

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DEL PERÚ**

**Escuela de Posgrado**



Evaluación del espaciamiento sobre el cordón en las uniones tubulares tipo “K” compuesto de perfiles cuadrados en el cordón y diagonales

Tesis para obtener el grado académico de Magíster en Ingeniería Mecánica que presenta:

***Ing. James Felix Atachahua Pio***

Asesor:

***Mg. Gustavo Alberto Neira Alatrística***

Lima, 2022

## Informe de Similitud

Yo, Gustavo Alberto Neira Alatrística, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada. **EVALUACIÓN DEL ESPACIAMIENTO SOBRE EL CORDON EN LAS UNIONES TUBULARES TIPO "K" COMPUESTO DE PERFILES CUADRADOS EN EL CORDON Y DIAGONALES**, del autor James Felix Atachahua Pio, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 18%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 20/07/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

San Miguel 21 de julio de 2023

Apellidos y nombres del asesor: Neira Alatrística, Gustavo Alberto	
DNI: 06105806	Firma 
ORCID: 0000-0003-2268-3693	

## RESUMEN

En los últimos años, el uso de estructuras metálicas con perfiles tubulares ha experimentado un notable aumento debido a su comportamiento estructural y su aspecto estético en las construcciones. Como resultado, se han desarrollado normativas para regular el dimensionamiento y comportamiento de las uniones de este tipo de perfiles estructurales.

Los programas de análisis por elementos finitos se han convertido en herramientas poderosas para simular y optimizar el comportamiento de las estructuras. En este trabajo, se presenta un estudio numérico de uniones soldadas tipo K con espaciamiento, utilizando perfiles tubulares de acero de sección cuadrada en las diagonales y el cordón. Se desarrollaron modelos numéricos con un estudio de refinamiento de malla y condiciones de borde para determinar la configuración más eficiente.

Los modelos se calibraron utilizando ensayos experimentales de autores citados en la bibliografía, y se llevó a cabo un estudio paramétrico variando el espaciamiento entre las diagonales y el material de los perfiles disponibles en el mercado nacional. Se compararon las tensiones máximas antes de la falla según los criterios establecidos por la normativa.

En general, los modelos calibrados mostraron una excelente correlación con los ensayos experimentales, validando el estudio paramétrico de las uniones que permiten identificar configuraciones seguras de uniones tubulares, optimizando el proceso de diseño y evitando costosos ensayos experimentales. Los resultados obtenidos demostraron que las uniones con menor espaciamiento son más resistentes.

## DEDICATORIA



*A mis padres José García y Gladys Pío,  
que con su amor, paciencia y esfuerzo  
han hecho de mí alguien de bien.*

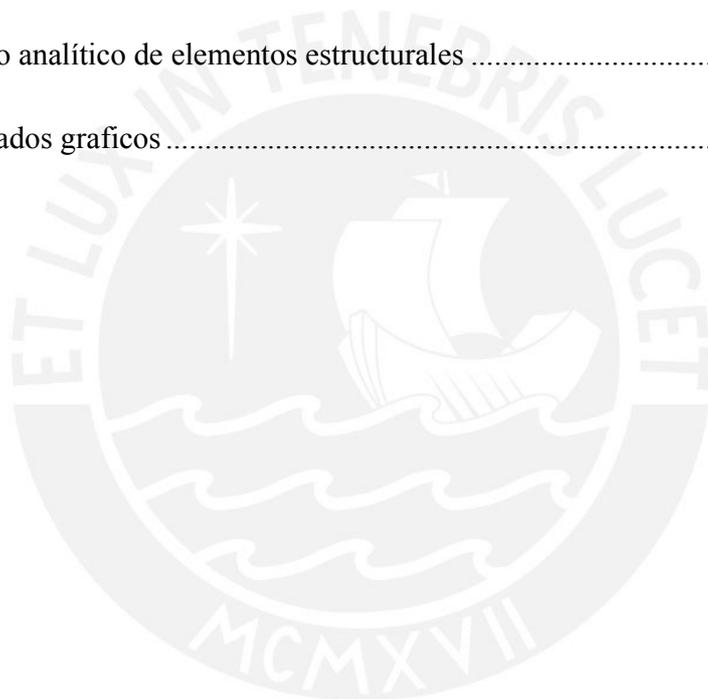
## INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
INDICE DE CONTENIDO .....	iv
LISTA DE TABLAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 .....	2
1.1 OBJETIVOS Y ALCANCES .....	2
1.2 ESTRUCTURAS DE SECCIONES TUBULARES .....	5
1.3 PROCESOS DE FABRICACIÓN DE ARMADURA TIPO WARREN .....	7
1.4 UNIÓN K SOLDADA CON ESPACIAMIENTO .....	10
1.5 CRITERIO DE DEFORMACIÓN LÍMITE .....	11
1.6 ESTADO DEL ARTE .....	12
1.6.1 Modelos analíticos, numéricos y experimentales .....	13
1.6.2 Normativas regulatorias .....	17
1.7 PROCEDIMIENTO DE ANALISIS DE LA ESTRUCTURA .....	18

