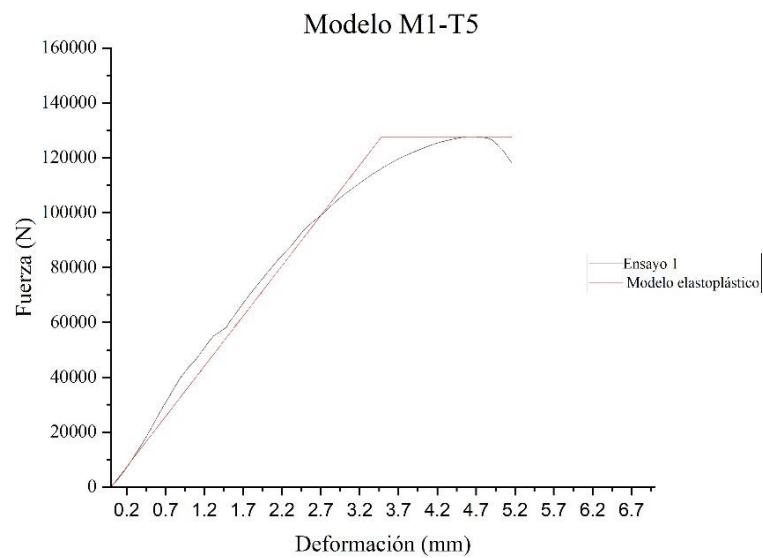
Gráfica de ductilidad de probeta M3 ensayo 2



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 48

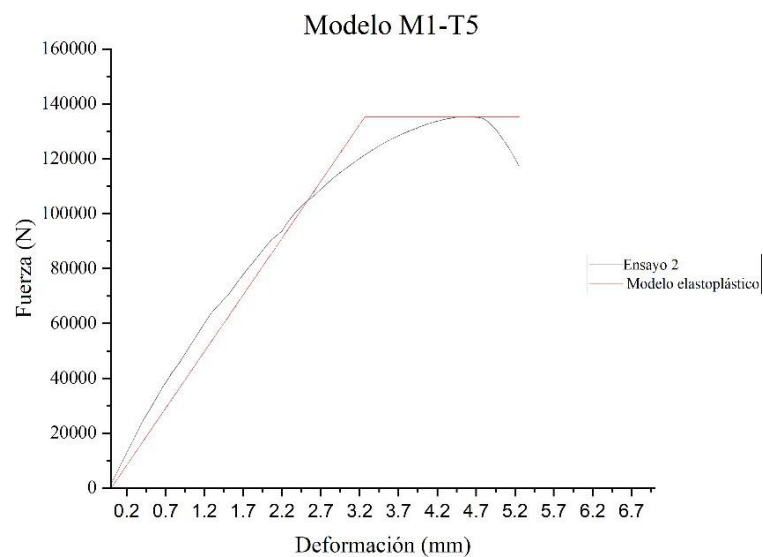
Gráfica de ductilidad de probeta M1-T5 ensayo 1



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 49

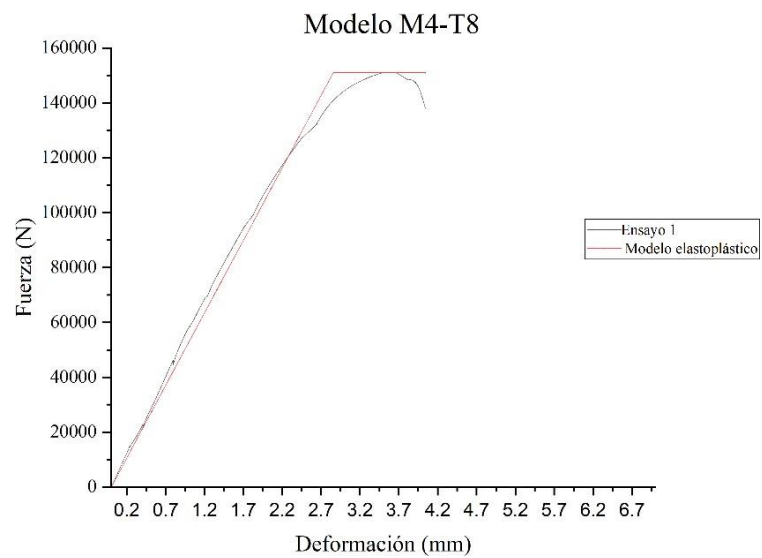
Gráfica de ductilidad de probeta M1-T5 ensayo 2



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 50

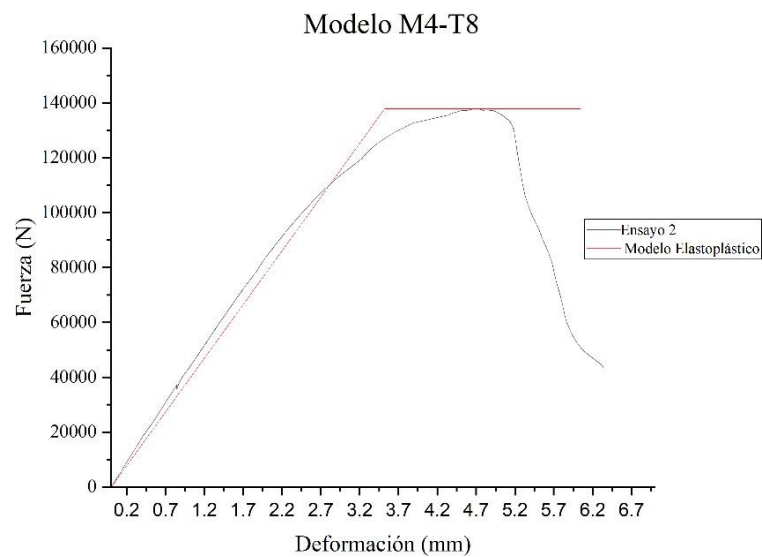
Gráfica de ductilidad de probeta M4-T8 ensayo 1



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 51

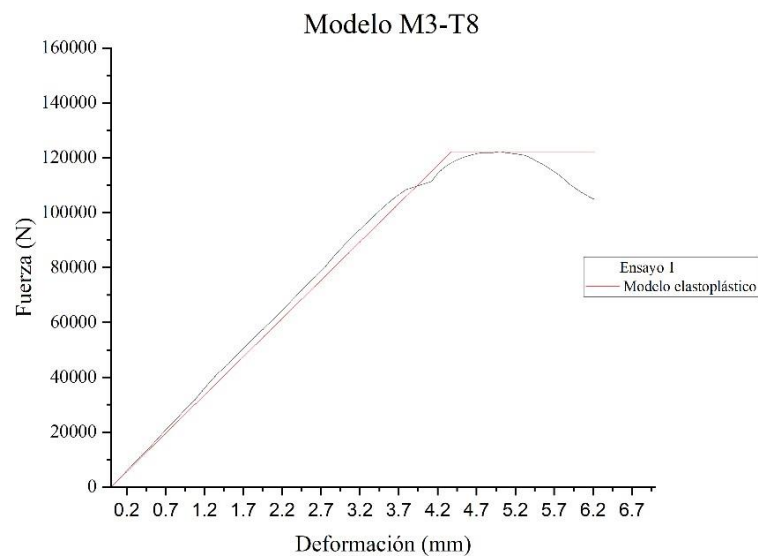
Gráfica de ductilidad de probeta M4-T8 ensayo 2



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 52

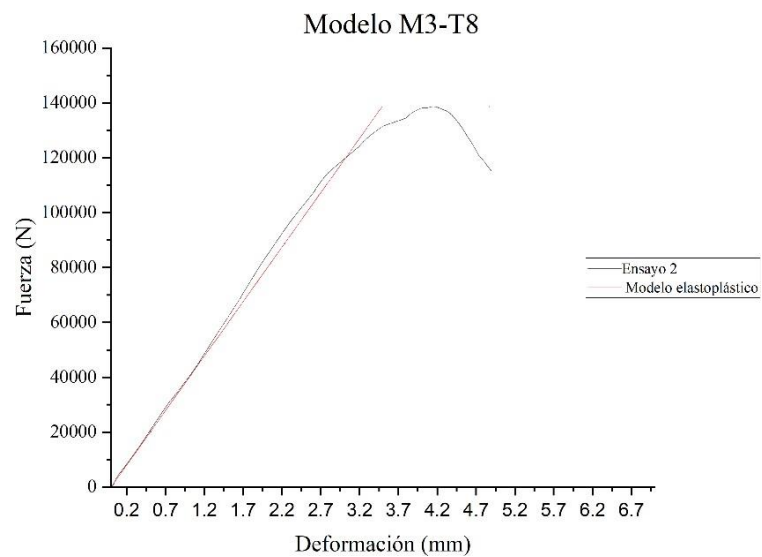
Gráfica de ductilidad de probeta M3-T8 ensayo 1



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 53

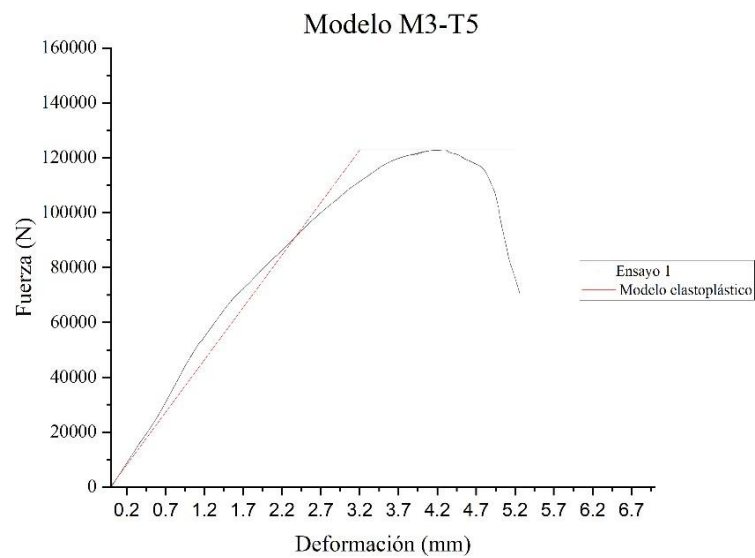
Gráfica de ductilidad de probeta M3-T8 ensayo 2



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 54

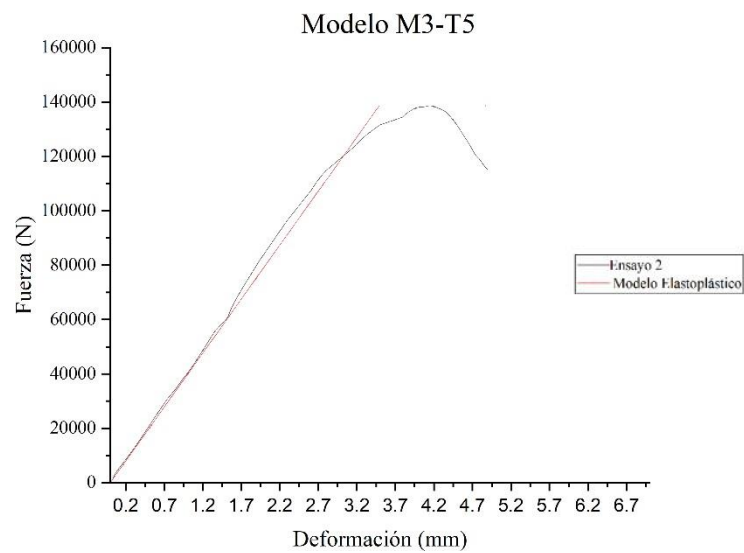
Gráfica de ductilidad de probeta M3-T5 ensayo 1



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 55

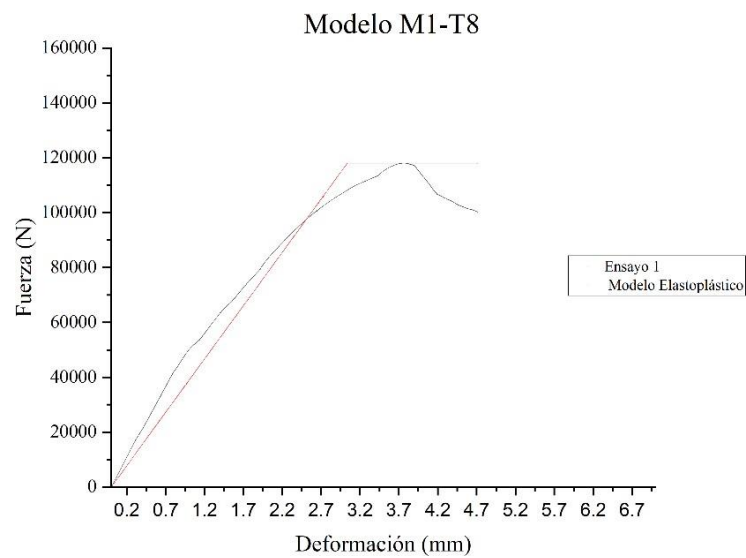
Gráfica de ductilidad de probeta M3-T5 ensayo 2



Nota: Elaboración propia

Gráfica 56

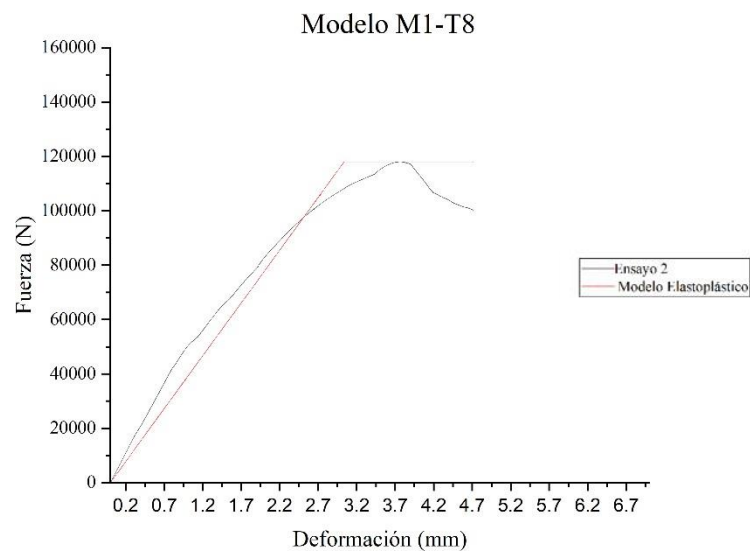
Gráfica de ductilidad de probeta M1-T8 ensayo 1



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 57

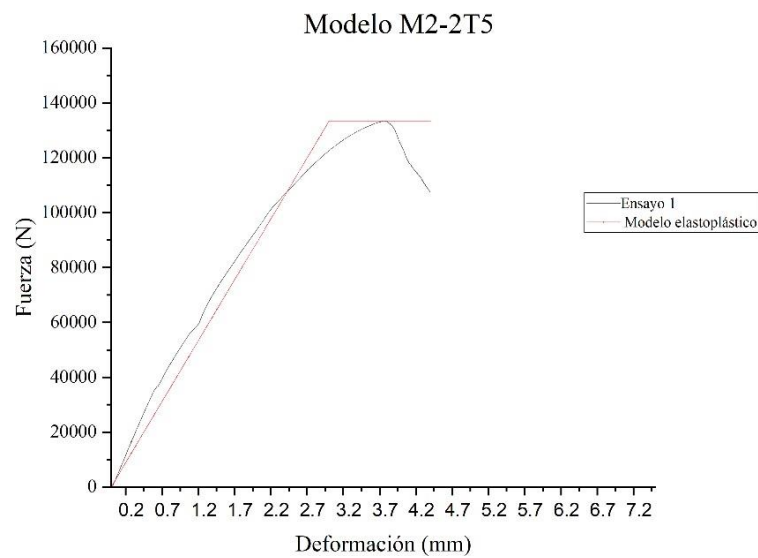
Gráfica de ductilidad de probeta M1-T8 ensayo 2



Nota: Elaboración propia

Gráfica 58

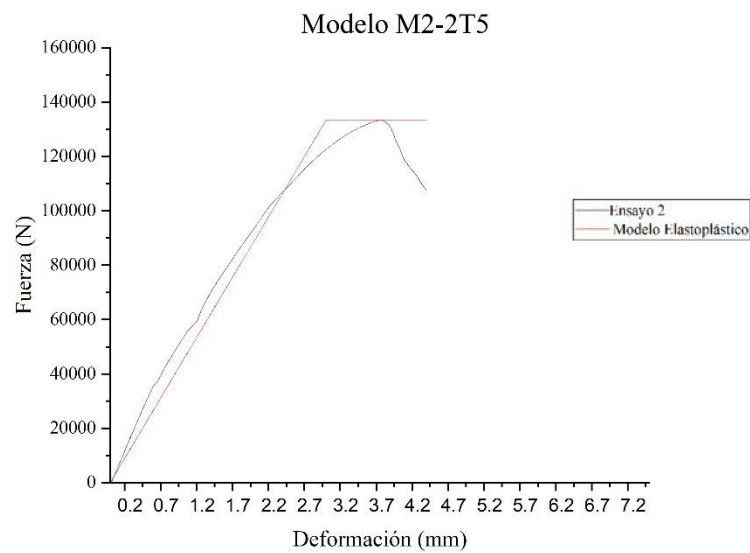
Gráfica de ductilidad de probeta M2-2T5 ensayo 1



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 59

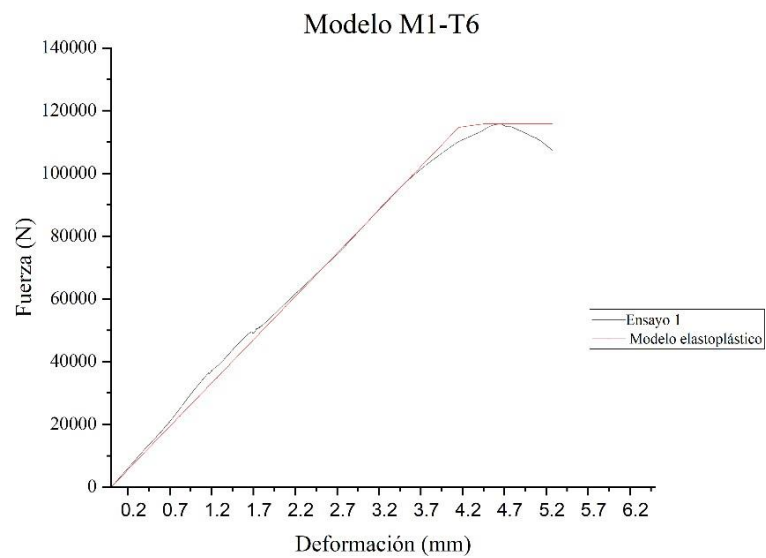
Gráfica de ductilidad de probeta M2-2T5 ensayo 2



Nota: Elaboración propia

Gráfica 60

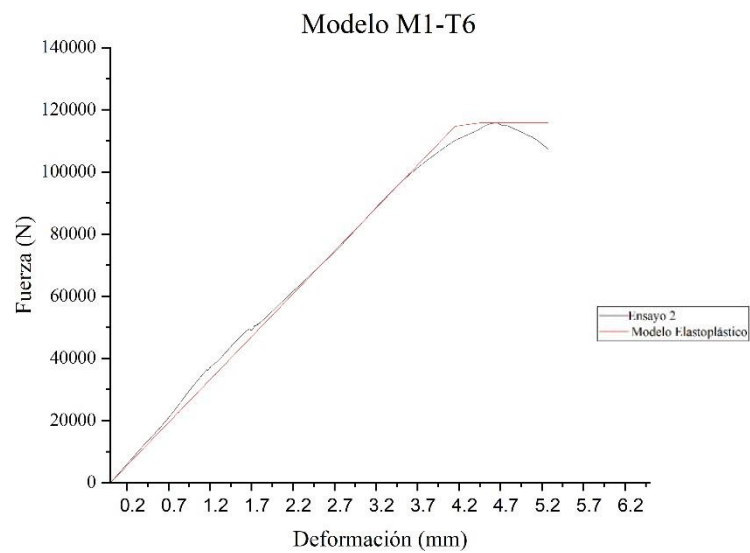
Gráfica de ductilidad de probeta M1-T6 ensayo 1



Nota: Elaboración propia.

