

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“ANÁLISIS DE VIGAS TIPO I DE FERROCEMENTO PARA
SU APLICACIÓN COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL
PREFABRICADO”**

Por:

OCAMPO MARTINEZ ALEJANDRO SAUL

Proyecto presentado a consideración de la “**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO**”, como requisito para optar el grado de licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE II - 2025

TARIJA - BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“ANÁLISIS DE VIGAS TIPO I DE FERROCEMENTO PARA
SU APLICACIÓN COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL
PREFABRICADO”**

Por:

OCAMPO MARTINEZ ALEJANDRO SAUL

SEMESTRE II - 2025

TARIJA -BOLIVIA

DEDICATORIA

A mis padres, cuyo apoyo incondicional me sostuvo tanto en los momentos difíciles como en los más apacibles. Gracias por inculcarme valores, principios y la perseverancia necesaria para superar cada obstáculo.

Valoraré siempre el amor y comprensión que me brindaron sin esperar nada a cambio.

A mi hermano, por su paciencia y por acompañarme en cada paso de mi crecimiento personal. Tu compañía ha sido fundamental.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN 1

1.1 Problema 1

1.1.1 Planteamiento del Problema 1

1.1.2 Formulación del Problema..... 2

1.1.3 Sistematización del Problema..... 2

1.2 Objetivos..... 3

1.2.1 Objetivo General..... 3

1.2.2 Objetivos Específicos 3

1.3 Justificación 4

1.3.1 Justificación Teórica 4

1.3.2 Justificación Metodológica..... 4

1.3.3 Justificación Práctica 5

1.3.4 Justificación Social 5

1.4 Alcance del Estudio 5

1.4.1 Tipo de Estudio..... 5

1.4.2 Variables 6

1.4.3 Hipótesis 7

1.4.4 Restricciones..... 7

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO..... 8

2.1 Ferrocemento 8

2.1.1 Materiales constituyentes 8

2.1.2 Consideraciones en elementos de ferrocemento..... 18

2.2 Características de los materiales 23

2.2.1	Matriz de mortero	23
2.2.2	Acero de refuerzo	29
2.3	Teoría de flexión en elementos de ferrocemento	31
2.3.1	Flexión en vigas de material homogéneo, elástico e isótropo	31
2.3.2	Suposiciones básicas de la teoría de flexión en el ferrocemento.....	33
2.4	Resistencia a la flexión en vigas de ferrocemento	37
2.4.1	Comportamiento de secciones a flexión pura.....	37
2.4.2	Método de compatibilidad de deformaciones.....	38
2.5	Análisis a flexión de vigas de ferrocemento con sección transversal I.....	40
2.5.1	Estado de agrietamiento.....	41
2.5.2	Estado de fluencia.....	44
2.5.3	Estado de rotura	52
2.5.4	Deformaciones de flexión de las secciones	55
2.6	Resistencia a corte y tensión diagonal en vigas de ferrocemento	58
2.6.1	Tensión diagonal en vigas elásticas homogéneas	58
2.6.2	Vigas de ferrocemento sin refuerzo por corte.....	60
2.6.3	Criterio para la formación de fisuras diagonales	60
2.7	Análisis y diseño de vigas de hormigón armado por corte	63
2.8	DIANA FEA (software de elementos finitos).....	65
2.8.1	Conceptos generales del método de elementos finitos	65
2.8.2	Tipos de elemento finito	74
2.8.3	Modelado de fisuras	89
2.9	Ensayos de laboratorio.....	94
2.9.1	Análisis granulométrico y módulo de finura de los agregados (ASTM C136)..	94

2.9.2	Densidad aparente ("peso unitario") e índice de huecos en los agregados (ASTM C29).....	95
2.9.3	Peso específico y absorción del agregado fino (ASTM C 128)	95
2.9.4	Dosificación de mortero	96
2.9.5	Ensayo de resistencia a la compresión del hormigón (ASTM C 39).....	99
2.9.6	Ensayo de resistencia a la flexión del ferrocemento (ASTM C78):	99