1.7.1	Hipótesis para el análisis.....	18
1.7.2	Cálculo y combinatoria de cargas.....	18
CAPÍTULO 2 .....		22
2.1	ANÁLISIS DE NUDOS CRÍTICOS.....	22
2.1.1	Procedimiento de diseño de la unión según CIDECT .....	25
2.1.2	Procedimiento de diseño de la unión según Eurocódigo .....	28
2.1.3	Discusión de resultados .....	29
CAPÍTULO 3 .....		30
3.1	DEFINICIONES GENERALES.....	30
3.2	APLICACIÓN Y SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	32
3.3	ESTUDIO DE CONVERGENCIA DE MALLA.....	33
3.4	SIMETRÍA.....	35
3.5	CALIBRACIÓN CON MODELOS PREVIOS.....	36
3.5.1	Metodología de modelamiento por elementos finitos.....	36
3.5.2	Pasos y procedimiento de análisis .....	36
3.5.3	Esquema del prototipo .....	38
3.5.4	Tipo de elemento .....	39
3.5.5	Definición de malla y convergencia .....	40
3.5.6	Modelado del material .....	43
3.5.7	Modelado de la soldadura.....	44

3.5.8	Modelado de cargas .....	45
3.5.9	Modelado de contactos y las condiciones de contorno.....	46
3.5.10	Verificación de los modelos de elementos finitos .....	47
3.5.11	Resultados del análisis .....	48
3.5.12	Unión N45k-gap en armadura.....	51
3.5.13	Verificación de los modelos de elementos finitos .....	56
3.6	PARAMETRIZACION DE MODELOS.....	60
CAPÍTULO 4 .....		66
4.1	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MODELOS NUMÉRICOS .....	66
4.1.1	Unión N45k-gap25,4 .....	66
4.1.2	Union N45kgap27,62.....	68
4.1.3	Unión N45kgap29,84.....	69
4.1.4	Unión N45kgap32,06.....	70
4.1.5	Unión N45kgap34,28.....	72
4.1.6	Unión N45kgap36,5.....	73
4.1.7	Unión N45kgap38,72.....	74
4.1.8	Unión N45kgap40,94.....	76
4.1.9	Unión N45kgap43,16.....	77
4.1.10	Unión N45kgap45,38.....	79
4.1.11	Unión N45kgap47,6.....	81

4.1.12 Resumen de resultados.....	83
CAPÍTULO 5 .....	84
BIBLIOGRAFÍA.....	88
ANEXOS.....	91
Anexo A: <i>Norma E090 Estructuras metálicas y Guía de diseño N°24 del AISC.</i> .....	91
Anexo B: <i>Guía de Diseño N°3 del CIDECT y el EUROCÓDIGO 3 Parte 1-8 uniones</i> .....	93
Anexo C: Cálculo analítico de elementos estructurales .....	96
Anexo D: Resultados graficos .....	103