Gráfica 61

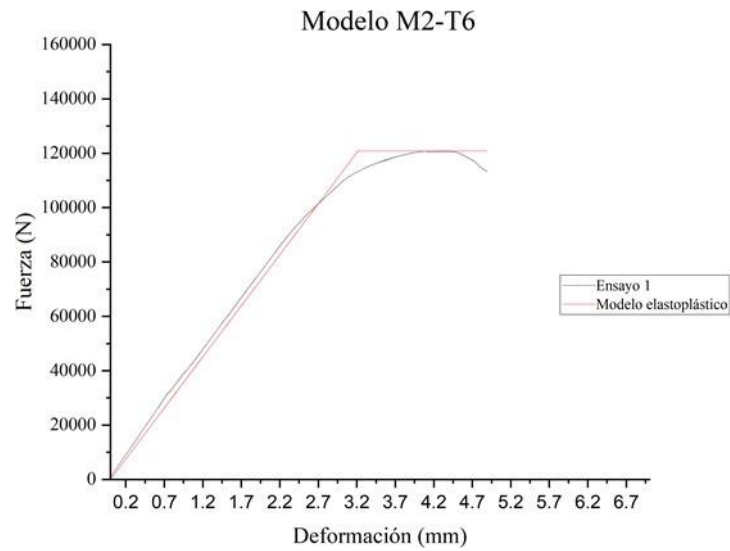
Gráfica de ductilidad de probeta M1-T6 ensayo 2



Nota: Elaboración propia

Gráfica 62

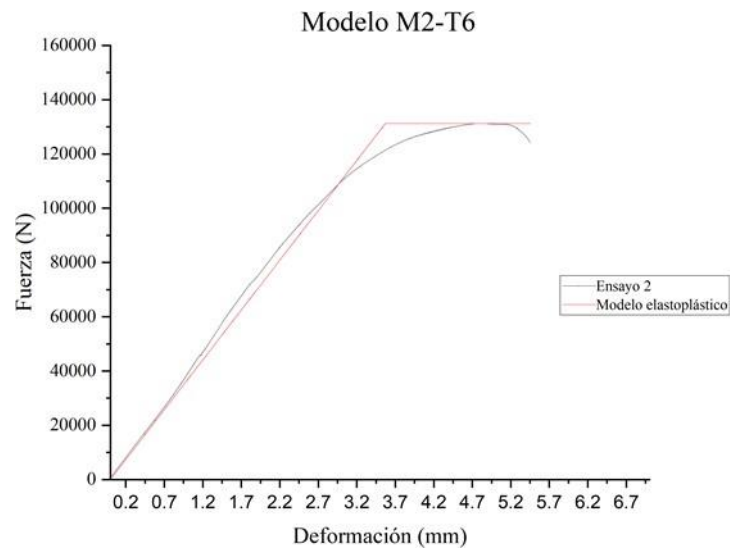
Gráfica de ductilidad de probeta M2-T6 ensayo 1



Nota: Elaboración propia

Gráfica 63

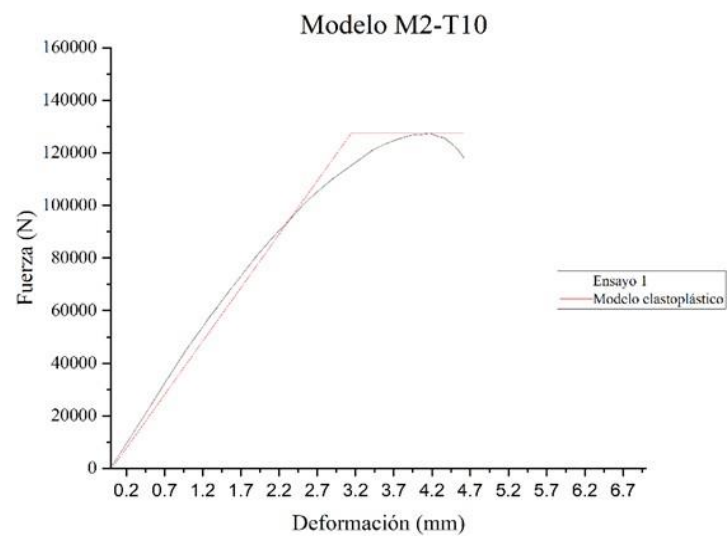
Gráfica de ductilidad de probeta M2-T6 ensayo 2



Nota: Elaboración propia

Gráfica 64

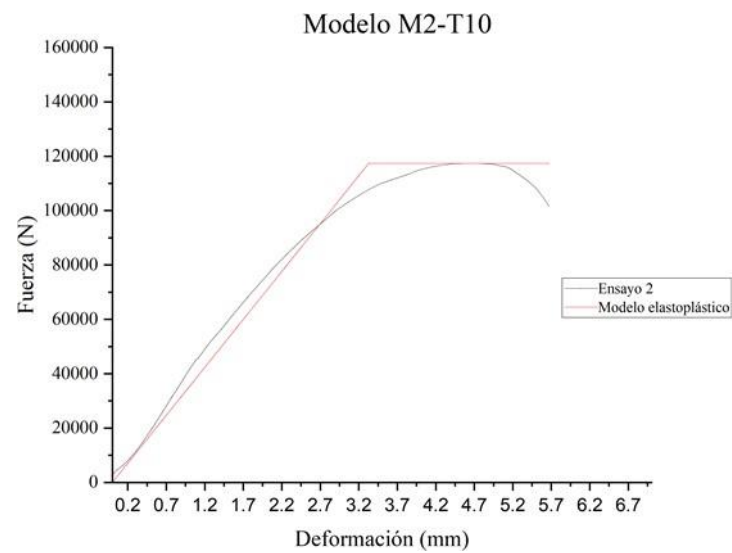
Gráfica de ductilidad de probeta M2-T10 ensayo 1



Nota: Elaboración propia

Gráfica 65

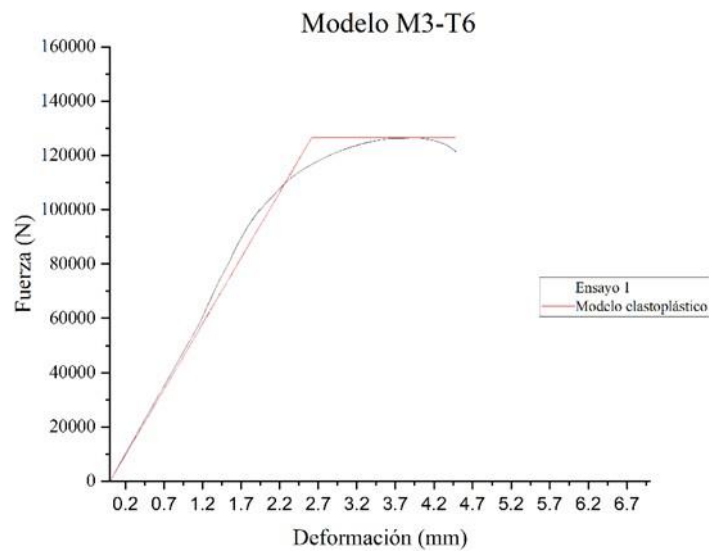
Gráfica de ductilidad de probeta M2-T10 ensayo 2



Nota: Elaboración propia

Gráfica 66

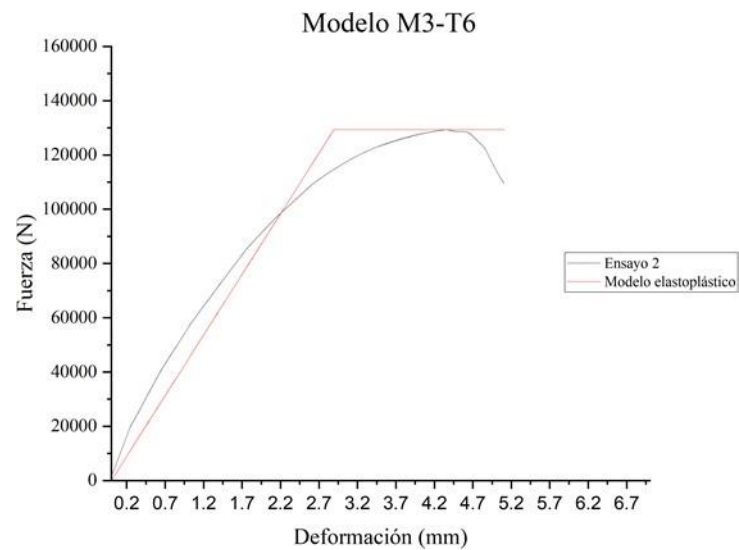
Gráfica de ductilidad de probeta M3-T6 ensayadas



Nota: Elaboración propia

Gráfica 67

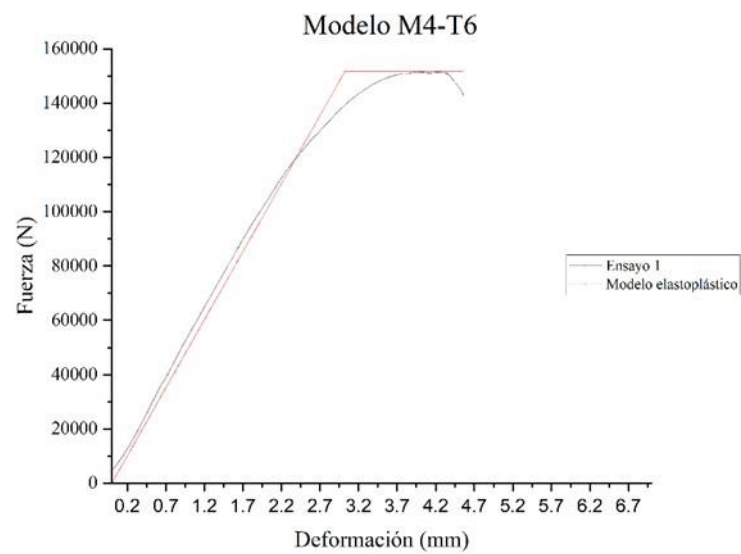
Gráfica de ductilidad de probeta M3-T6 ensayo 2



Nota: Elaboración propia

Gráfica 68

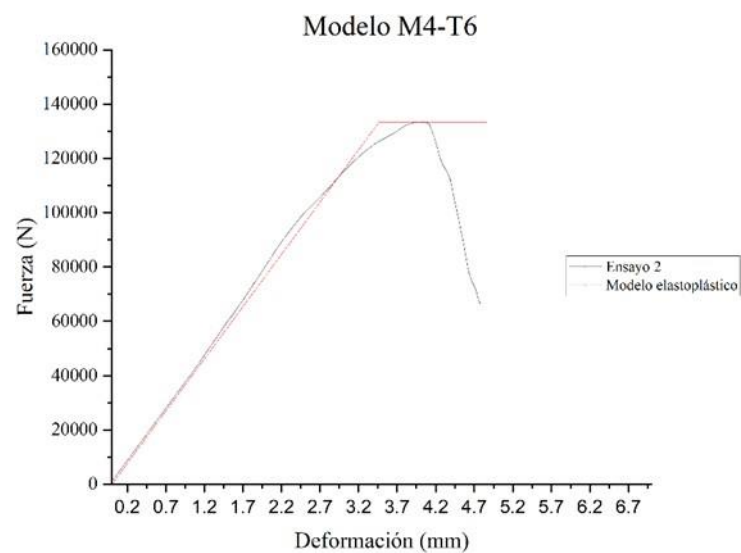
Gráfica de ductilidad de probeta M4-T6 ensayo 1



Nota: Elaboración propia

Gráfica 69

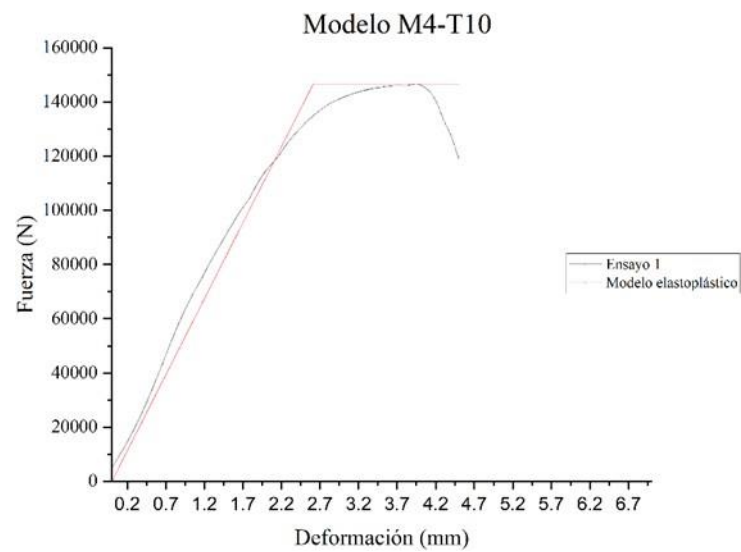
Gráfica de ductilidad de probeta M4-T6 ensayo 2



Nota: Elaboración propia

Gráfica 70

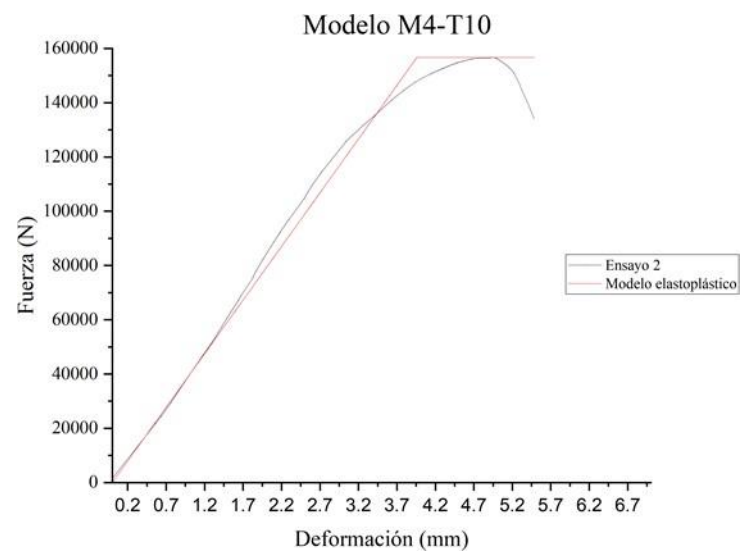
Gráfica de ductilidad de probeta M4-T10 ensayo 1



Nota: Elaboración propia

Gráfica 71

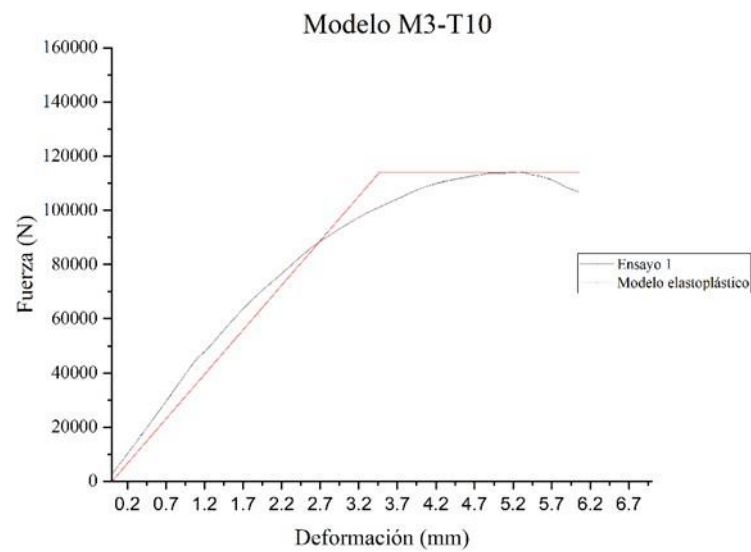
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M4-T10 ensayo 2