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN 101

3.1	Recolección de datos	101
3.1.1	Procedencia de los agregados	101
3.1.2	Análisis granulométrico del agregado fino.....	101
3.1.3	Densidad Aparente “peso unitario” del agregado fino.	103
3.1.4	Peso específico y absorción del agregado fino.	104
3.1.5	Determinación de los materiales para 1 <i>cm</i> ³ de mortero.....	105
3.1.6	Informe de rotura a compresión de probetas	108
3.2	Planteamiento de la viga de ferrocemento con sección transversal I.....	110
3.3	Análisis de la resistencia a la flexión en vigas de ferrocemento.....	113
3.3.1	Estado de agrietamiento.....	113
3.3.2	Estado de fluencia.....	116
3.3.3	Estado de rotura	119
3.4	Análisis de las deflexiones en las vigas de ferrocemento a partir de curvaturas .	121
3.4.1	Estado de agrietamiento:	122
3.4.2	Estado de fluencia:.....	122
3.4.3	Estado de rotura:	123
3.5	Análisis de la resistencia a corte y tensión diagonal en vigas de ferrocemento ..	123
3.6	Tabulación de los resultados del análisis teórico	125

3.7	Ensayo a flexión en vigas de ferrocemento	125
3.7.1	Configuración del ensayo	125
3.7.2	Características de los especímenes de ferrocemento	126
3.7.3	Resultados del ensayo a flexión.....	126
3.8	Modelo de elementos finitos (Modelo 1).....	128
3.8.1	Discretización de la geometría y definición de condiciones de contorno	128
3.8.2	Modelado del comportamiento físico de los materiales	130
3.8.3	Creación de la malla y procedimiento de análisis numérico	134
CAPÍTULO IV		
ANÁLISIS DE RESULTADOS		138
4.1	Análisis comparativo de los modelos Experimental, Teórico y FEM (Modelo 1)	
		138
4.1.1	Curvas carga-deflexión.....	138
4.1.2	Mecanismo de falla.....	145
4.2	Análisis del comportamiento a flexión (Modelo 2)	146
4.2.1	Curvas carga-deflexión.....	147
4.3	Análisis del comportamiento simultáneo a flexión y corte (Modelo 3)	153
4.3.1	Curvas carga-deflexión.....	154
4.4	Análisis técnico-económico en aplicación estructural de vigas I de ferrocemento ...	
		159
CAPÍTULO V		
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		169
5.1	Conclusiones	169
5.2	Recomendaciones	179
BIBLIOGRAFIA		181

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Sección típica de ferrocemento con acero esquelético.....	8
Figura 2.2. Cemento “El Puente” IP-30 resistencia a compresión en cubos de mortero - NB 011	12
Figura 2.3. Rangos límite deseables del tamaño del agregado	14
Figura 2.4. Disposición del sistema de refuerzo en el ferrocemento.....	19
Figura 2.5. Direcciones longitudinales y transversales asumidas para el refuerzo	21
Figura 2.6. Curva esfuerzo-deformación de Hognestad	24
Figura 2.7. Determinación de la resistencia a tracción.....	25
Figura 2.8. Ensayo en viga para determinar la resistencia a la tracción.....	26
Figura 2.9. Valores de λ con base en la composición del agregado	27
Figura 2.10. Influencia de la velocidad de carga en la curva tensión-deformación	27
Figura 2.11. Deformaciones longitudinales y transversales medidas en una probeta sometida a compresión uniaxial	28
Figura 2.12. Tensión de fluencia para aceros con punto de fluencia no definido.....	29
Figura 2.13. Diferentes idealizaciones de la curva tensión-deformación para el acero	30
Figura 2.14. Esfuerzos en un punto cualquiera de una viga	32
Figura 2.15. Esfuerzos en un punto cualquiera sobre el eje neutro de la viga	32
Figura 2.16. Distribución de tensiones de compresión correspondientes a diferentes diagramas de deformación.....	35
Figura 2.17. Distribución de esfuerzos de compresión en la zona de compresión.....	35
Figura 2.18. Variación de β_1 en función de la resistencia característica f'_c	36
Figura 2.19. Secciones balanceadas controlada por compresión y controlada por tracción	38
Figura 2.20. Diferentes tipos de fallas de una sección	38
Figura 2.21. Compatibilidad de deformación en una sección de ferrocemento	39
Figura 2.22. Diagrama tensión-deformación del acero	39
Figura 2.23. Fuerzas internas en una sección de ferrocemento	40
Figura 2.24. Distribución de esfuerzos y deformaciones en la sección para el estado de agrietamiento	41
Figura 2.25. Distribución de esfuerzos y deformaciones en la sección para el “Caso A” en el estado de fluencia	44