## LISTA DE TABLAS

<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
Tabla 1-1. Fuerzas axiales en los elementos.....	21
Tabla 1-2. Perfiles calculados.....	21
Tabla 2-1. Resultados según procedimientos normativos .....	29
Tabla 3-1. Resumen de propiedades de mallado N2-2.....	42
Tabla 3-2. Datos del material ensayado por (Oliveira Mendanha, 2006).....	44
Tabla 3-3. Resumen de propiedades de mallado Nk-gap.....	53
Tabla 3-4. Parametrización de los modelos numéricos .....	60
Tabla 3-5. Resumen de las uniones con su espaciamiento .....	60
Tabla 4-1. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap27,62.....	68
Tabla 4-2. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap29,84 (Figura 4-5).....	69
Tabla 4-3. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap32,06 (Figura 4-7).....	71
Tabla 4-4. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap34,28 (Figura 4-9).....	72
Tabla 4-5. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap36,5 (Figura 4-11).....	73
Tabla 4-6. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap38,72 (Figura 4-13).....	75
Tabla 4-7. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap40,94 (Figura 4-15).....	76
Tabla 4-8. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap43,16 (Figura 4-17).....	77
Tabla 4-9. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap45,38 (Figura 4-19).....	79
Tabla 4-10. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap47,6 (Figura 4-21).....	81
Tabla 4-11. Resultados según procedimientos normativos .....	83
Tabla C-1. Perfiles metálicos de la nave industrial .....	96
Tabla C-2. Tabla de valores calculados para la unión.....	102

## LISTA DE FIGURAS

Contenido	Pág.
Figura 1-1. Tipología de conexión K con espaciamiento (gap). .....	3
Figura 1-2. Construcción con armaduras tubulares en Chosica – Perú. ....	6
Figura 1-3. Armadura con uniones en K traslapadas y detalles. ....	8
Figura 1-4. Procedimiento de corte de sección tubular. ....	9
Figura 1-5. Maquinas semiautomáticas de corte. ....	9
Figura 1-6. Maquinas CNC de corte. ....	9
Figura 1-7. Unión K con espaciamiento “gap”. ....	10
Figura 1-8. Variables en la unión K con espaciamiento. ....	10
Figura 1-9. Excentricidad por espaciamiento “e”. ....	11
Figura 1-10. Curvas fuerza-deformación. ....	12
Figura 1-11. Curva Tension Von Mises – Carga en diagonal a tracción en unión K. ....	14
Figura 1-12. Curva Tension Von Mises – Carga en diagonal a tracción en unión KT. ....	15
Figura 1-13. Resultados de unión en K. ....	16
Figura 1-14. Curva fuerza-desplazamiento de unión en T. ....	17
Figura 1-15. Estructura metálica de la nave. ....	18
Figura 1-16. Armadura tipo Warren de sección tubular cuadrada. ....	19
Figura 1-17. Cargas sobre las bridas en el tijeral. ....	20
Figura 1-18. Fuerzas axiales en los elementos de la armadura (kN). ....	20
Figura 1-19. Fuerza axial en la brida superior (kN). ....	20
Figura 1-20. Fuerza axial en la brida inferior (kN). ....	21
Figura 2-1. Nudo N45k-gap D.C.L. ....	23
Figura 2-2. Nueva configuración Nudo 45 D.C.L. ....	23

Figura 2-3. Excentricidad en la unión N45k-gap76,2. (dimensiones en mm).....	24
Figura 2-4. División de la unión en K y X. ....	25
Figura 2-5. Función de carga para cordón en unión K con espaciamiento. ....	26
Figura 2-6. Curva eficiencia para uniones con espaciamiento en K de perfiles cuadrados..	26
Figura 2-7. Curva eficiencia para uniones en X de perfiles cuadrados. ....	27
Figura 2-8. Curva eficiencia para uniones X en compresión. ....	27
Figura 3-1. Solido tridimensional. ....	31
Figura 3-2. Modelo 3D de la unión en K.....	32
Figura 3-3. Ubicación de roseta sobre la brida, vista de planta. (mm).....	33
Figura 3-4. Ubicación de roseta sobre la brida.....	33
Figura 3-5. Esquema del prototipo N2-2.....	34
Figura 3-6. Simetría en una viga. ....	35
Figura 3-7. Algoritmo de cálculo. ....	37
Figura 3-8. Esquema del prototipo N2-2. (mm).....	38
Figura 3-9. Detalle del cordón de la soldadura. Fuente propia.....	39
Figura 3-10. Modelo sólido de la unión N2-2. ....	39
Figura 3-11. Sketch de los ejes diagonales y eje del cordón. ....	39
Figura 3-12. Esquema del elemento SOLID 186. ....	40
Figura 3-13. Geometría del elemento BEAM 188. ....	40
Figura 3-14. Curva desplazamiento máximo del eje Y – tamaño de elementos. ....	41
Figura 3-15. Mallado del elemento sólido y lineal.....	42
Figura 3-16. Nodo rígido entre elemento sólido y elemento lineal. ....	43
Figura 3-17. Gráfico de desplazamiento en conexión entre viga y sólido. (mm).....	43
Figura 3-18. Gráfico Strain – Stress del material. ....	44