Nota: Elaboración propia

Gráfica 72

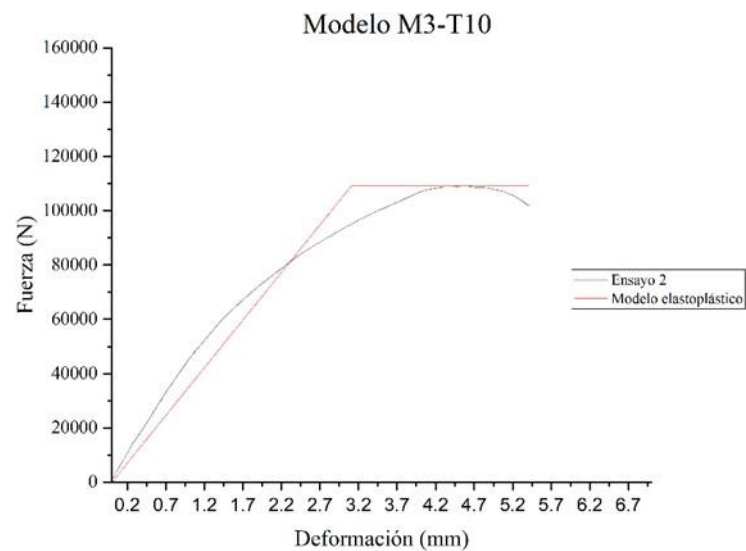
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M3-T10 ensayo 1



Nota: Elaboración propia

Gráfica 73

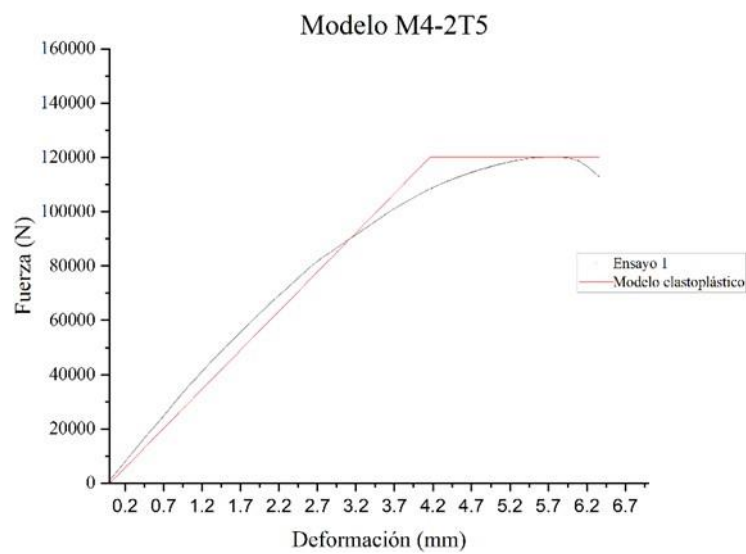
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M3-T10 ensayo 2



Nota: Elaboración propia

Gráfica 74

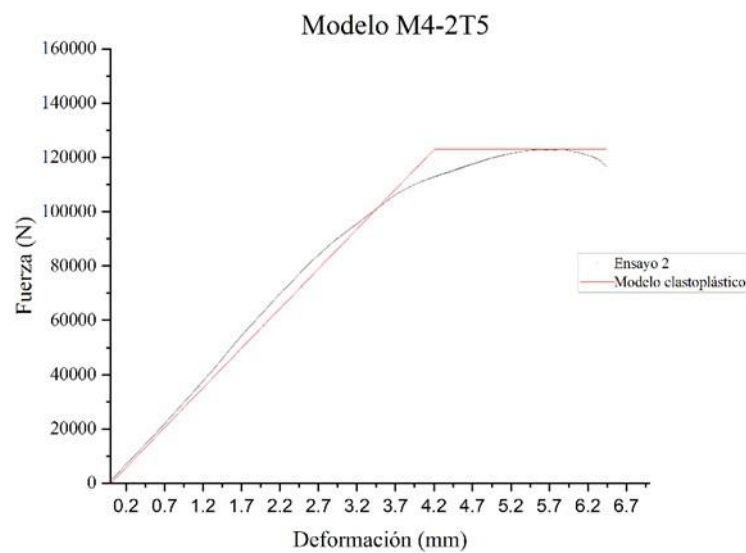
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M4-2T5 ensayo 1



Nota: Elaboración propia

Gráfica 75

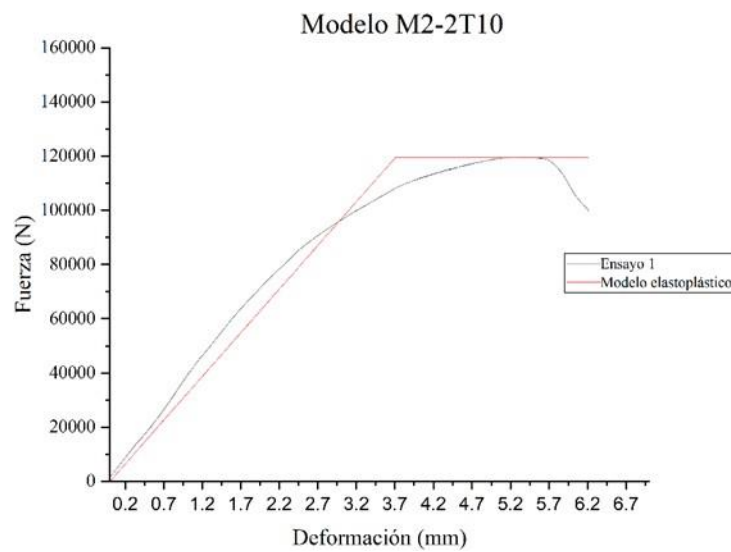
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M4-2T5 ensayo 2



Nota: Elaboración propia

Gráfica 76

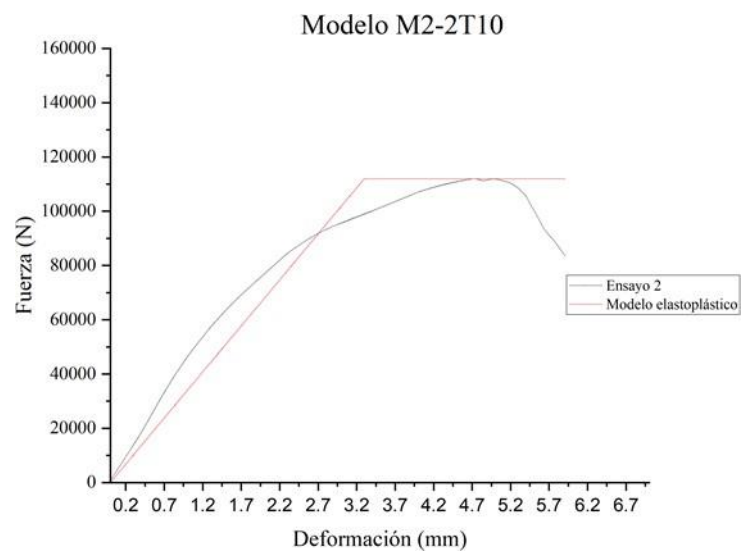
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-2T10 ensayo 1



Nota: Elaboración propia

Gráfica 77

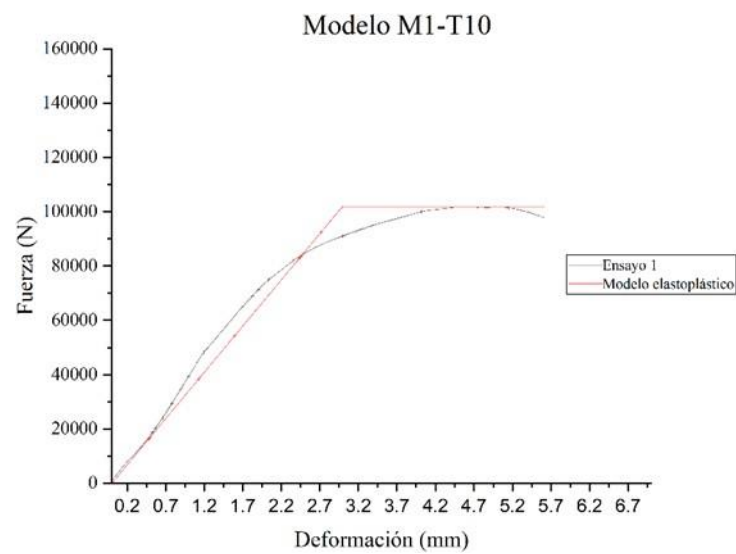
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-2T10 ensayo 2



Nota: Elaboración propia

Gráfica 78

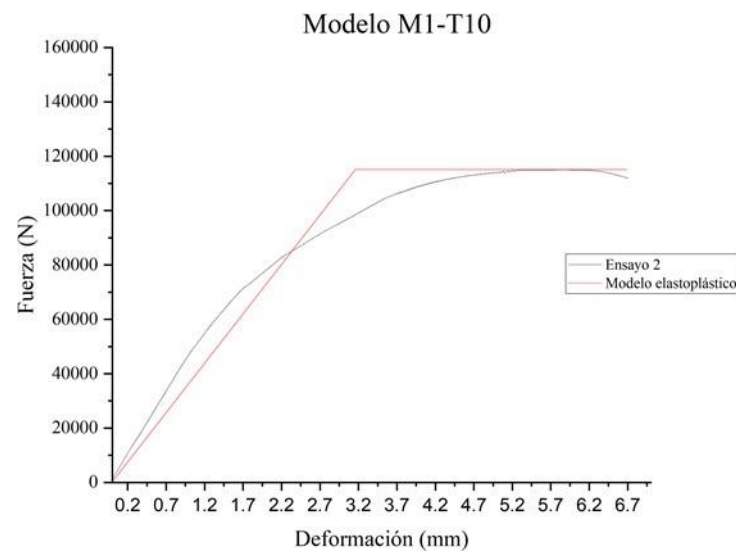
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M1-T10 ensayo 1



Nota: Elaboración propia

Gráfica 79

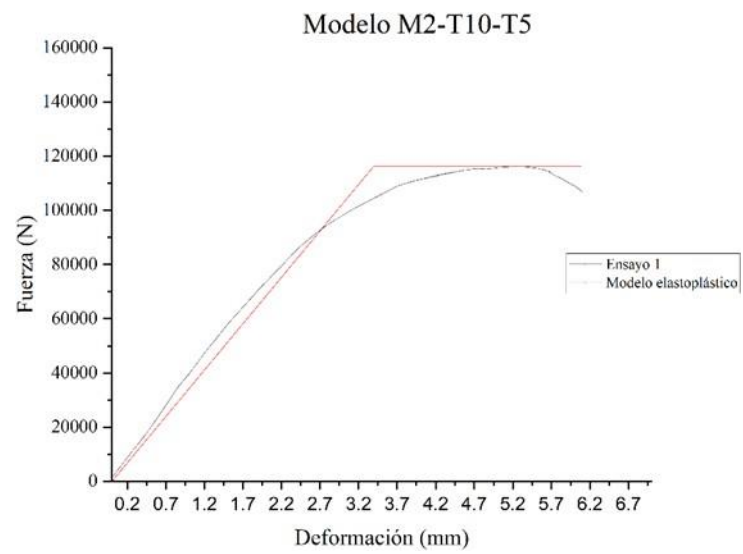
Gráfica fuerza vs deformación de probetas M1-T10 ensayo 2



Nota: Elaboración propia

Gráfica 80

Gráfica fuerza vs deformación de probetas M2-T10-T5 ensayo 1



Nota: Elaboración propia

CAPÍTULO V

5. Conclusiones

- Se construyó y ensayó 42 modelos de vigas altas con propiedades semejantes en base a lo establecido en el ACI 318-19 en donde se aseguró condiciones controladas que garantizan la similitud geométrica y material en los modelos referenciados. Este enfoque estableció una base sólida para la realización de ensayos y cálculos teóricos, validando el comportamiento de los modelos estructurales en condiciones experimentales.
- Se analizó los ensayos realizados en cada modelo de viga alta y se concluyó que 40 de las 42 vigas ensayadas mostraron fallas por aplastamiento en la zona de aplicación de carga a diferencia de la probeta M1-T5 y la probeta M3-T5, las cuales constructivamente presentaban una cuantía de 0.015 y 0.024 respectivamente, estos dos tipos de modelos presentaron una falla a cortante en el apoyo derecho lo cual se atribuyó a un incorrecto ajuste en la ubicación de los apoyos en la máquina de ensayos. Esto evidencia que la correcta calibración de las vigas en la máquina de ensayos es un factor de alta importancia el estudio de estas.
- Se evaluó y observó que el 100% de las vigas exhibieron una tendencia de agrietamiento paralela al eje de los puntales mostrados en el esquema del modelo 1, sin embargo, los modelos M1, M2, M3 presentaron un patrón adicional de agrietamiento perpendicular al eje longitudinal de las vigas, dichos anchos no superaron los 0.8 mm al 100% de la carga. Estos modelos de vigas presentaron una cuantía de 0.013, 0.017, y 0.023 respectivamente en donde se evidenció un ancho de grietas que varía desde 0 mm al 25 % de la carga aplicada a 0.65, 0.8, 1 mm respectivamente al 100 % de la carga.
- Se definió que el Modelo Puntal Tensor 1 asemeja de manera teórica el comportamiento real de las vigas altas ensayadas, presentando un rango entre el 3.71% al 37.47 % de diferencia entre la carga máxima teórica (P_{ACI}) y la carga

ultima (Pu) ensayada, mostrando así una falla por aplastamiento en el nodo 2 por la aplicación de la carga en el 95 % de los modelos, patrón común que se observa en el cálculo como durante los ensayos. La concordancia entre los modelos teóricos y los resultados experimentales proporciona una base sólida para futuras investigaciones y optimizaciones en el diseño de vigas altas, contribuyendo así al desarrollo de estructuras más seguras y eficientes.

- Analizando los resultados de los ensayos se indican que el modelo M2 posee una ductilidad igual a 1.24, modelo constructivamente presenta una cuantía horizontal de 0.017, a diferencia del modelo M1-T10 modelo que presenta la mayor ductilidad con un valor de 2.1 como máximo valor registrado en todos los modelos y con una cuantía de acero 0.020. Esto sugiere que las configuraciones con varillas como refuerzo longitudinal adicional mejoran significativamente el desempeño estructural. La mayoría de los modelos muestran índices de ductilidad aceptables, con valores entre 1.24 y 2.10, siendo los superiores a 1.5 indicativos de un desempeño óptimo para aplicaciones que requieren alta tolerancia a deformaciones.

CAPÍTULO VI

6. Referencias

Allen, L., DeWolf, J., & Huber, R. (2006). Análisis de vigas elásticas: Métodos para ignorar los efectos de la cortante en el comportamiento estructural. *Journal of Structural Engineering*, 132(3), 451-460. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:3\(451\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:3(451))

American Concrete Institute. (2019). ACI 318-19: Building code requirements for structural concrete and commentary. American Concrete Institute. <https://doi.org/10.14359/51779751>

American Concrete Institute. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19). American Concrete Institute.

Azócar, R. (2004). Métodos de análisis de estructuras de concreto: Aplicación del modelo puntal-tensor en zonas de discontinuidad. Editorial Construcción y Diseño.

Collins, M. P., & Mitchell, D. (1997). The strut-and-tie model: A simplified approach for the analysis of concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, 123(3), 405-416. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:3\(405\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:3(405))

Holt, J. (2018). El modelo puntal-tensor en el diseño de estructuras de hormigón armado. *Journal of Structural Design and Analysis*, 47(2), 45-58. <https://doi.org/10.1016/j.jsda.2018.04.002>

Mattheib, S. (1980). El hormigón armado: Combinación de las ventajas del hormigón y el acero para resistir compresión y tracción. *Revista de Ingeniería Estructural*, 12(3), 45-56.

Mott, R. (2004). Análisis y diseño de vigas bajo flexión: Principio de secciones planas y deformaciones en estructuras. *Journal of Structural Mechanics*, 34(4), 521-533. <https://doi.org/10.1016/j.structmech.2004.05.009>

Myhailov, I., Lenczner, P., & Weishaupt, D. (2010). Experimental study of shear behavior of deep beams designed with strut-and-tie models. *Journal of Structural Engineering*, 136(8), 951-961. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000243](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000243)

Nunilo, R., Pérez, M., & García, L. (2018). El acero estructural en la construcción civil: Características y aplicaciones en el refuerzo del hormigón. *Revista Internacional de Materiales de Construcción*, 24(1), 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.jmatconstru.2018.04.003>

Park, R., & Paulay, T. (1975). Reinforced concrete structures. Wiley-Interscience.

Puigdomènech Franquesa, A. (2003). Comportamiento plástico y deformaciones en estructuras: Un enfoque en las propiedades del hormigón armado. *Revista de Ingeniería Estructural*, 18(2), 245-257.

Rodríguez, F. (2007). Análisis y diseño estructural utilizando el modelo de puntales y tensores en zonas discontinuas. *Revista Internacional de Ingeniería Estructural*, 21(4), 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.jstructeng.2007.05.004>

Schlaich, J., Schäfer, K., & Jennewein, M. (1987). Toward a consistent design of structural concrete. *PCI Journal*, 32(3), 74-150. <https://doi.org/10.15554/pcij.05011987.74.150>

Todisco, M., & Karl-Heinz, L. (2015). Experimental investigation on the behavior of raised beams under shear and the application of strut-and-tie

models. *Journal of Concrete Structures*, 28(4), 392-406.
<https://doi.org/10.1016/j.jconstru.2015.03.009>

Vercesi, R., & Rougier, P. (2020). Comportamiento de vigas de gran altura de hormigón armado y hormigón reforzado con fibras, propuesta de trabajo experimental y numérico. *Revista de Ingeniería Estructural*, 45(1), 68-80. <https://doi.org/10.1016/j.jstructeng.2020.01.004>

Wang, C. K., & Salmon, C. G. (2007). *Concrete structures: Analysis and design* (6th ed.). Prentice Hall.

Winter, J. H., & Nilson, A. H. (1986). *Diseño y comportamiento del hormigón estructural*. Prentice-Hall.

INESA Tech. (s. f.). Método puntal-tensor: Cabezal de puente en SAP2000. Recuperado el [fecha de consulta], de <https://www.inesa-tech.com/blog/metodo-puntal-tensor-cabezal-puente-sap2000/>

CAPITULO VII

7. Anexos

Figura 22

Probeta M4-T8 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.