Figura 2.26. Distribución de esfuerzos y deformaciones en la sección para el “Caso B” en el estado de fluencia	45
Figura 2.27. Distribución de esfuerzos y deformaciones en la sección para el “Caso C” en el estado de fluencia	48
Figura 2.28. Modelo elastoplástico equivalente para el mortero.....	49
Figura 2.29. Distribución de esfuerzos y deformaciones en la sección para el “Caso A” en estado de rotura.....	53
Figura 2.30. Distribución de esfuerzos y deformaciones en la sección para el “Caso B” en estado de rotura.....	53
Figura 2.31. Distribución de momento y curvatura para diferentes cargas	56
Figura 2.32. Esfuerzos de corte horizontal y vertical	59
Figura 2.33. Trayectoria de tensiones en una viga rectangular homogénea	59
Figura 2.34. Fisuras por tensión diagonal.....	61
Figura 2.35. Correlación de las ecuaciones con ensayos.....	63
Figura 2.36. Estribos verticales para resistir el corte.....	64
Figura 2.37. Características de elementos de armadura	74
Figura 2.38. Características elemento de esfuerzo plano	75
Figura 2.39. Características elemento de deformación plana	76
Figura 2.40. Características del elemento axisimétrico	77
Figura 2.41. Características del elemento sólido	77
Figura 2.42. Características del elemento de viga	78
Figura 2.43. Características elementos de placa en flexión.....	79
Figura 2.44. Características elemento de lámina plana	80
Figura 2.45. Características elemento de cáscara curva	81
Figura 2.46. Ejes	81
Figura 2.47. Desplazamientos	82
Figura 2.48. Traslaciones.....	82
Figura 2.49. Rotaciones	83
Figura 2.50. Tensiones de Cauchy	84
Figura 2.51. Momentos y fuerzas generalizados	85
Figura 2.52. Espesor	85

Figura 2.53. CQ40S.....	86
Figura 2.54. Barra embebida en elemento de cáscara curvada.....	88
Figura 2.55. Excentricidades en elementos de cáscara curvada.....	89
Figura 2.56. Modos de fractura en mecánica de la fractura	90
Figura 2.57. Anchos de banda de fisura cuando se considera la orientación de la fisura.....	90
Figura 2.58. Tensiones en concreto fisurado.	92
Figura 2.59. Bloqueo severo de tensiones alrededor de una fisura fija.	93
Figura 2.60. Volúmen de conjunto en material granular	96
Figura 2.61. Suposiciones del volumen de pasta en el volumen de arena.....	97
Figura 2.62. Tipos de fracturas en ensayos a compresión	99
Figura 2.63. Esquema del ensayo a flexión en vigas.....	100
Figura 3.1. Planta chancadora de áridos el Temporal.	101
Figura 3.2. Curva granulométrica del agregado fino.....	102
Figura 3.3. Vista transversal sección I de ferrocemento.....	110
Figura 3.4. Vista isométrica viga de ferrocemento con sección I.....	111
Figura 3.5. Ensayo experimental en viga tipo I de ferrocemento.....	126
Figura 3.6. Curvas carga-deflexión de las vigas ensayadas	127
Figura 3.7. Nuevo proyecto y definición de las propiedades generales	128
Figura 3.8. Vista en elevación de viga tipo I de ferrocemento ensayada en laboratorio	128
Figura 3.9. Geometrías de los elementos.....	129
Figura 3.10. Condiciones de contorno en apoyos y bloques aplicadores de carga.....	129
Figura 3.11. Geometría de los elementos del sistema de refuerzo	130
Figura 3.12. Comportamiento a tracción predefinido para el modelo de fisura de deformación total	132
Figura 3.13. Curva de compresión parabólica.....	133
Figura 3.14. Creación de la malla en los elementos Shell.....	135
Figura 3.15. Vista isométrica del mallado	135
Figura 3.16. Vista isométrica 3D de los elementos Shell	136
Figura 3.17. Inspección de los resultados para las deflexiones	137
Figura 4.1 Curva carga-deflexión Teórico vs. Experimental vs. FEM.....	138
Figura 4.2. Vista en elevación viga tipo I de ferrocemento ensayada en laboratorio	141