Figura 3-19. Esquema de soldadura. ....	45
Figura 3-20. Soldadura en unión N2-2. ....	45
Figura 3-21. Acciones sobre el modelo. ....	45
Figura 3-22. Restricción entre diagonales y brida, empotramiento de los extremos de la brida. ....	46
Figura 3-23. Esfuerzos Von Mises en el modelo, curva Esfuerzo-Tensión. ....	48
Figura 3-24. Disposición de las galgas de medición. ....	49
Figura 3-25. Curva Esfuerzo Tensión, influencia de la posición de la galga (Roseta 1). ....	50
Figura 3-26. Posicionamiento de roseta sobre la parte superior de la brida. ....	50
Figura 3-27. Curva Esfuerzo-Tensión, influencia de la posición de la galga (Roseta 2). ....	51
Figura 3-28. Dimensiones de la unión propuesta. (mm) ....	52
Figura 3-29. Modelo 3D de la unión Nk-gap. ....	53
Figura 3-30. Curva Strain – Tamaño del elemento. ....	54
Figura 3-31. Conector nodo ficticio sólido a viga. ....	54
Figura 3-32. Simetría en el plano X. ....	55
Figura 3-33. Carga a compresión en eje de diagonal. ....	55
Figura 3-34. Deformación global de la unión y esfuerzos Von Mises (MPa). ....	56
Figura 3-35. Curva fuerza – desplazamiento (213.26 kN). ....	57
Figura 3-36. Curva fuerza – desplazamiento (350 kN). ....	57
Figura 3-37. Curva fuerza – desplazamiento para unión N45kgap25,4B. ....	58
Figura 3-38. Esfuerzos Von Mises (MPa) de unión completa. Fuente propia. ....	59
Figura 3-39. Curva fuerza – desplazamiento para unión N45kgap25,4B. ....	59
Figura 3-40. Curva fuerza – desplazamiento (gap=27,62). ....	61
Figura 3-41. Curva fuerza – desplazamiento (gap=29,84). ....	61

Figura 3-42. Curva fuerza – desplazamiento (gap=32,06).	61
Figura 3-43. Curva fuerza – desplazamiento (gap=34,28).	62
Figura 3-44. Curva fuerza – desplazamiento (gap=36,5).	62
Figura 3-45. Curva fuerza – desplazamiento (gap=38,72).	62
Figura 3-46. Curva fuerza – desplazamiento (gap=40,94).	63
Figura 3-47. Curva fuerza – desplazamiento (gap=43,16).	63
Figura 3-48. Curva fuerza – desplazamiento (gap=45,38).	63
Figura 3-49. Curva fuerza – desplazamiento (gap=47,6).	64
Figura 3-50. Detalle de deformación plastica.	64
Figura 3-51. Grafica fuerza vs desplazamiento de uniones N45kgap con diferente espaciamiento de material ASTM A500 Gr.B.	65
Figura 3-52. Grafica fuerza vs desplazamiento de uniones N45kgap con diferente espaciamiento de material ASTM A500 Gr. C.	65
Figura 4-1. Curva Fuerza vs Desplazamiento para la unión con material ASTM A500 Gr.C.	67
Figura 4-2. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap25,4.	67
Figura 4-3. Modelo 3D unión N45kgap27,62.	68
Figura 4-4. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap27,62.	68
Figura 4-5. Modelo 3D unión N45kgap29,84.	69
Figura 4-6. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap29,84.	70
Figura 4-7. Modelo 3D unión N45kgap32,06.	70
Figura 4-8. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap32,06.	71
Figura 4-9. Modelo 3D unión N45kgap34,28.	72
Figura 4-10. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap34,28.	72