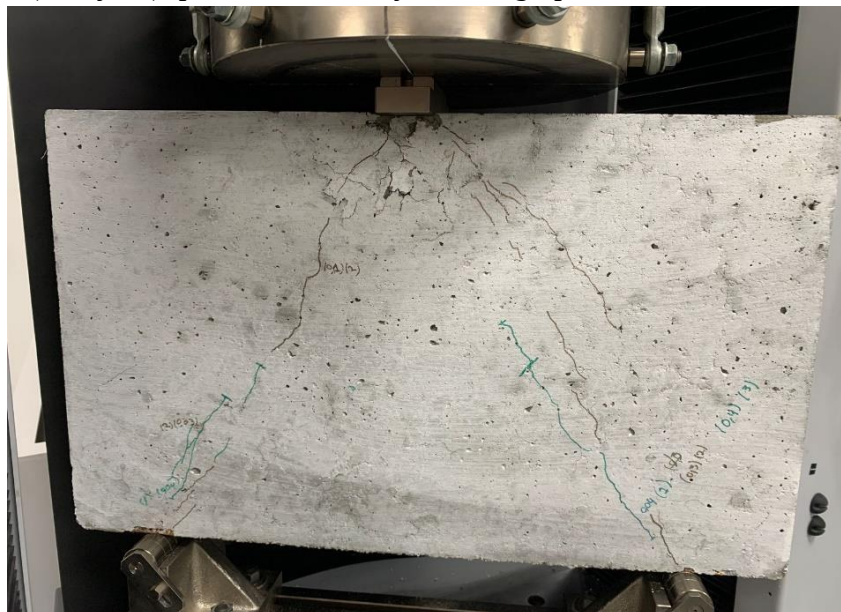


Figura 23

Probeta M4-T8 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

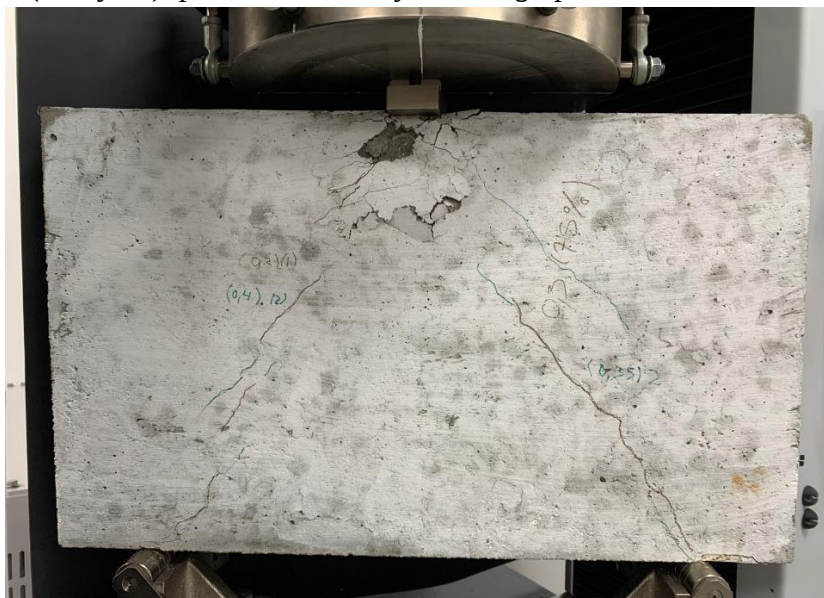


Figura 24

Probeta M2-2T5(ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.

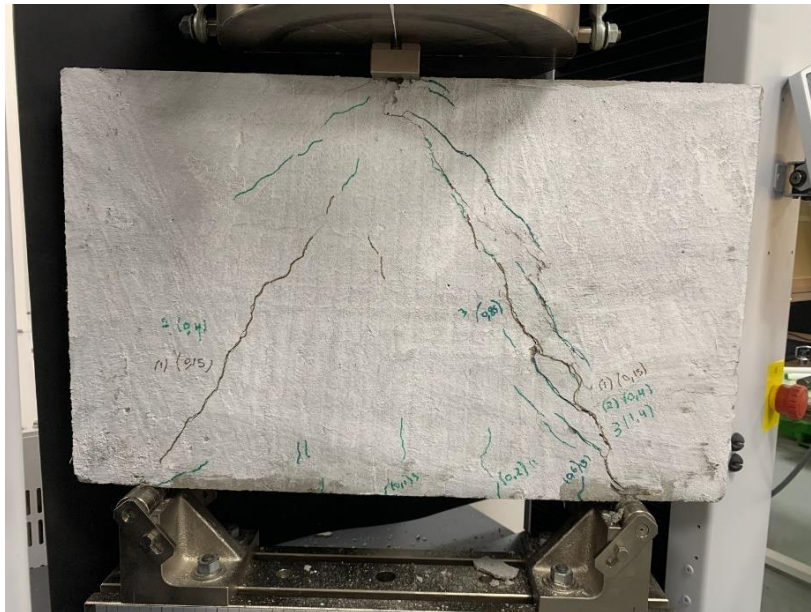


Figura 25

Probeta M2-2T5(ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.



Figura 26

Probeta M3-T8 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.

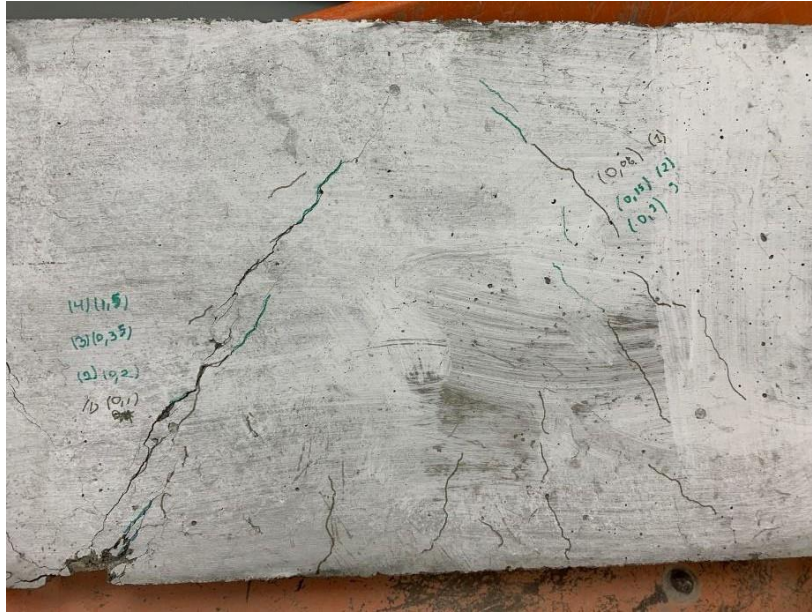


Figura 27

Probeta M3-T8 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

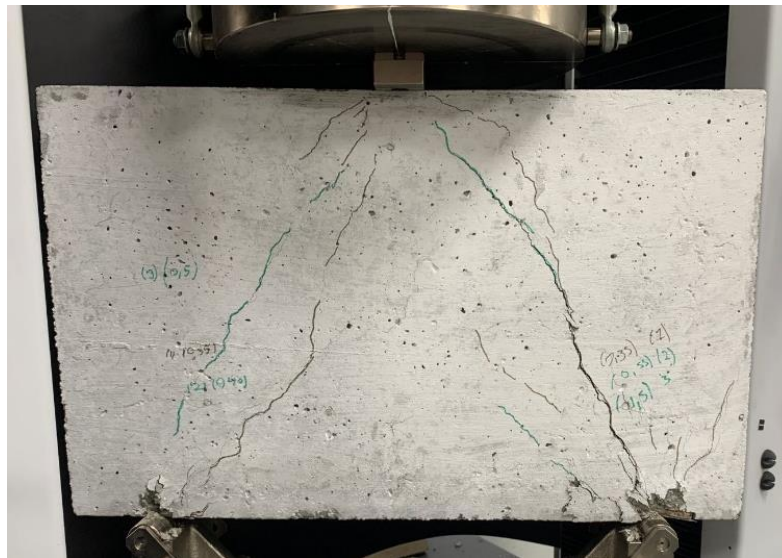


Figura 28

Probeta M3-T5 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual. Falla a corte

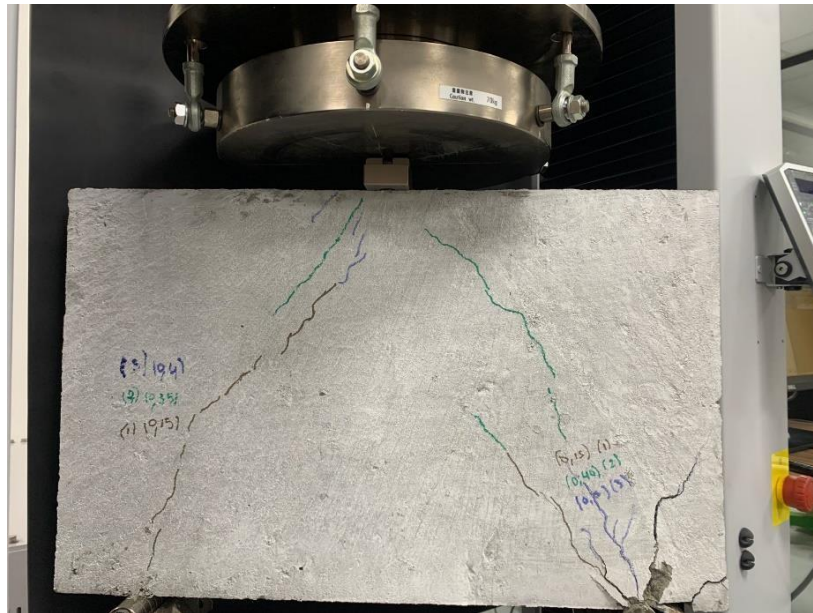


Figura 29

Probeta M3-T5 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

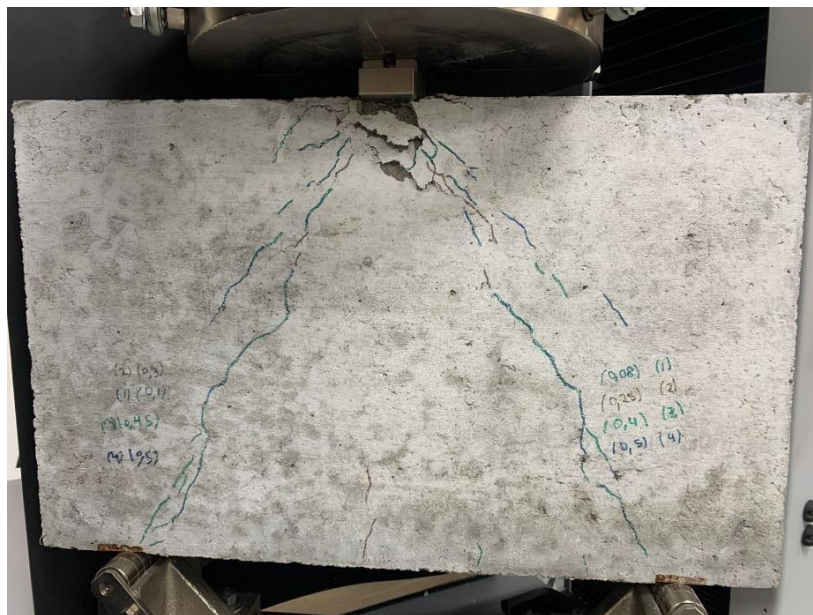


Figura 30

Probeta M1-T8 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.

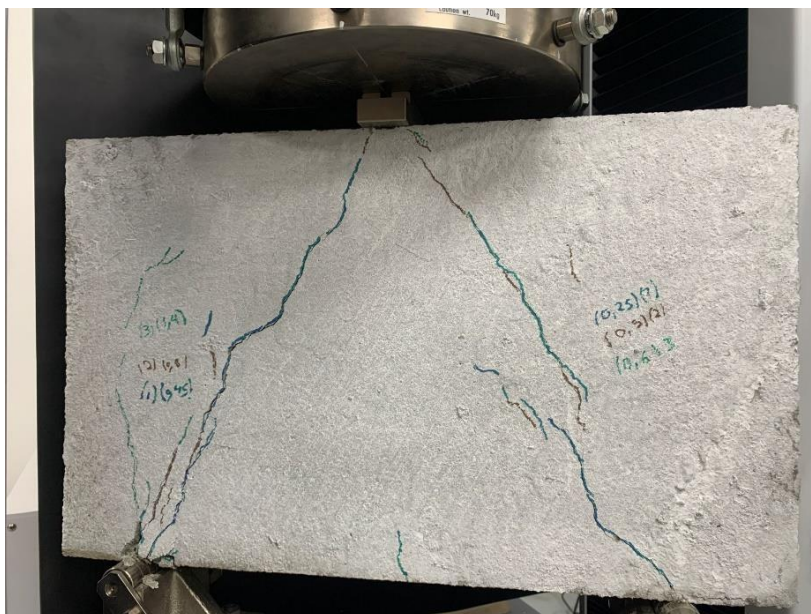


Figura 31

Probeta M1-T8 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

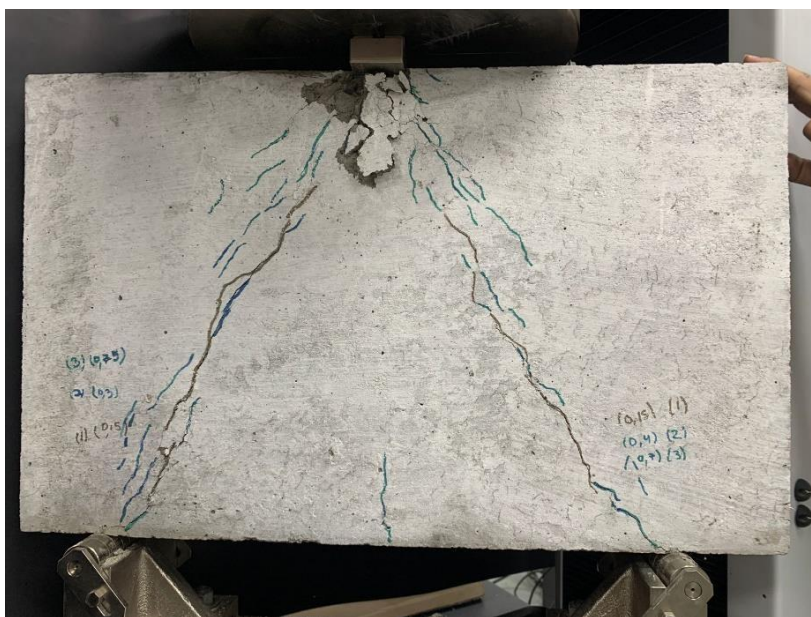


Figura 32

Probeta M1-T5 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.



Figura 33

Probeta M1-T5 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

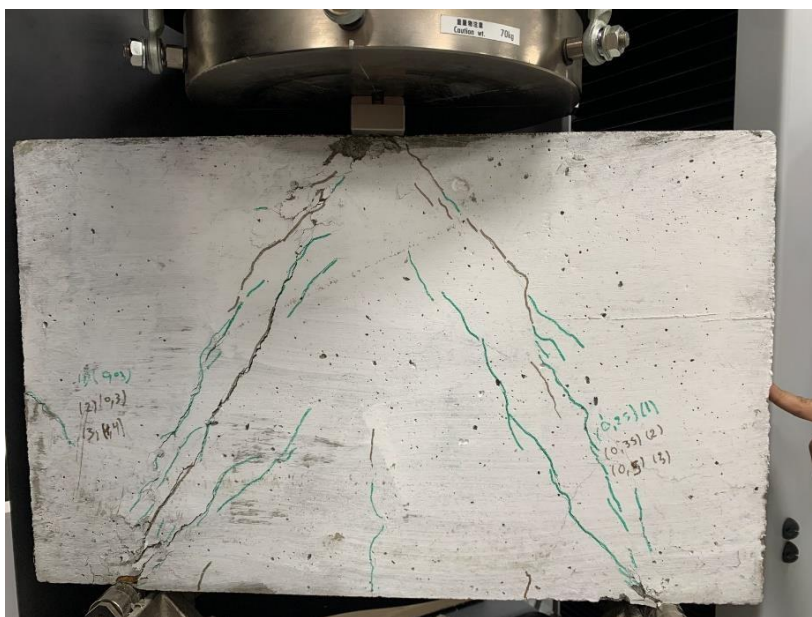


Figura 34

Probeta M1 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.

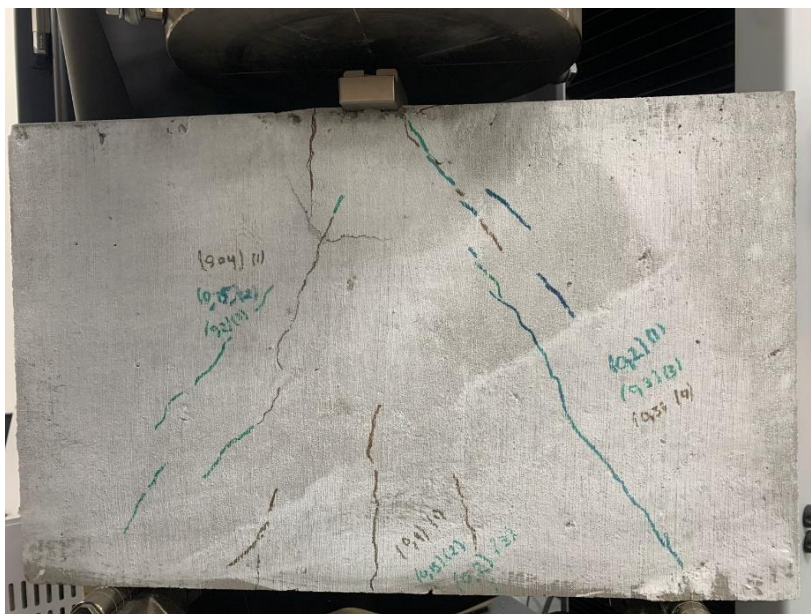


Figura 35

Probeta M1 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

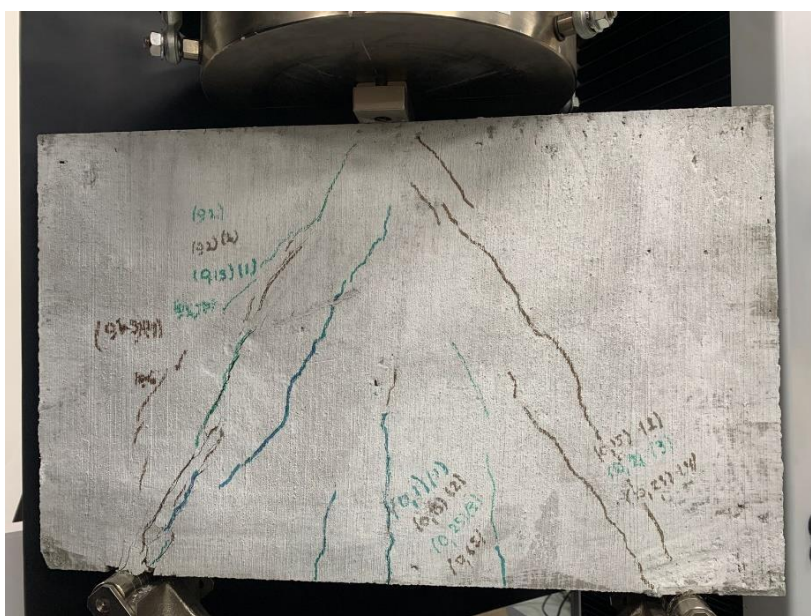


Figura 36

Probeta M2 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.

