

UNIVERSIDAD AUTONOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE CÓDIGO
ABIERTO PARA EL ANÁLISIS AUTOMATIZADO DE
ESTRUCTURAS APORTICADAS EN 3D MEDIANTE EL
MÉTODO MATRICIAL DE RIGIDEZ**

Por:

DIEGO OLIVER VARGAS MOYA

Proyecto presentado a consideración de la "UNIVERSIDAD AUTONOMA JUAN MISAEL SARACHO", como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil

SEMESTRE I - 2026

TARIJA - BOLIVIA

DEDICATORIA

A mi papá y a mi mamá, con todo mi amor y gratitud, por ser el pilar de mi vida y mi mayor motivación. A Angélica Molina, Orlando Moya, Nancy Rios y Carlos Vargas, mis abuelos, por la sabiduría y el cariño que me han dado de manera incondicional.

A Isela Moya, mi tía, por su compañía constante a pesar de la distancia y por depositar su confianza en mi futuro profesional y personal.

Índice

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1	El Problema	1
1.1.1	Planteamiento del Problema	1
1.1.2	Formulación del problema	2
1.1.3	Sistematización	2
1.2	Justificación.....	2
1.2.1	Técnica.....	2
1.2.2	Académica.....	3
1.2.3	Social.....	3
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Objetivo General	3
1.3.2	Objetivos Específicos.....	4
1.4	Alcance y Limitaciones	4
1.5	Formulación de hipótesis	5
1.6	Identificación y Operacionalización de Variables	5
1.6.1	Identificación de Variables	5
1.6.2	Matriz de Operacionalización de Variables	6

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1	Análisis Estructural Computacional	9
2.1.1	Contexto General y Evolución	9

2.1.2 Relevancia de los Métodos Numéricos en Ingeniería Civil	9
2.1.3 Rol del Software en el Análisis y Diseño Estructural Moderno	9
2.2 El Método Matricial de Rigidez para Estructuras Aporticadas en 3D	10
2.2.1 Idealización y Discretización de la Estructura	10
2.2.2 Grados de Libertad Nodales en 3D	10
2.2.3 Sistemas de Coordenadas Globales y Locales	11
2.2.4 Matriz de Rigidez del Elemento de Barra 3D (Coordenadas Locales)	12
2.2.4.1 Rigidez Axial (Componente A)	14
2.2.4.2 Rigidez a Torsión	14
2.2.4.3 Rigideces a Flexión y Cortante	15
2.2.5 Formulación de la Matriz de Transformación de Coordenadas (T)	18
2.2.5.1 La Matriz de Rotación (R)	18
2.2.5.2 Matriz de Transformación (T)	19
2.2.6 Matriz de Rigidez del Elemento en Coordenadas Globales	21
2.2.7 Ensamblaje de la Matriz de Rigidez Global	21
2.2.8 Vector de Cargas Nodales Globales	22
2.2.8.1 Cargas Nodales Directas	23
2.2.8.2 Cargas sobre Elementos	23
2.2.8.3 Ensamblaje Final.....	25
2.2.9 Sistema Fundamental de Ecuaciones	25
2.2.10 Imposición de condiciones de borde (apoyos)	26
2.2.11 Resolución del Sistema y Obtención de Desplazamientos [d]	27
2.2.12 Cálculo de Reacciones y Esfuerzos Internos (Post-proceso)	27

2.2.12.1 Cálculo de Reacciones	27
2.2.12.2 Cálculo de Fuerzas Internas Locales	28
2.3 Fundamentos Computacionales del Motor de Análisis Estructural	29
2.3.1 Paradigmas de Programación: Fundamento del Motor Computacional	30
2.3.2 Lenguajes de Programación para Computación Científica	32
2.3.3 El Lenguaje Python como Ecosistema de Computación Científica	33
2.3.4 NumPy como Núcleo Computacional del Método Matricial	34
2.3.4.1 El “ndarray”: Representación de K, d y F	34
2.3.4.2 Resolución del Sistema: Delegación de la Complejidad Numérica	35
2.4 Criterios de Simultaneidad y Combinación de Acciones (NB 1225002)	36
2.4.1 Concepto de Simultaneidad de Cargas	37
2.4.2 Concurrencia de Hipótesis de Carga	37
2.4.3 Hipótesis Alternantes y Mutuamente Excluyentes	38
2.5 Distribución de Cargas en Losas	38
2.5.1. Distribución en Losas Bidireccionales (Método de las Áreas Tributarias)...	38