Figura 4.3. Distribución en el instante de aparición de las primeras fisuras según el modelo FEM:.....	142
Figura 4.4. Distribución en el instante de fluencia según la predicción teórica de:	143
Figura 4.5. Distribución en el instante de rotura según la predicción teórica de:	144
Figura 4.6. Comparación Modelo Experimental vs. Modelo FEM:.....	145
Figura 4.7. Vista en elevación de viga tipo I de ferrocemento a escala estándar (Modelo 2)	146
Figura 4.8. Curva carga-deflexión Teórico vs. FEM	147
Figura 4.9. Distribución en el instante de aparición de las primeras fisuras según el modelo FEM:.....	150
Figura 4.10. Distribución en el instante de fluencia según la predicción teórica de:	151
Figura 4.11. Distribución en el instante de rotura según la predicción teórica de:.....	152
Figura 4.12. Vista en elevación de viga tipo I de ferrocemento a escala estándar (Modelo 3)	153
Figura 4.13. Curva carga-deflexión Teórico vs. FEM	154
Figura 4.14. Distribución en el instante de aparición de las primeras fisuras según el modelo FEM:.....	156
Figura 4.15. Distribución en el instante de fluencia según la predicción teórica de:	157
Figura 4.16. Distribución en el instante de rotura según la predicción teórica de:	158
Figura 4.17. Sección transversal sistema de piso con vigas I de ferrocemento.....	159
Figura 4.18. Vista isométrica modelo sólido de edificación.....	159
Figura 4.19. Vista en planta 2do nivel de edificación con sistema de losa aligerada unidireccional con vigas I de ferrocemento.....	160
Figura 4.20. Modelo estructural con sistema de losas unidireccionales.....	160
Figura 4.21. Valores máximos de momento flector en losas unidireccionales	162
Figura 4.22. Sección transversal losa aligerada unidireccional de H°A°	163
Figura 4.23. Sección transversal viga convencional de hormigón armado	167
Figura 5.1. Comparación de cargas máximas: momento teórico, corte crítico teórico y vigas I de ferrocemento ensayadas (V-1 a V-5)	169
Figura 5.2. Comparación de cargas por estado límite (fisuración, fluencia y rotura) entre resultados experimentales, modelo FEM y predicción teórica.....	171

Figura 5.3. Comparación de cargas y deflexiones por estado límite (fisuración, fluencia y rotura) entre resultados experimentales, modelo FEM y predicción teórica.....	172
Figura 5.4. Comparación de cargas teórica y numérica (Modelo FEM 2) en los estados límite de fisuración, fluencia y rotura para la viga tipo I de ferrocemento.....	173
Figura 5.5. Comparación de deflexiones teórica y numérica (Modelo FEM 2) en los estados límite de fisuración, fluencia y rotura para la viga tipo I de ferrocemento.	174
Figura 5.6. Comparación de cargas teórica y numérica (Modelo FEM 3) en los estados límite de fisuración, fluencia y rotura para la viga tipo I de ferrocemento.....	176
Figura 5.7. Comparación de deflexiones teórica y numérica (Modelo FEM 3) en los estados límite de fisuración, fluencia y rotura para la viga tipo I de ferrocemento.	176
Figura 5.8. Comparación del costo por metro entre vigas.....	178
Figura 5.9. Comparación del costo por metro entre vigas.....	179