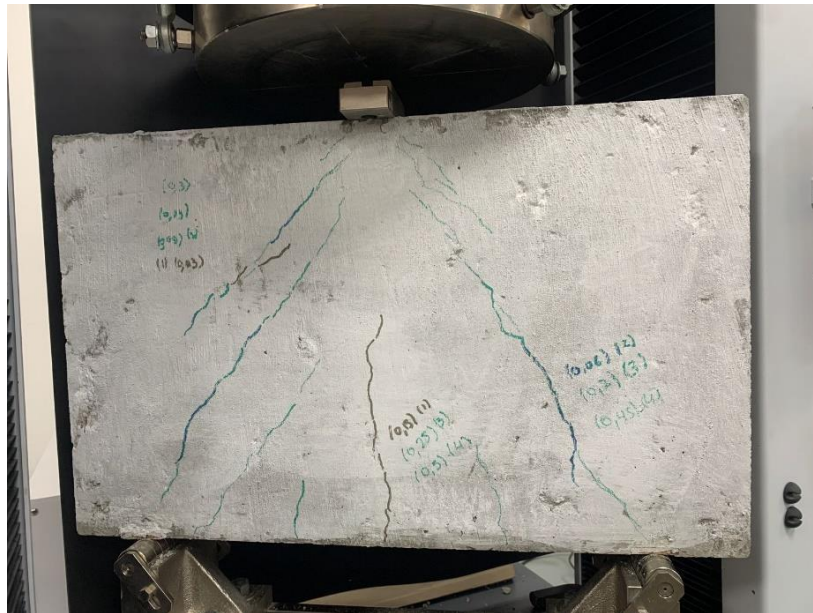


Figura 37

Probeta M2 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

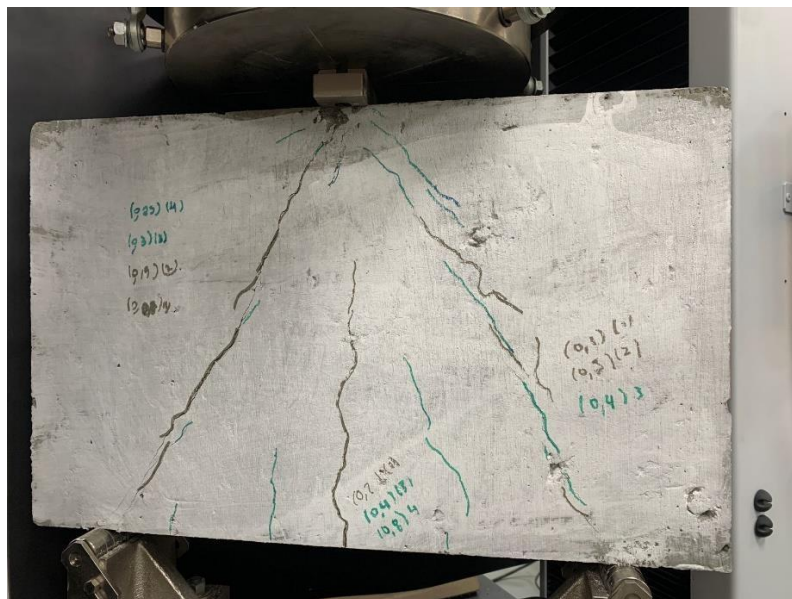


Figura 38

Probeta M3 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.

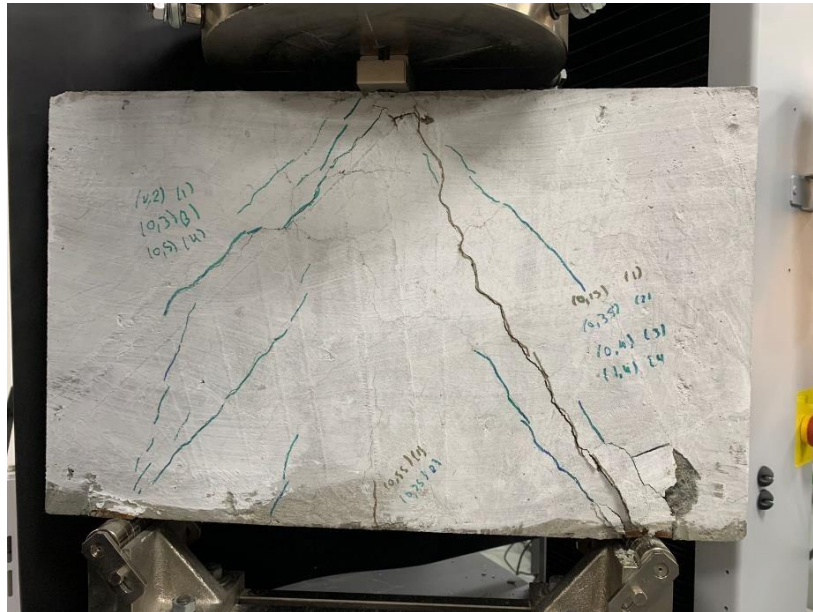


Figura 39

Probeta M3 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

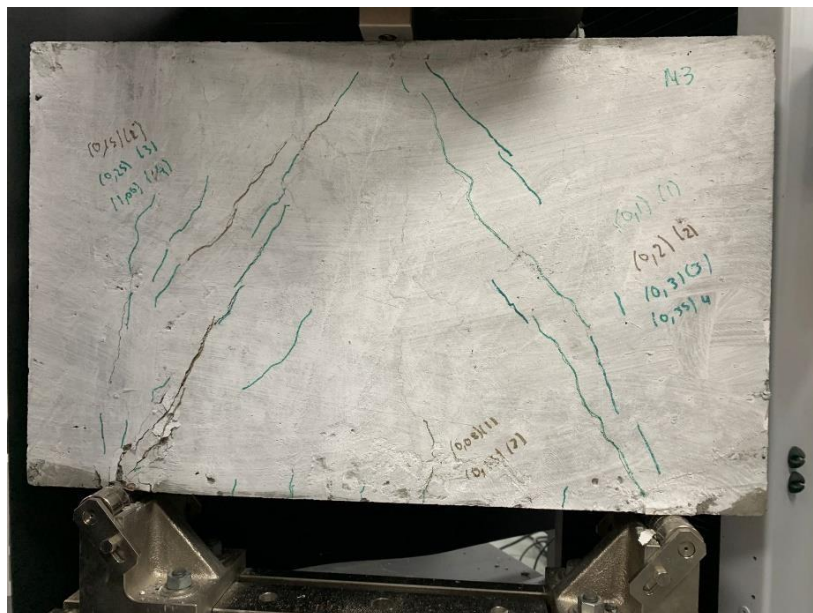


Figura 40

Probeta M4-T10 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.

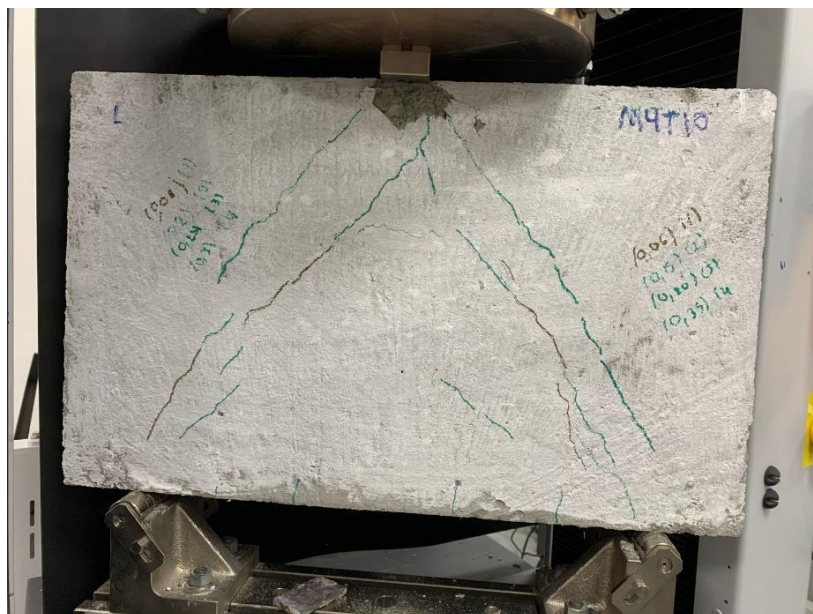


Figura 41

Probeta M4-T10 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

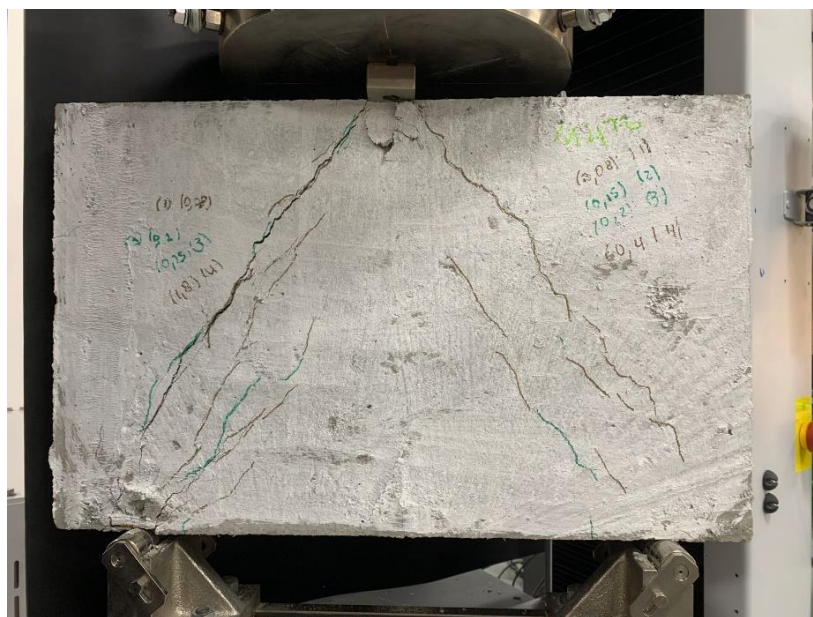


Figura 42

Probeta M4-T6 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.



Figura 43

Probeta M4-T6 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

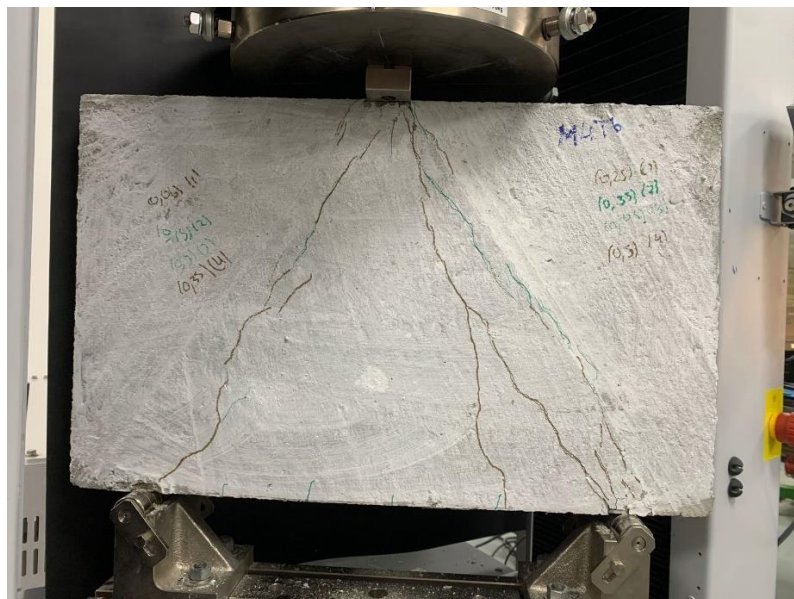


Figura 44

Probeta M1-T6 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.

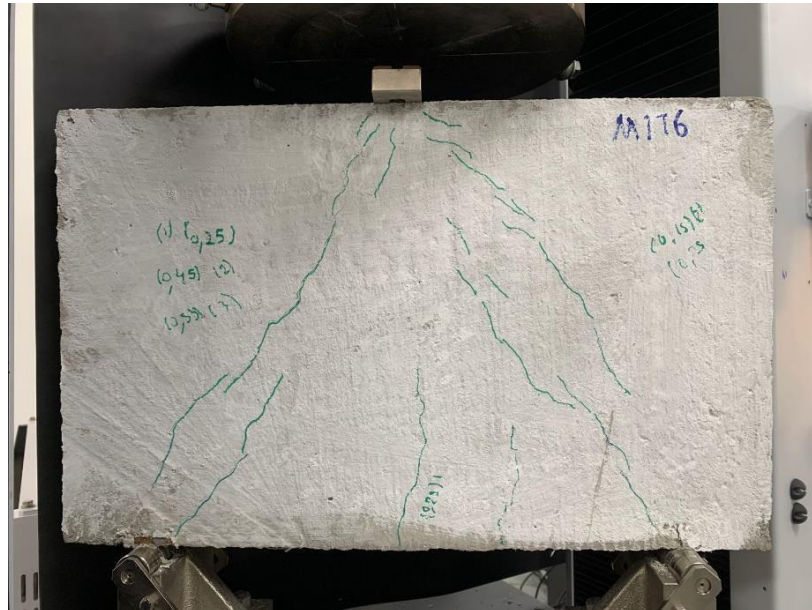


Figura 45

Probeta M1-T6 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

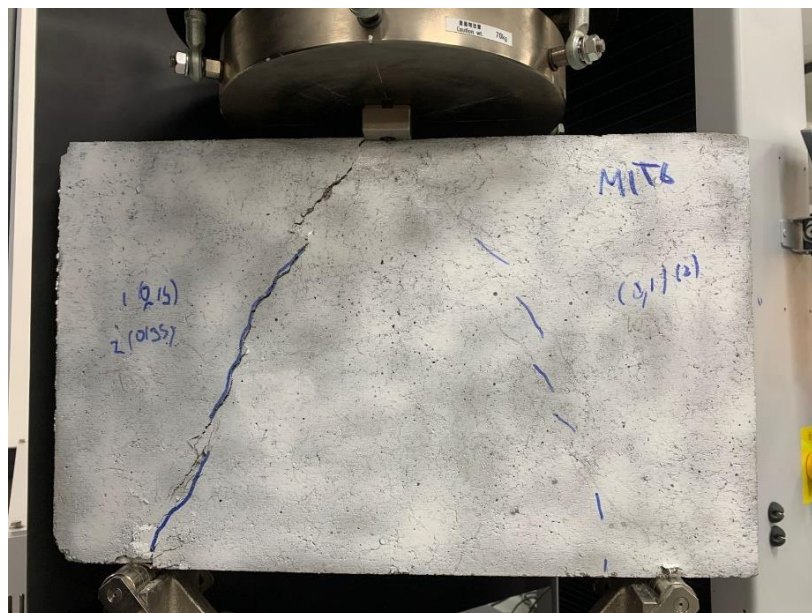


Figura 46

Probeta M3-T6 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.

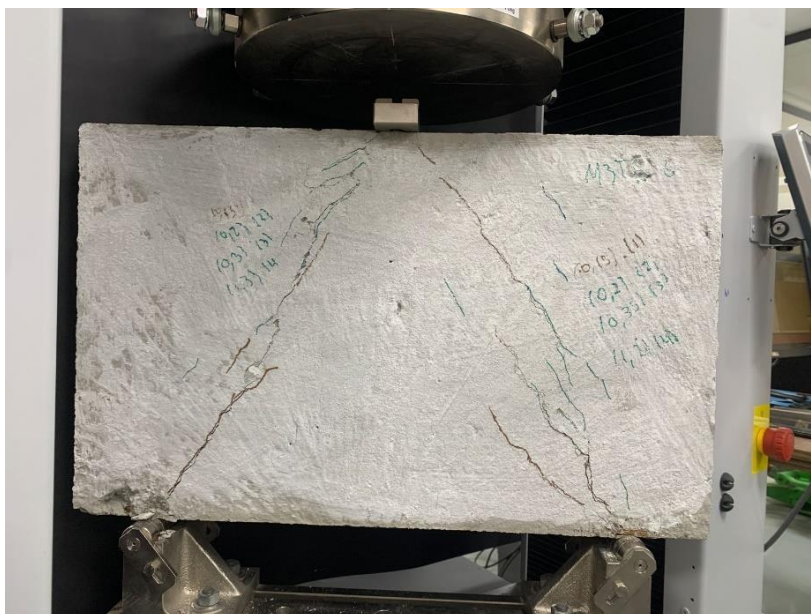


Figura 47

Probeta M3-T6 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

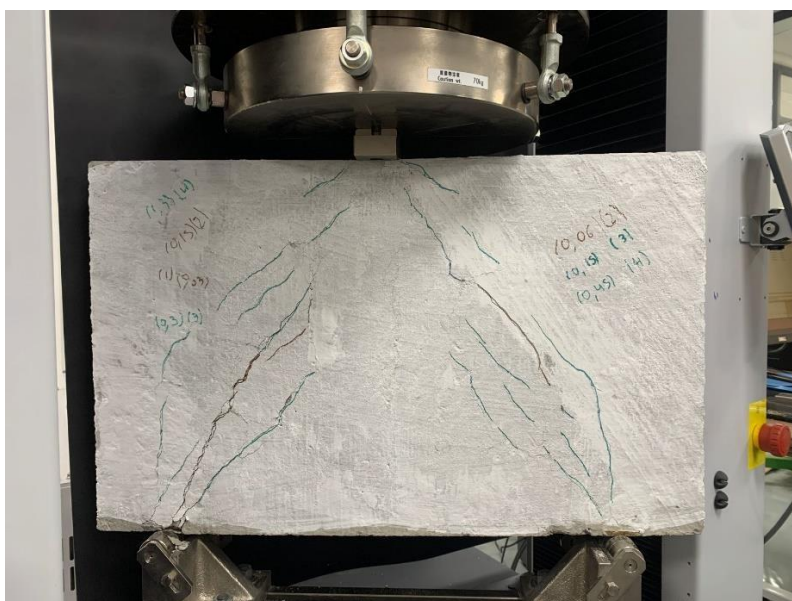


Figura 48

Probeta M2-T6 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.