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Algoritmo de Resolución Estructural	42
3.1.1 Diagramas de Flujo	44
3.2 Algoritmo de Distribución de Cargas en Losas	47
3.2.1 Diagrama de Flujo	48
3.3 Algoritmo de Procesamiento de Cargas	49
3.3.1 Generación Automática de Peso Propio	49

3.3.2 Gestión de Solicitaciones y Superposición.....	50
3.3.3 Diagramas de Flujo	51
3.4 Algoritmo de Cálculo de Envolventes	53
3.4.1 Diagrama de Flujo	54
3.5 Generación Automatizada de Memoria de Cálculo	55
3.5.1 Diagrama de Flujo	57
3.6 Arquitectura del Programa	58
3.6.1 Organización del Código Fuente (Módulos de Análisis)	59
3.7 Protocolo de Validación de Resultados.....	60
3.7.1 Nivel I: Validación Analítica en Sistemas Planos.....	60
3.7.2 Nivel II: Validación Espacial y Distribución de Cargas	60
3.7.3 Nivel III: Validación Sistémica en Proyecto de Edificación	61

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados Nivel I: Validación Analítica en Sistemas Planos	64
4.1.1 Caso de Estudio 1: Viga Continua Hiperestática	64
4.1.1.1 Resultados VORTEX 3D	65
4.1.1.2 Memoria de cálculo de VORTEX 3D	65
4.1.1.3 Resultados Ftool.....	69
4.1.1.4 Comparación de Reacciones en Apoyos	69
4.1.1.5 Comparación de desplazamientos	69
4.1.2 Caso de Estudio 2: Cercha con carga nodal	70
4.1.2.1 Resultados VORTEX 3D	70

4.1.2.2 Resultados Ftool.....	71
4.1.2.3 Comparación de Reacciones en Apoyos	71
4.1.2.3 Comparación de desplazamientos	71
4.1.3 Caso de Estudio 3: Pórtico Plano con Cargas Distribuidas.....	72
4.1.3.1 Resultados VORTEX 3D	73
4.1.3.1 Resultados Ftool.....	75
4.1.2.3 Comparación de Reacciones en Apoyos	75
4.1.2.3 Comparación de Momentos máximos	76
4.2 Resultados Nivel II: Validación Espacial y Distribución de Cargas.....	76
4.2.1 Caso de Estudio 4: Pórtico 3D con cargas distribuidas sobre elementos	76
4.2.1.1 Elementos más solicitados	77
4.2.1.2 Diagrama de Momentos de VORTEX 3D	78
4.2.1.3 Diagrama de Momentos de CYPE 3D	78
4.2.1.4 Comparación de Momentos	79
4.2.1.5 Verificación con Teoría de Bernoulli	79
4.2.2 Caso de Estudio 5: Pórtico 3D con distribución de cargas superficiales en losa bidireccional con cuatro bordes simétricos	80
4.2.2.1 Análisis de geometría tributaria	80
4.2.2.2 Diagrama de Momentos de VORTEX 3D	83
4.2.2.3 Diagrama de Momentos de CYPE 3D	83
4.2.3 Caso de Estudio 6: Pórtico 3D con distribución de cargas superficiales en losa bidireccional con 1 borde asimétrico	84
4.2.3.1 Análisis de geometría tributaria	84
4.2.3.2 Diagrama de momentos de VORTEX 3D	86

4.2.3.3 Diagrama de momentos de CYPE 3D.....	87
4.3 Resultados Nivel III: Validación Integral en Edificación	88
4.3.1 Descripción del Caso de Estudio.....	88
4.3.2 Estructuras Modeladas	88
4.3.3 Identificación de efectos máximos	89
4.3.3 Verificación de Axial máximo en columnas	90
4.3.4 Verificación de Envolventes de Diseño (vigas)	91
4.4 Análisis de Resultados	93
4.4.1 Precisión en Mecánica Fundamental y Geometrías Simples	93
4.4.2 Sensibilidad en la Distribución de Cargas Bidireccionales.....	93
4.4.3 Comportamiento en Edificaciones Complejas (Edificio Concordia)	94

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones	97
5.2 Recomendaciones.....	98