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Matriz PCES	2
Tabla 1.2. Matriz de Operalización de Variables	6
Tabla 2.1. Tabla resumen de clasificación según NB 011	11
Tabla 2.2. Características y criterios de empleo del cemento IP	12
Tabla 2.3. Granulometría del agregado fino ASTM C33	13
Tabla 2.4. Especificaciones para barras y alambres de armadura no pretensada	16
Tabla 2.5. Tipos de mallas para ferrocemento	17
Tabla 2.6. Características del compuesto.....	18
Tabla 2.7. Características del refuerzo para ferrocemento	18
Tabla 2.8. Valores del factor de eficiencia global η del refuerzo.....	21
Tabla 2.9. Tipos de fisuras por esfuerzos de corte.....	60
Tabla 2.10. Distribución de deformaciones y tensiones en el área del elemento (CQ40S)..	86
Tabla 2.11. Polinomios para CQ40S.....	86
Tabla 3.1. Granulometría del agregado fino	102
Tabla 3.2. Peso unitario suelto del agregado fino.....	103
Tabla 3.3. Peso unitario compactado del agregado fino	103
Tabla 3.4. Peso específico y absorción del agregado fino	104
Tabla 3.5. Relación de componentes para la dosificación de mortero	105
Tabla 3.6. Cantidad de materiales necesarios para 1 cm^3 de mortero	107
Tabla 3.7. Rendimiento de materiales para 1 m^3 de mortero	107
Tabla 3.8. Resistencia de esfuerzo a compresión en probetas de mortero.....	108
Tabla 3.9. Área efectiva y posición de cada nivel de refuerzo en sección	112
Tabla 3.10. Propiedades estáticas en áreas efectivas de refuerzo	113
Tabla 3.11. Propiedades estáticas de cada subsección de mortero	114
Tabla 3.12. Propiedades del refuerzo para cada nivel en el estado de fluencia.....	117
Tabla 3.13. Propiedades del refuerzo para cada nivel en el estado de fluencia.....	120
Tabla 3.14. Valores determinados del comportamiento teórico.....	125
Tabla 3.15. Datos de los especímenes de ferrocemento a ensayar	126
Tabla 3.16. Valores máximos obtenidos del ensayo a flexión	127
Tabla 3.17. Características del material de mortero	130

Tabla 3.18. Propiedades del mortero utilizados en el modelo FEM.....	131
Tabla 3.19. Propiedades de la malla de alambre electrosoldado utilizados en el modelo FEM	133
Tabla 3.20. Propiedades de las barras de acero utilizados en el modelo FEM.....	134
Tabla 3.21. Propiedades del acero en el modelo FEM	134
Tabla 4.1.Comparación carga-deflexión en etapas críticas:	139
Tabla 4.2. Valores calculados para el comportamiento teórico	147
Tabla 4.3. Carga-deflexión en etapas críticas: Teórico vs FEM (Modelo 2)	148
Tabla 4.4. Valores determinados del comportamiento teórico.....	153
Tabla 4.5. Carga-deflexión en etapas críticas: Teórico vs FEM	154
Tabla 4.6. Cargas permanentes para entepiso.....	161
Tabla 4.7. Cargas permanentes para cubierta	161
Tabla 4.8. Sobrecargas de uso para entepiso y cubierta	162
Tabla 4.9. Comparación de costos por 1 m ²	167
Tabla 4.10. Comparación Losa aligerada de Ferrocemento vs. Losa aligerada de H°A° ...	168

ANEXOS

ANEXO 1 ENSAYOS DE LABORATORIO Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

ANEXO 2 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

ANEXO 3 REPORTE FOTOGRÁFICO

ANEXO 4 PLANOS