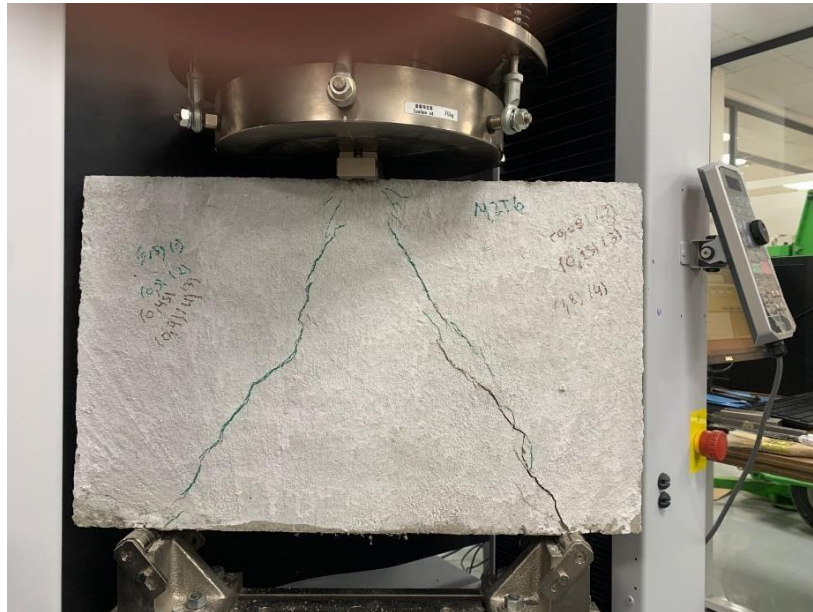


Figura 49

Probeta M2-T6 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

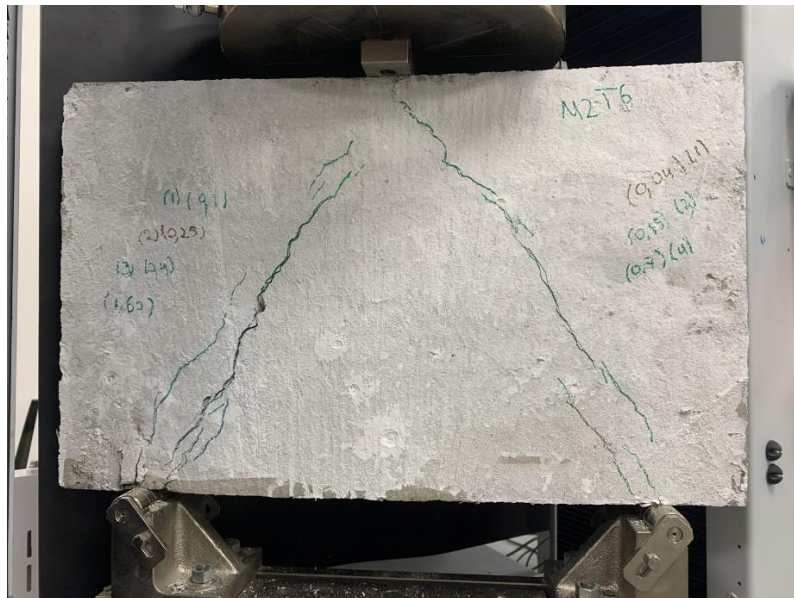


Figura 50

Probeta M2-T5 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.

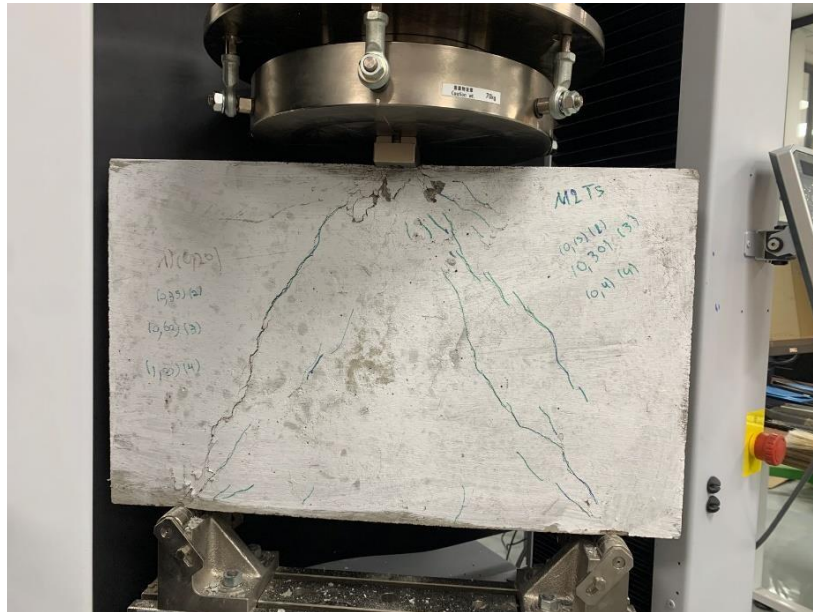


Figura 51

Probeta M2-T5 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

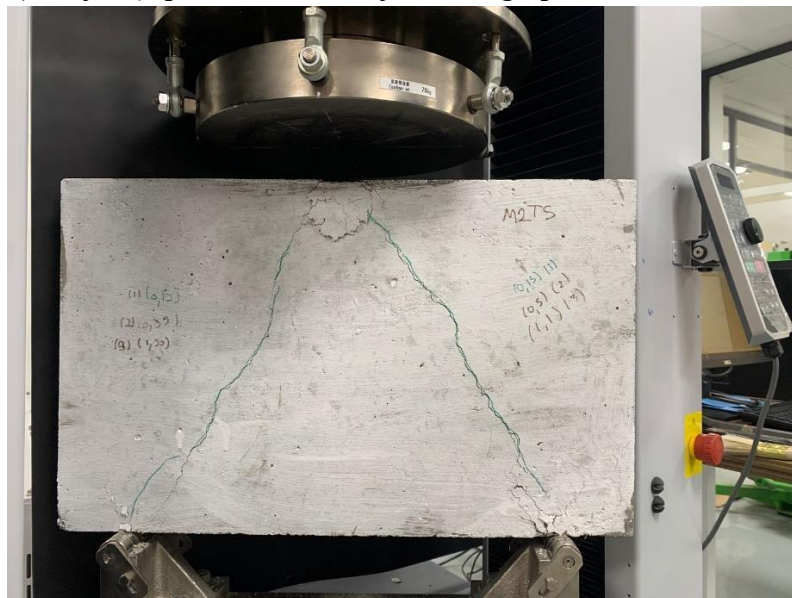


Figura 52

Probeta M2-T10 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.

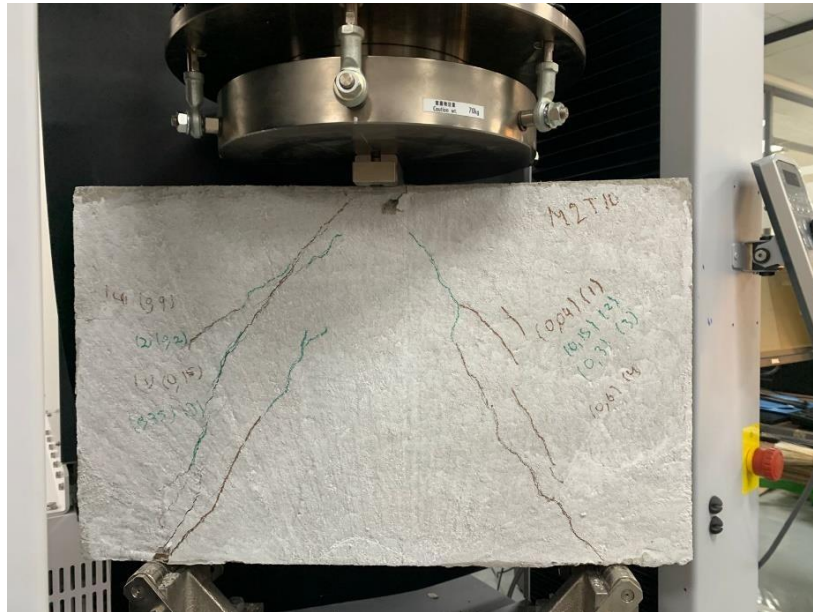


Figura 53

Probeta M2-T10 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual.

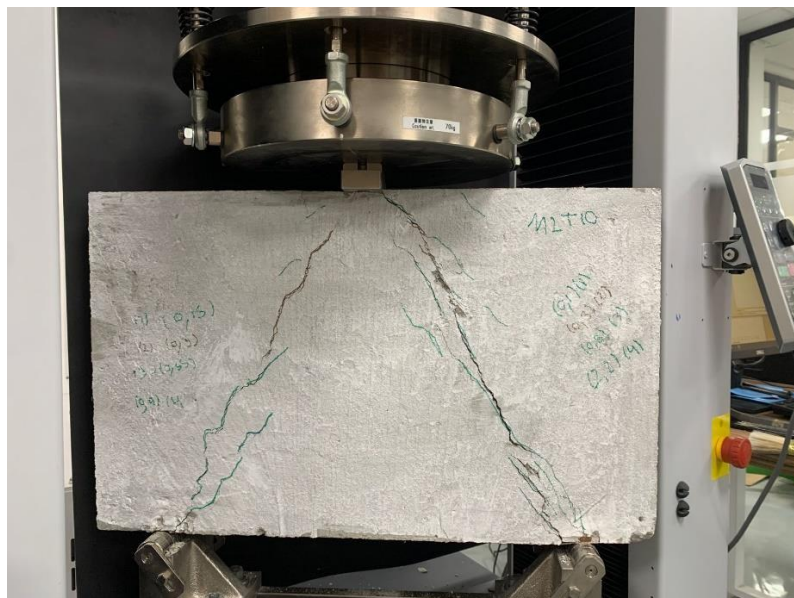


Figura 54

Probeta M4-2T5 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual.