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

Índice de Figuras

Figura 1: Sistema de Coordenadas Global	11
Figura 2: Sistema de Coordenadas Local	12
Figura 3: Matriz de Rigidez Local (12x12) para Elementos en 3D	13
Figura 4: Matriz de Rigidez a Flexión que Contempla la Deformación por Cortante	17
Figura 5: Matriz de Transformación aplicada a Fuerzas y Momentos.....	20
Figura 6: Representación gráfica de las líneas de fluencia en losas bidireccionales ..	40
Figura 7: Flujo general del procesamiento de la estructura	44
Figura 8: Ensamblaje de la matriz de rigidez global	45
Figura 9: Cálculo de fuerzas internas	46
Figura 10: Distribución de cargas superficiales	48
Figura 11: Cálculo de Peso Propio	51
Figura 12: Resolución del sistema por combinaciones	52
Figura 13: Cálculo de envolventes	54
Figura 14: Generación de reporte de cálculo	57
Figura 15: Caso de Estudio 1 - Viga Continua Hiperestática	64
Figura 16: Caso de Estudio 1 - Resultados de Ftool	69
Figura 17: Caso de Estudio 2 – Cercha con Carga Nodal	70
Figura 18: Caso de Estudio 2 - Resultados de Ftool	71
Figura 19: Caso de Estudio 3 – Pórtico Plano con Cargas Distribuidas en Elementos	72
Figura 20: Caso de Estudio 3 – Momento máximo de la estructura	74
Figura 21: Caso de Estudio 3 – Resultados Ftool	75

Figura 22: Caso de Estudio 4 – Dimensiones del pórtico	76
Figura 23: Caso de Estudio 4 – Estructura Cargada	77
Figura 24: Caso de Estudio 4 – Geometría de las secciones	77
Figura 25: Caso de Estudio 4 – Elementos más solicitados	77
Figura 26: Caso de Estudio 4 – Momentos VORTEX 3D	78
Figura 27: Caso de Estudio 4 – Momentos CYPE 3D	78
Figura 28: Caso de Estudio 4 – Momentos con teoría de Bernoulli en VORTEX 3D	79
Figura 29: Caso de Estudio 5 – Estructura con cargas superficiales distribuidas en losas bidireccionales.....	80
Figura 30: Caso de Estudio 5 – Distribución de cargas superficiales en losas bidireccionales con 3 bordes discontinuos y 1 continuo	81
Figura 31: Caso de Estudio 5 – Idealización de la distribución de cargas lineales provenientes de Losas Bidireccionales	82
Figura 32: Caso de Estudio 5 – Momentos VORTEX 3D	83
Figura 33: Caso de Estudio 5 – Momentos CYPE 3D	83
Figura 34: Caso de Estudio 6 – Dimensiones – Altura: 3m	84
Figura 35: Caso de Estudio 6 – Distribución con un borde asimétrico en ambas losas	84
Figura 36: Caso de Estudio 6 – Idealización de la distribución de cargas lineales provenientes de Losas Bidireccionales	86
Figura 37: Caso de Estudio 6 –Momentos VORTEX 3D	86
Figura 38: Caso de Estudio 6 –Momentos CYPE 3D	87
Figura 39: Estructura modelada en VORTEX 3D	88
Figura 40: Estructura modelada en CYPECAD	89
Figura 41: Efectos máximos Edificio Concordia	89

Figura 42: Cargas axiales máximas en CYPECAD	90
Figura 43: Carga axial máxima en VORTEX 3D	90
Figura 44: Envolvente de Momentos máximos en VORTEX 3D.....	91
Figura 45: Envolvente de Momentos máximos en CYPECAD	91
Figura 46: Envolvente de cortantes máximos en VORTEX 3D	92
Figura 47: Envolvente de cortantes máximos en CYPECAD	92

Índice de Tablas

Tabla 1: Operacionalización de Variables	6
Tabla 2: Caso de Estudio 1 - Comparación de reacciones	69
Tabla 3: Caso de Estudio 1 - Comparación de desplazamientos	69
Tabla 4: Caso de Estudio 2 - Comparación de reacciones	71
Tabla 5: Caso de Estudio 2 - Comparación de desplazamientos	71
Tabla 6: Caso de Estudio 3 - Comparación de resultantes	75
Tabla 7: Caso de Estudio 3 - Comparación de Momentos máximos	76
Tabla 8: Caso de Estudio 4 - Comparación de Momentos máximos	79
Tabla 9: Caso de Estudio 4 - Comparación de Momentos máximos	83
Tabla 10: Caso de Estudio 6 - Comparación de Momentos máximos	87
Tabla 11: Comparación Final VORTEX 3D / CYPECAD	93

Índice de Anexos

Anexo 1: Script modelo_estructura.py

Anexo 2: Script calc.py

Anexo 3: Script procesador_cargas.py

Anexo 4: Script distribuidor_losas.py

Anexo 5: Estudio de Suelos

Anexo 6: Determinación de cargas en el edificio Concordia

Anexo 7: Cargas Aplicadas en el Edificio Concordia

Anexo 8: Manual de Usuario de VORTEX 3D

Anexo 9: Planos Arquitectónicos