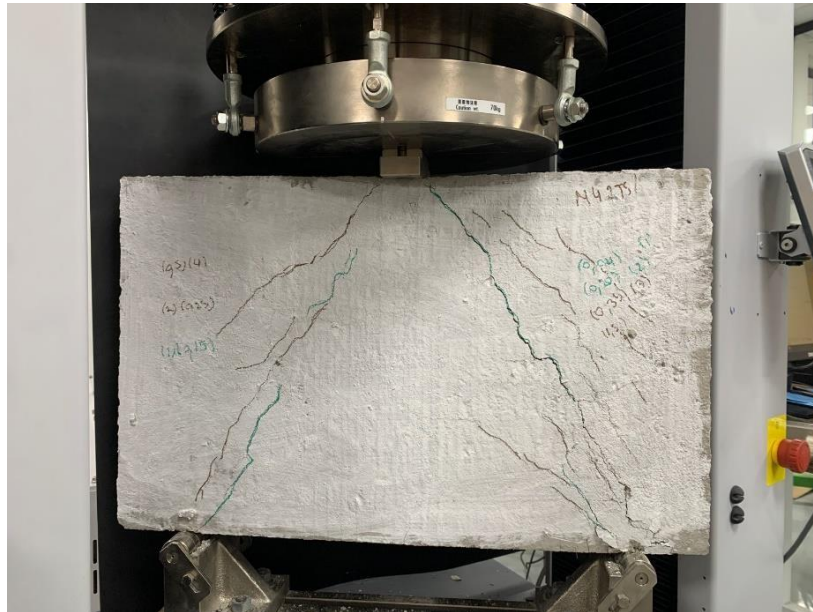


Figura 55

Probeta M4-2T5 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual

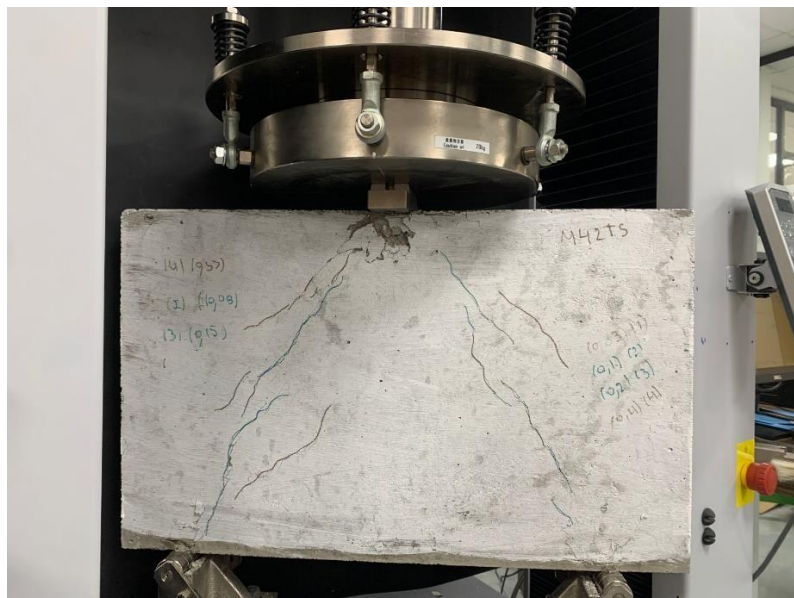


Figura 56

Probeta M1-T10 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual

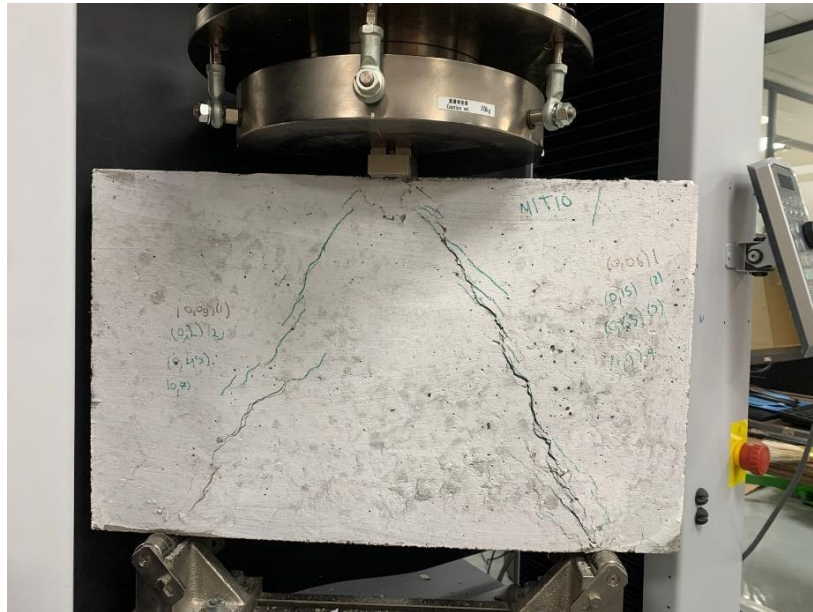


Figura 57

Probeta M1-T10 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual

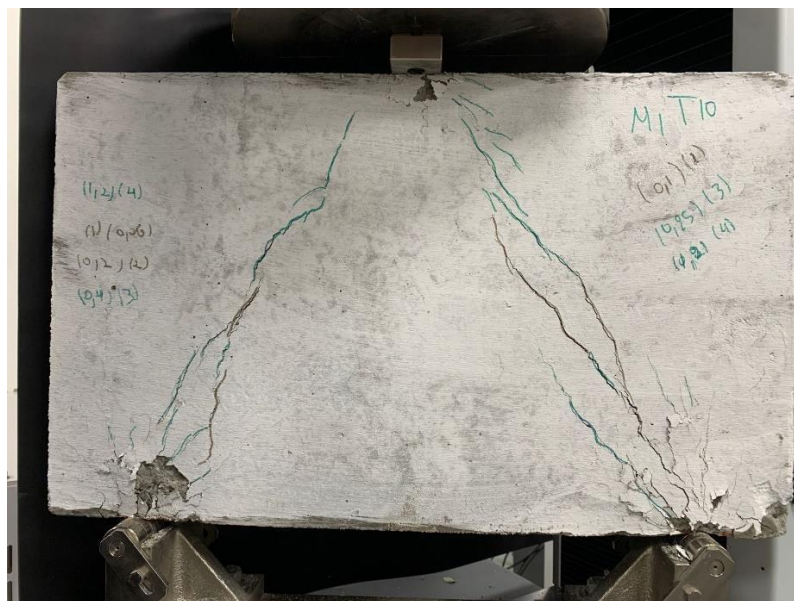


Figura 58

Probeta M2-T10-T5 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual

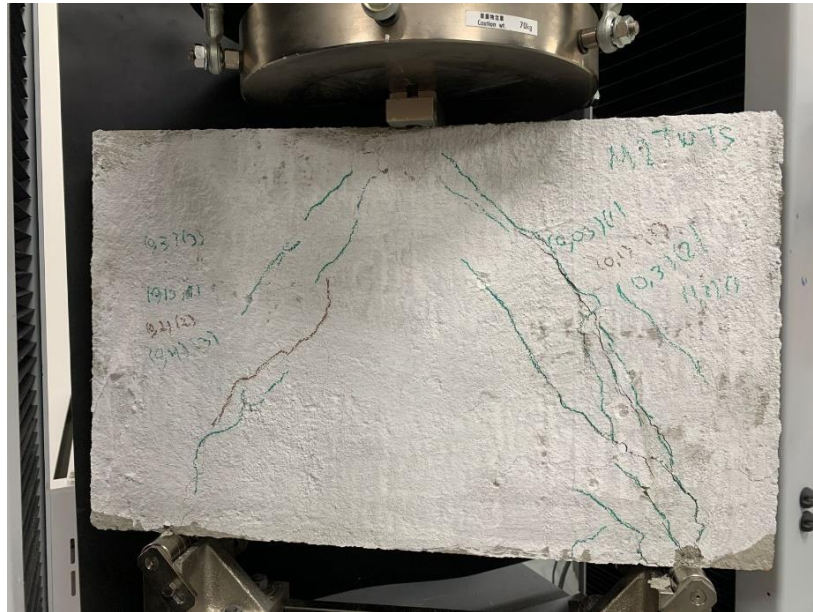


Figura 59

Probeta M2-T10-T5 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual

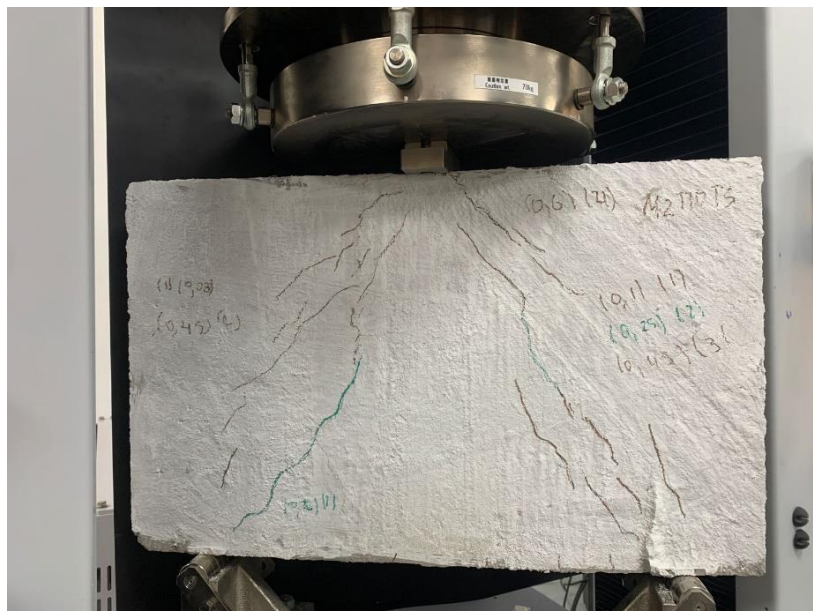


Figura 60

Probeta M2-2T10 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual

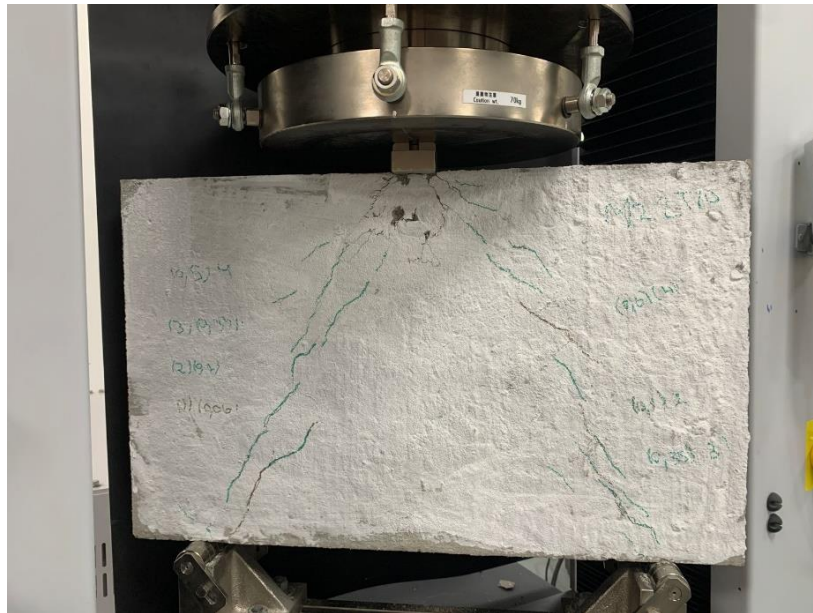
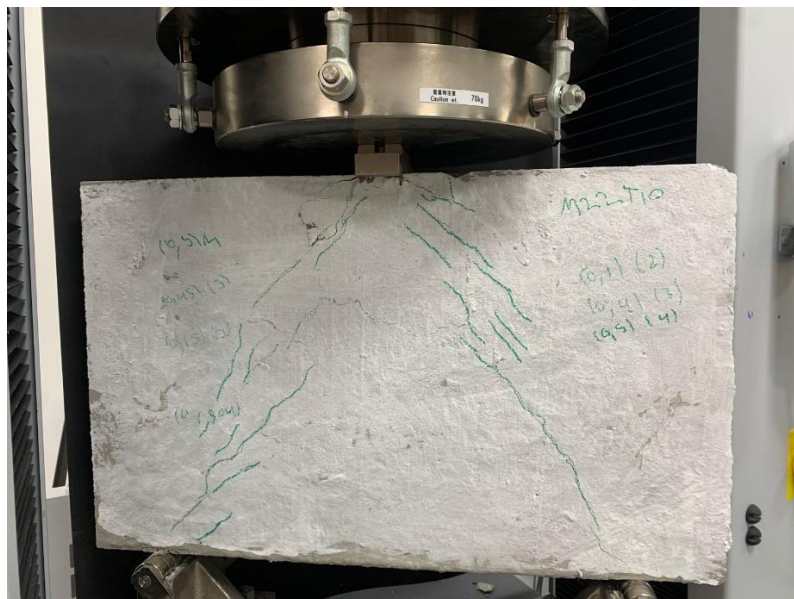


Figura 61

Probeta M2-2T10 (ensayo 2), posterior al ensayo de carga puntual



Probeta M3-T10 (ensayo 1), posterior al ensayo de carga puntual



Anexo 1

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 1, ensayo 1 (fragmento 1)

Características de los puntales 1-2						Puntal 1 (STRUT 1)		Puntal 2 (STRUT 2)		Tensor (TIE)			
MODELO	CANT. DE PROBETAS	a/d	F'c	Bc	Bs	fce	Acs1	Pp1	Acs2	Pp2	fy	Ats	Pt
		MPa				N/mm2	mm2	kN	mm2	kN	MPa	mm2	KN
M1	2	0.9	34.00	2.00	0.75	43.35	3161.28	137.04	2478.00	107.42	490.00	28.27	13.85
M2	2	0.9	34.00	2.00	0.75	43.35	2788.32	120.87	2157.84	93.54	490.00	38.48	18.86
M3	2	0.9	34.00	2.00	0.75	43.35	2478.00	107.42	2706.00	117.31	490.00	50.27	24.63
M1-T5	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	3223.44	98.64	2752.80	84.24	490.00	47.91	23.48
M4-T8	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2022.00	61.87	2502.00	76.56	490.00	128.81	63.11
M3-T8	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2334.00	71.42	2478.00	75.83	490.00	100.53	49.26
M3-T5	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2340.00	71.60	2664.00	81.52	490.00	69.90	34.25
M1-T8	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2694.00	82.44	2584.08	79.07	490.00	78.54	38.48
M2-2T5	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2610.00	79.87	2274.00	69.58	490.00	77.75	38.10
M1-T6	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2616.00	80.05	2886.00	88.31	490.00	56.55	27.71
M2-T6	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2717.28	83.15	2353.20	72.01	490.00	66.76	32.71
M2-T10	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2530.80	77.44	3409.92	104.34	490.00	117.02	57.34
M3-T6	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2274.00	69.58	3019.20	92.39	490.00	78.54	38.48
M4-T6	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2454.00	75.09	2268.00	69.40	490.00	106.81	52.34
M4-T10	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2880.00	88.13	3000.00	91.80	490.00	157.08	76.97
M2-T5	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2490.00	76.19	2130.00	65.18	490.00	58.12	28.48
M3-T10	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2823.84	86.41	2468.64	75.54	490.00	128.81	63.11
M4-2T5	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2244.00	68.67	2502.00	76.56	490.00	117.81	57.73
M2-2T10	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2508.00	76.74	3042.00	93.09	490.00	195.56	95.83
M1-T10	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2364.00	72.34	2472.00	75.64	490.00	106.81	52.34
M2-T10T5	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2664.00	81.52	2370.00	72.52	490.00	136.66	66.96

Anexo 2

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 1, ensayo 1 (fragmento 2)

MODELO	Nodo 1									
	Nodo 1 -Puntal 1					Nodo 1 -Apoyo				
	Bc	Bn	fce	Anz1	Pn11	Bc	Bn	Fce	Anz1	Pn12
			MPa	mm2	kN			MPa	mm2	kN
M1	2.00	0.80	46.24	3161.28	146.18	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
M2	2.00	0.80	46.24	2788.32	128.93	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
M3	2.00	0.80	46.24	2478.00	114.58	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
M1-T5	2.00	0.80	32.64	3223.44	105.21	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-T8	2.00	0.80	32.64	2022.00	66.00	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T8	2.00	0.80	32.64	2334.00	76.18	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T5	2.00	0.80	32.64	2340.00	76.38	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M1-T8	2.00	0.80	32.64	2694.00	87.93	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-2T5	2.00	0.80	32.64	2610.00	85.19	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M1-T6	2.00	0.80	32.64	2616.00	85.39	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T6	2.00	0.80	32.64	2717.28	88.69	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T10	2.00	0.80	32.64	2530.80	82.61	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T6	2.00	0.80	32.64	2274.00	74.22	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-T6	2.00	0.80	32.64	2454.00	80.10	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-T10	2.00	0.80	32.64	2880.00	94.00	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T5	2.00	0.80	32.64	2490.00	81.27	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T10	2.00	0.80	32.64	2823.84	92.17	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-2T5	2.00	0.80	32.64	2244.00	73.24	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-2T10	2.00	0.80	32.64	2508.00	81.86	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M1-T10	2.00	0.80	32.64	2364.00	77.16	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T10T5	2.00	0.80	32.64	2664.00	86.95	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02

Anexo 3

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 1, ensayo 1 (fragmento 3)

MODELO	Nodo 2														
	Nodo 2 -Puntal 1					Nodo 2 -Carga P					Nodo 2 - Puntal 2				
	Bc	Bn	Fce	Anz1	Pn21	Bc	Bn	fce	Anz1	Pn22	Bc	Bn	Fce	Anz1	Pn23
			MPa	mm2	kN			MPa	mm2	kN			MPa	mm2	kN
M1	2.00	1.00	57.80	3161.28	182.72	2.00	1.00	57.80	2400.00	138.72	2.00	1.00	57.80	2478.00	143.23
M2	2.00	1.00	57.80	2788.32	161.16	2.00	1.00	57.80	2400.00	138.72	2.00	1.00	57.80	2157.84	124.72
M3	2.00	1.00	57.80	2478.00	143.23	2.00	1.00	57.80	2400.00	138.72	2.00	1.00	57.80	2706.00	156.41
M1-T5	2.00	1.00	40.80	3223.44	131.52	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2752.80	112.31
M4-T8	2.00	1.00	40.80	2022.00	82.50	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2502.00	102.08
M3-T8	2.00	1.00	40.80	2334.00	95.23	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2478.00	101.10
M3-T5	2.00	1.00	40.80	2340.00	95.47	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2664.00	108.69
M1-T8	2.00	1.00	40.80	2694.00	109.92	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2584.08	105.43
M2-2T5	2.00	1.00	40.80	2610.00	106.49	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2274.00	92.78
M1-T6	2.00	1.00	40.80	2616.00	106.73	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2886.00	117.75
M2-T6	2.00	1.00	40.80	2717.28	110.87	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2353.20	96.01
M2-T10	2.00	1.00	40.80	2530.80	103.26	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	3409.92	139.12
M3-T6	2.00	1.00	40.80	2274.00	92.78	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	3019.20	123.18
M4-T6	2.00	1.00	40.80	2454.00	100.12	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2268.00	92.53
M4-T10	2.00	1.00	40.80	2880.00	117.50	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	3000.00	122.40
M2-T5	2.00	1.00	40.80	2490.00	101.59	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2130.00	86.90
M3-T10	2.00	1.00	40.80	2823.84	115.21	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2468.64	100.72
M4-2T5	2.00	1.00	40.80	2244.00	91.56	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2502.00	102.08
M2-2T10	2.00	1.00	40.80	2508.00	102.33	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	3042.00	124.11
M1-T10	2.00	1.00	40.80	2364.00	96.45	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2472.00	100.86
M2-T10T5	2.00	1.00	40.80	2664.00	108.69	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2370.00	96.70

Anexo 4

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 1, ensayo 1 (fragmento 4)

Nodo 3										
Nodo 3 -Puntal 2						Nodo 3 -Apoyo				
MODELO	Bc	Bn	fce	Anz1	Pn31	Bc	Bn	fce	Anz1	Pn32
			MPa	mm2	kN			MPa	mm2	kN
M1	2.00	0.80	46.24	2478.00	114.58	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
M2	2.00	0.80	46.24	2157.84	99.78	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
M3	2.00	0.80	46.24	2706.00	125.13	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
M1-T5	2.00	0.80	32.64	2752.80	89.85	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-T8	2.00	0.80	32.64	2502.00	81.67	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T8	2.00	0.80	32.64	2478.00	80.88	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T5	2.00	0.80	32.64	2664.00	86.95	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M1-T8	2.00	0.80	32.64	2584.08	84.34	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-2T5	2.00	0.80	32.64	2274.00	74.22	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M1-T6	2.00	0.80	32.64	2886.00	94.20	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T6	2.00	0.80	32.64	2353.20	76.81	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T10	2.00	0.80	32.64	3409.92	111.30	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T6	2.00	0.80	32.64	3019.20	98.55	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-T6	2.00	0.80	32.64	2268.00	74.03	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-T10	2.00	0.80	32.64	3000.00	97.92	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T5	2.00	0.80	32.64	2130.00	69.52	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T10	2.00	0.80	32.64	2468.64	80.58	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-2T5	2.00	0.80	32.64	2502.00	81.67	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-2T10	2.00	0.80	32.64	3042.00	99.29	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M1-T10	2.00	0.80	32.64	2472.00	80.69	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T10T5	2.00	0.80	32.64	2370.00	77.36	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02

Anexo 5

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 1, ensayo 2 (fragmento 1)

MODELO	CANT. DE PROBETAS	Características de los puntales 1-2						Puntal 1 (STRUT 1)		Puntal 2 (STRUT 2)		Tensor (TIE)	
		a/d	F'c	Bc	Bs	Fce	Acs1	Pp1	Acs2	Pp2	fy	Ats	Pt
			MPa			N/mm2	mm2	kN	mm2	kN	MPa	cm2	KN
M1	2	0.9	34.00	2.00	0.75	43.35	3205.68	138.97	2601.84	112.79	490.00	28.27	13.85
M2	2	0.9	34.00	2.00	0.75	43.35	2353.20	102.01	2752.80	119.33	490.00	38.48	18.86
M3	2	0.9	34.00	2.00	0.75	43.35	2502.00	108.46	2682.00	116.26	490.00	50.27	24.63
M1-T5	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2672.88	81.79	3427.68	104.89	490.00	47.91	23.48
M4-T8	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2562.00	78.40	3006.00	91.98	490.00	128.81	63.11
M3-T8	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2112.00	64.63	2796.00	85.56	490.00	100.53	49.26
M3-T5	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2544.00	77.85	2400.00	73.44	490.00	69.90	34.25
M1-T8	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2382.00	72.89	2514.00	76.93	490.00	78.54	38.48
M2-2T5	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2694.00	82.44	2292.00	70.14	490.00	77.75	38.10
M1-T6	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2670.00	81.70	2538.00	77.66	490.00	56.55	27.71
M2-T6	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2496.00	76.38	2418.00	73.99	490.00	66.76	32.71
M2-T10	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	3569.76	109.23	2486.40	76.08	490.00	117.02	57.34
M3-T6	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	3045.84	93.20	2841.60	86.95	490.00	78.54	38.48
M4-T6	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2530.80	77.44	2448.00	74.91	490.00	106.81	52.34
M4-T10	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2562.00	78.40	3018.00	92.35	490.00	157.08	76.97
M2-T5	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2514.00	76.93	2316.00	70.87	490.00	58.12	28.48
M3-T10	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2841.60	86.95	2246.64	68.75	490.00	128.81	63.11
M4-2T5	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	3000.00	91.80	2172.00	66.46	490.00	117.81	57.73
M2-2T10	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2502.00	76.56	2472.00	75.64	490.00	195.56	95.83
M1-T10	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2335.44	71.46	2539.68	77.71	490.00	106.81	52.34
M2-T10T5	2	0.9	24.00	2.00	0.75	30.60	2340.00	71.60	2784.00	85.19	490.00	136.66	66.96

Anexo 6

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 1, ensayo 2 (fragmento 2)

Nodo 1										
Nodo 1 -Puntal 1						Nodo 1 -Apoyo				
MODELO	Bc	Bn	Fce	Anz1	Pn11	Bc	Bn	Fce	Anz1	Pn12
			MPa	mm2	kN			MPa	mm2	kN
M1	2.00	0.80	46.24	3205.68	148.23	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
M2	2.00	0.80	46.24	2353.20	108.81	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
M3	2.00	0.80	46.24	2502.00	115.69	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
M1-T5	2.00	0.80	32.64	2672.88	87.24	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-T8	2.00	0.80	32.64	2562.00	83.62	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T8	2.00	0.80	32.64	2112.00	68.94	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T5	2.00	0.80	32.64	2544.00	83.04	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M1-T8	2.00	0.80	32.64	2382.00	77.75	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-2T5	2.00	0.80	32.64	2694.00	87.93	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M1-T6	2.00	0.80	32.64	2670.00	87.15	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T6	2.00	0.80	32.64	2496.00	81.47	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T10	2.00	0.80	32.64	3569.76	116.52	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T6	2.00	0.80	32.64	3045.84	99.42	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-T6	2.00	0.80	32.64	2530.80	82.61	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-T10	2.00	0.80	32.64	2562.00	83.62	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T5	2.00	0.80	32.64	2514.00	82.06	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T10	2.00	0.80	32.64	2841.60	92.75	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-2T5	2.00	0.80	32.64	3000.00	97.92	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-2T10	2.00	0.80	32.64	2502.00	81.67	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M1-T10	2.00	0.80	32.64	2335.44	76.23	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T10T5	2.00	0.80	32.64	2340.00	76.38	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02

Anexo 7

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 1, ensayo 2 (fragmento 3)

Nodo 2															
Nodo 2 -Puntal 1						Nodo 2 -Carga P					Nodo 2 - Puntal 2				
MODELO	Bc	Bn	fce	Anz1	Pn21	Bc	Bn	fce	Anz1	Pn22	Bc	Bn	fce	Anz1	Pn23
			MPa	mm2	kN			MPa	mm2	kN			MPa	mm2	kN
M1	2.00	1.00	57.80	3205.68	185.29	2.00	1.00	57.80	2400.00	138.72	2.00	1.00	57.80	2601.84	150.39
M2	2.00	1.00	57.80	2353.20	136.01	2.00	1.00	57.80	2400.00	138.72	2.00	1.00	57.80	2752.80	159.11
M3	2.00	1.00	57.80	2502.00	144.62	2.00	1.00	57.80	2400.00	138.72	2.00	1.00	57.80	2682.00	155.02
M1-T5	2.00	1.00	40.80	2672.88	109.05	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	3427.68	139.85
M4-T8	2.00	1.00	40.80	2562.00	104.53	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	3006.00	122.64
M3-T8	2.00	1.00	40.80	2112.00	86.17	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2796.00	114.08
M3-T5	2.00	1.00	40.80	2544.00	103.80	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92
M1-T8	2.00	1.00	40.80	2382.00	97.19	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2514.00	102.57
M2-2T5	2.00	1.00	40.80	2694.00	109.92	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2292.00	93.51
M1-T6	2.00	1.00	40.80	2670.00	108.94	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2538.00	103.55
M2-T6	2.00	1.00	40.80	2496.00	101.84	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2418.00	98.65
M2-T10	2.00	1.00	40.80	3569.76	145.65	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2486.40	101.45
M3-T6	2.00	1.00	40.80	3045.84	124.27	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2841.60	115.94
M4-T6	2.00	1.00	40.80	2530.80	103.26	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2448.00	99.88
M4-T10	2.00	1.00	40.80	2562.00	104.53	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	3018.00	123.13
M2-T5	2.00	1.00	40.80	2514.00	102.57	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2316.00	94.49
M3-T10	2.00	1.00	40.80	2841.60	115.94	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2246.64	91.66
M4-2T5	2.00	1.00	40.80	3000.00	122.40	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2172.00	88.62
M2-2T10	2.00	1.00	40.80	2502.00	102.08	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2472.00	100.86
M1-T10	2.00	1.00	40.80	2335.44	95.29	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2539.68	103.62
M2-T10T5	2.00	1.00	40.80	2340.00	95.47	2.00	1.00	40.80	2400.00	97.92	2.00	1.00	40.80	2784.00	113.59

Anexo 8

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 1, ensayo 2 (fragmento 4)

Nodo 3									
Nodo 3 -Puntal 2					Nodo 3 -Apoyo				
Bc	Bn	fce	Anz1	Pn31	Bc	Bn	fce	Anz1	Pn32
		MPa	mm2	kN			MPa	mm2	kN
2.00	0.80	46.24	2601.84	120.31	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
2.00	0.80	46.24	2752.80	127.29	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
2.00	0.80	46.24	2682.00	124.02	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
2.00	0.80	32.64	3427.68	111.88	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	3006.00	98.12	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2796.00	91.26	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2400.00	78.34	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2514.00	82.06	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2292.00	74.81	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2538.00	82.84	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2418.00	78.92	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2486.40	81.16	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2841.60	92.75	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2448.00	79.90	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	3018.00	98.51	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2316.00	75.59	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2246.64	73.33	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2172.00	70.89	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2472.00	80.69	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2539.68	82.90	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	0.80	32.64	2784.00	90.87	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02

Anexo 9

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 2 (fragmento 1)

MODELO	CANT. DE PROBETAS	a/d	Características de los puntales 1-3					Características del puntal 2		
			F'c	Fy	Bc	Bs	fce	Bc	Bs	fce
			MPa				MPa			
M1	2	0.9	34.00	4200.00	2.00	1.00	57.80	2.00	0.75	43.35
M2	2	0.9	34.00	4200.00	2.00	1.00	57.80	2.00	0.75	43.35
M3	2	0.9	34.00	4200.00	2.00	1.00	57.80	2.00	0.75	43.35
M1-T5	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M4-T8	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M3-T8	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M3-T5	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M1-T8	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M2-2T5	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M1-T6	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M2-T6	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M2-T10	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M3-T6	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M4-T6	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M4-T10	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M2-T5	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M3-T10	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M4-2T5	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M2-2T10	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M1-T10	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60
M2-T10T5	2	0.9	24.00	4200.00	2.00	1.00	40.80	2.00	0.75	30.60

Anexo 10

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 2 (fragmento 2)

Puntal 1 (STRUT 1)		Puntal 2 (STRUT 2)		Puntal 3 (STRUT 3)		Tensor 1		Tensor 2		Tensor 3	
Acs1	Pp1	Acs2	Pp2	Acs3	Pp3	Ats	Pt1	Ats	Pt2	Ats	Pt3
mm2	kN	mm2	kN	mm2	kN	mm2	kN	mm2	kN	cm2	kgf
3161.28	182.72	2308.80	100.09	2478.00	143.23	28.27	118.75	28.27	118.75	28.27	118.75
2788.32	161.16	2157.84	93.54	2157.84	124.72	38.48	161.63	38.48	161.63	38.48	161.63
2160.00	124.85	2706.00	117.31	2706.00	156.41	50.27	211.12	50.27	211.12	50.27	211.12
3223.44	131.52	2752.80	84.24	2752.80	112.31	28.27	118.75	28.27	118.75	47.91	201.22
2022.00	82.50	2502.00	76.56	2502.00	102.08	78.54	329.87	78.54	329.87	128.81	540.98
1950.00	79.56	2226.00	68.12	2478.00	101.10	50.27	211.12	50.27	211.12	100.53	422.23
2040.00	83.23	2664.00	81.52	2664.00	108.69	50.27	211.12	50.27	211.12	69.90	293.58
3605.28	147.10	2584.08	79.07	2584.08	105.43	28.27	118.75	28.27	118.75	78.54	329.87
2610.00	106.49	2112.00	64.63	2274.00	92.78	38.48	161.63	38.48	161.63	77.75	326.57
1320.00	53.86	1380.00	42.23	2886.00	117.75	28.27	118.75	28.27	118.75	56.55	237.50
2717.28	110.87	2353.20	72.01	2353.20	96.01	38.48	161.63	38.48	161.63	66.76	280.39
2530.80	103.26	3409.92	104.34	3409.92	139.12	38.48	161.63	38.48	161.63	117.02	491.50
2140.08	87.32	3019.20	92.39	3019.20	123.18	50.27	211.12	50.27	211.12	78.54	329.87
1838.16	75.00	2095.68	64.13	2268.00	92.53	78.54	329.87	78.54	329.87	106.81	448.62
2880.00	117.50	3000.00	91.80	3000.00	122.40	78.54	329.87	78.54	329.87	157.08	659.73
2490.00	101.59	2130.00	65.18	2130.00	86.90	38.48	161.63	38.48	161.63	58.12	244.10
2823.84	115.21	2468.64	75.54	2468.64	100.72	50.27	211.12	50.27	211.12	128.81	540.98
2244.00	91.56	2502.00	76.56	2502.00	102.08	78.54	329.87	78.54	329.87	117.81	494.80
1998.00	81.52	1842.00	56.37	3042.00	124.11	38.48	161.63	38.48	161.63	195.56	821.37
2211.12	90.21	2335.44	71.46	2472.00	100.86	28.27	118.75	28.27	118.75	106.81	448.62
2664.00	108.69	2370.00	72.52	2370.00	96.70	38.48	161.63	38.48	161.63	136.66	573.97

Anexo 11

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 2 (fragmento 3)

Nodo 1										
Nodo 1 -Puntal 1						Nodo 1 -Apoyo				
MODELO	Bc	Bn	fce	Anz1	Pn11	Bc	Bn	fce	Anz1	Pn12
			kg/cm2	cm2	ton			kg/cm2	cm2	ton
M1	2.00	0.80	46.24	3161.28	146.18	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
M2	2.00	1.80	104.04	2788.32	290.10	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
M3	2.00	2.80	161.84	2160.00	349.57	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
M1-T5	2.00	4.80	195.84	3223.44	631.28	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-T8	2.00	5.80	236.64	2022.00	478.49	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T8	2.00	6.80	277.44	1950.00	541.01	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T5	2.00	7.80	318.24	2040.00	649.21	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M1-T8	2.00	8.80	359.04	3605.28	1294.44	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-2T5	2.00	9.80	399.84	2610.00	1043.58	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M1-T6	2.00	10.80	440.64	1320.00	581.64	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T6	2.00	11.80	481.44	2717.28	1308.21	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T10	2.00	12.80	522.24	2530.80	1321.68	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T6	2.00	13.80	563.04	2140.08	1204.95	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-T6	2.00	14.80	603.84	1838.16	1109.95	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-T10	2.00	15.80	644.64	2880.00	1856.56	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T5	2.00	16.80	685.44	2490.00	1706.75	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M3-T10	2.00	17.80	726.24	2823.84	2050.79	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M4-2T5	2.00	18.80	767.04	2244.00	1721.24	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-2T10	2.00	19.80	807.84	1998.00	1614.06	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M1-T10	2.00	20.80	848.64	2211.12	1876.44	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
M2-T10T5	2.00	21.80	889.44	2664.00	2369.47	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02

Anexo 12

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 2 (fragmento 4)

Nodo 2					Nodo 3									
Nodo 2 -Puntal 1					Nodo 3 -Puntal 3					Nodo 3 -Apoyo				
Bc	Bn	fce	Anz1	Pn21	Bc	Bn	fce	Anz1	Pn31	Bc	Bn	fce	Anz1	Pn32
		MPa	Mm2	kN			MPa	Mm2	kN			MPa	Mm2	kN
2.00	0.80	46.24	3161.28	146.18	2.00	0.80	46.24	2478.00	114.58	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
2.00	1.80	104.04	2788.32	290.10	2.00	1.80	104.04	2157.84	224.50	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
2.00	2.80	161.84	2160.00	349.57	2.00	2.80	161.84	2706.00	437.94	1.90	0.80	43.93	3000.00	131.78
2.00	4.80	195.84	3223.44	631.28	2.00	4.80	195.84	2752.80	539.11	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	5.80	236.64	2022.00	478.49	2.00	5.80	236.64	2502.00	592.07	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	6.80	277.44	1950.00	541.01	2.00	6.80	277.44	2478.00	687.50	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	7.80	318.24	2040.00	649.21	2.00	7.80	318.24	2664.00	847.79	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	8.80	359.04	3605.28	1294.44	2.00	8.80	359.04	2584.08	927.79	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	9.80	399.84	2610.00	1043.58	2.00	9.80	399.84	2274.00	909.24	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	10.80	440.64	1320.00	581.64	2.00	10.80	440.64	2886.00	1271.69	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	11.80	481.44	2717.28	1308.21	2.00	11.80	481.44	2353.20	1132.92	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	12.80	522.24	2530.80	1321.68	2.00	12.80	522.24	3409.92	1780.80	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	13.80	563.04	2140.08	1204.95	2.00	13.80	563.04	3019.20	1699.93	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	14.80	603.84	1838.16	1109.95	2.00	14.80	603.84	2268.00	1369.51	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	15.80	644.64	2880.00	1856.56	2.00	15.80	644.64	3000.00	1933.92	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	16.80	685.44	2490.00	1706.75	2.00	16.80	685.44	2130.00	1459.99	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	17.80	726.24	2823.84	2050.79	2.00	17.80	726.24	2468.64	1792.83	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	18.80	767.04	2244.00	1721.24	2.00	18.80	767.04	2502.00	1919.13	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	19.80	807.84	1998.00	1614.06	2.00	19.80	807.84	3042.00	2457.45	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	20.80	848.64	2211.12	1876.44	2.00	20.80	848.64	2472.00	2097.84	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02
2.00	21.80	889.44	2664.00	2369.47	2.00	21.80	889.44	2370.00	2107.97	1.90	0.80	31.01	3000.00	93.02

Anexo 13

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 2 (fragmento 5)

Nodo 4					
Nodo 4 -Puntal 3					
	Bc	Bn	fce	Anz1	Pn41
MODELO					
M1	2.00	0.80	46.24	2478.00	114.58
M2	2.00	1.80	104.04	2157.84	224.50
M3	2.00	2.80	161.84	2706.00	437.94
M1-T5	2.00	4.80	195.84	2752.80	539.11
M4-T8	2.00	5.80	236.64	2502.00	592.07
M3-T8	2.00	6.80	277.44	2478.00	687.50
M3-T5	2.00	7.80	318.24	2664.00	847.79
M1-T8	2.00	8.80	359.04	2584.08	927.79
M2-2T5	2.00	9.80	399.84	2274.00	909.24
M1-T6	2.00	10.80	440.64	2886.00	1271.69
M2-T6	2.00	11.80	481.44	2353.20	1132.92
M2-T10	2.00	12.80	522.24	3409.92	1780.80
M3-T6	2.00	13.80	563.04	3019.20	1699.93
M4-T6	2.00	14.80	603.84	2268.00	1369.51
M4-T10	2.00	15.80	644.64	3000.00	1933.92
M2-T5	2.00	16.80	685.44	2130.00	1459.99
M3-T10	2.00	17.80	726.24	2468.64	1792.83
M4-2T5	2.00	18.80	767.04	2502.00	1919.13
M2-2T10	2.00	19.80	807.84	3042.00	2457.45
M1-T10	2.00	20.80	848.64	2472.00	2097.84
M2-T10T5	2.00	21.80	889.44	2370.00	2107.97

Anexo 14

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 2 (fragmento 6)

Nodo 5										
MODELO	Bc	Bn	Nodo 5-Puntal 2			Bc	Bn	Nodo 5 -Carga P		
			fce	Anz1	Pn51			fce	Anz1	Pn52
			MPa	mm2	kN			MPa	mm2	kN
M1	2.00	1.00	57.80	2308.80	133.45	2.00	1.00	68.00	3000.00	204.00
M2	2.00	2.00	115.60	2157.84	249.45	2.00	1.00	68.00	3000.00	204.00
M3	2.00	3.00	173.40	2706.00	469.22	2.00	1.00	68.00	3000.00	204.00
M1-T5	2.00	5.00	204.00	2752.80	561.57	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M4-T8	2.00	6.00	244.80	2502.00	612.49	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M3-T8	2.00	7.00	285.60	2226.00	635.75	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M3-T5	2.00	8.00	326.40	2664.00	869.53	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M1-T8	2.00	9.00	367.20	2584.08	948.87	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M2-2T5	2.00	10.00	408.00	2112.00	861.70	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M1-T6	2.00	11.00	448.80	1380.00	619.34	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M2-T6	2.00	12.00	489.60	2353.20	1152.13	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M2-T10	2.00	13.00	530.40	3409.92	1808.62	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M3-T6	2.00	14.00	571.20	3019.20	1724.57	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M4-T6	2.00	15.00	612.00	2095.68	1282.56	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M4-T10	2.00	16.00	652.80	3000.00	1958.40	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M2-T5	2.00	17.00	693.60	2130.00	1477.37	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M3-T10	2.00	18.00	734.40	2468.64	1812.97	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M4-2T5	2.00	19.00	775.20	2502.00	1939.55	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M2-2T10	2.00	20.00	816.00	1842.00	1503.07	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M1-T10	2.00	21.00	856.80	2335.44	2001.00	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00
M2-T10T5	2.00	22.00	897.60	2370.00	2127.31	2.00	1.00	48.00	3000.00	144.00

Anexo 15

Cálculo de P_{ACI} , Modelo 2 (fragmento 7)

Nodo 6					
Nodo 6 -Puntal 2					
MODELO	Bc	Bn	fce	Anz1	Pn61
			MPa	mm2	kN
M1	2.00	0.60	34.68	2308.80	80.07
M2	2.00	0.60	34.68	2157.84	74.83
M3	2.00	0.60	34.68	2706.00	93.84
M1-T5	2.00	0.60	24.48	2752.80	67.39
M4-T8	2.00	0.60	24.48	2502.00	61.25
M3-T8	2.00	0.60	24.48	2226.00	54.49
M3-T5	2.00	0.60	24.48	2664.00	65.21
M1-T8	2.00	0.60	24.48	2584.08	63.26
M2-2T5	2.00	0.60	24.48	2112.00	51.70
M1-T6	2.00	0.60	24.48	1380.00	33.78
M2-T6	2.00	0.60	24.48	2353.20	57.61
M2-T10	2.00	0.60	24.48	3409.92	83.47
M3-T6	2.00	0.60	24.48	3019.20	73.91
M4-T6	2.00	0.60	24.48	2095.68	51.30
M4-T10	2.00	0.60	24.48	3000.00	73.44
M2-T5	2.00	0.60	24.48	2130.00	52.14
M3-T10	2.00	0.60	24.48	2468.64	60.43
M4-2T5	2.00	0.60	24.48	2502.00	61.25
M2-2T10	2.00	0.60	24.48	1842.00	45.09
M1-T10	2.00	0.60	24.48	2335.44	57.17
M2-T10T5	2.00	0.60	24.48	2370.00	58.02