Figura 4-11. Modelo 3D unión N45kgap36,5. ....	73
Figura 4-12. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap36,5. ....	74
Figura 4-13. Modelo 3D unión N45kgap38,72. ....	74
Figura 4-14. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap38,72. ....	75
Figura 4-15. Modelo 3D unión N45kgap40,94. ....	76
Figura 4-16. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap40,94. ....	76
Figura 4-17. Modelo 3D unión N45kgap43,16. ....	77
Figura 4-18. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap43,16. ....	78
Figura 4-19. Modelo 3D unión N45kgap45,38. ....	79
Figura 4-20. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap45,38. ....	80
Figura 4-21. Modelo 3D unión N45kgap47,6. ....	81
Figura 4-22. Curva fuerza-desplazamiento de N45kgap47,6. ....	81
Figura D-1. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap25.4B. ....	103
Figura D-2. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap25.4C. ....	104
Figura D-3. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap27.62B. ....	105
Figura D-4. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap27.62C. ....	106
Figura D-5. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap29.84B. ....	107
Figura D-6. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap29.84C. ....	108

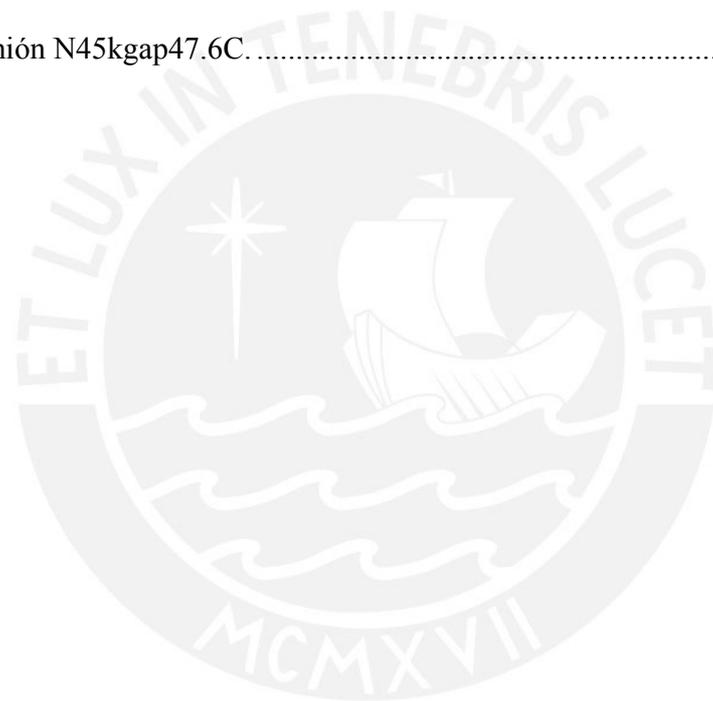
Figura D-7. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap32.06B. ....	109
Figura D-8. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap32.06C. ....	110
Figura D-9. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap34.28B. ....	111
Figura D-10. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap34.28C. ....	112
Figura D-11. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap36.5B. ....	113
Figura D-12. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap36.5C. ....	114
Figura D-13. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap38.72B. ....	115
Figura D-14. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap38.72C. ....	116
Figura D-15. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap40.94B. ....	117
Figura D-16. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap40.94C. ....	118
Figura D-17. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap43.16B. ....	119
Figura D-18. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap43.16C. ....	120

Figura D-19. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con  
escala x5 para unión N45kgap45.38B. .... 121

Figura D-20. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con  
escala x5 para unión N45kgap45.38C. .... 122

Figura D-21. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con  
escala x5 para unión N45kgap47.6B. .... 123

Figura D-22. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con  
escala x5 para unión N45kgap47.6C. .... 124



## LISTA DE SÍMBOLOS

A lo largo de la presente tesis se emplearán los siguientes símbolos:

$A_0$	área transversal del miembro cordón
$A_i$	área transversal del elemento $i$ ( $j=1, 2$ )
$E_0$	módulo de Young inicial
$E_t$	modulo tangente
$L_0$	longitud del miembro cordón
$L_i$	longitud del elemento $i$ ( $j=1, 2$ )
$M_{0,Ed}$	momento flector interno de cálculo del miembro cordón
$N$	fuerza axil nominal (tracción o compresión)
$N_u$	Estado limite ultimo
$N_s$	Estado límite de servicio
$N_{0,Ed}$	valor de cálculo del esfuerzo axil interno del miembro cordón
$N_{1\%b_0}$	carga para el 1% $b_0$ de deformación
$N_{3\%b_0}$	carga para el 3% $b_0$ de deformación
$N_f$	fuerza de fallo en la unión
$N_{i,Ed}$	esfuerzo axil interno de calculo
$R_0$	radio exterior del miembro cordón
$R_i$	radio exterior del elemento $i$ ( $j=1, 2$ )
$W_{el,0}$	modulo resistente elástico de la sección del miembro cordón
$b_0$	anchura del miembro cordón
$b_i$	anchura del elemento $i$ ( $j=1, 2$ )
$e$	espaciamiento entre las diagonales de la unión
$f_{y0}$	limite elástico del material del miembro cordón
$f_{yi}$	limite elástico del material del elemento $i$ ( $j=1, 2$ )

- $r_0$  radio interior del miembro cordón
- $r_i$  radio interior del elemento  $i$  ( $j=1, 2$ )
- $t_i$  espesor de la pared del elemento  $i$  ( $j=1, 2$ )
- $2\gamma$  cociente entre la anchura del cordón  $b_0$  y el espesor de pared  $t_0$
- $B$  cociente entre la anchura media de las diagonales  $b_l$  y la anchura del cordón  $b_0$
- $\theta_i$  ángulo entre las diagonales y el cordón ( $j=1$  o  $2$ )



## INTRODUCCIÓN

En esta tesis de investigación, se aborda el estudio de la evaluación del espaciamiento entre las diagonales de una unión tipo K de las estructuras metálicas compuestas por perfiles tubulares.

Se realiza un análisis estático de las cargas debido al peso de los elementos y equipos sobre la armadura, y carga viva generada por las personas que se proyecta transitarán por el proyecto. Además, se examina la norma E.090 Estructuras metálicas, la cual establece requisitos específicos para el diseño de este tipo de estructuras metálicas.

El desarrollo de este estudio se apoya en la utilización de modelos numéricos mediante el método de elementos finitos, utilizando el software Ansys 2019 R3. Se emplea una metodología de cálculo que involucra diferentes tipos de elementos, como vigas y elementos sólidos, y se aprovecha la simetría de la estructura para optimizar los costos computacionales.

El objetivo principal de la tesis es desarrollar un modelo numérico representativo de las uniones tubulares de armaduras tipo K, y evaluar la metodología de ensayo experimental propuesta por otros autores mencionados en el estado del arte. Asimismo, se busca contribuir al avance de la línea de investigación en este tipo de uniones metálicas.

El presente trabajo también incluye la calibración de los modelos numéricos utilizando la bibliografía sobre uniones en K de diferentes autores. Se consideran aspectos como la geometría de la unión, la sección de los perfiles, el espaciamiento de las diagonales y la resistencia del cordón, entre otros.

Además, se presentan diversos modelamientos de las uniones en K, variando parámetros como el espaciamiento de las diagonales sobre el cordón y el material de los perfiles. Se incluyen los esfuerzos últimos y de servicio, y se muestran gráficos de deflexión obtenidos a través del software Ansys.

## **CAPÍTULO 1**

### **ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL**

En el presente capítulo se exponen los objetivos y alcances del trabajo de tesis, se describen los elementos de la unión de perfiles tubulares, así como las normativas que regulan este tipo de uniones.

Así también, se presenta una revisión del estado actual de las investigaciones sobre este diseño, los ensayos de laboratorio y finalmente se desarrollan los cálculos de una estructura típica según la normativa nacional, obteniendo como resultado las tensiones en la unión que se analizan en los capítulos posteriores.

#### **1.1 OBJETIVOS Y ALCANCES**

El objetivo principal se centra en la evaluación de la resistencia debido a las tensiones a compresión en las diagonales de la unión tipo K con espaciamiento “*gap*” (Figura 1-1) variando la distancia entre las diagonales de sección cuadrada, las cuales inciden en un cordón de sección cuadrada con un ángulo entre 30° y 60°.

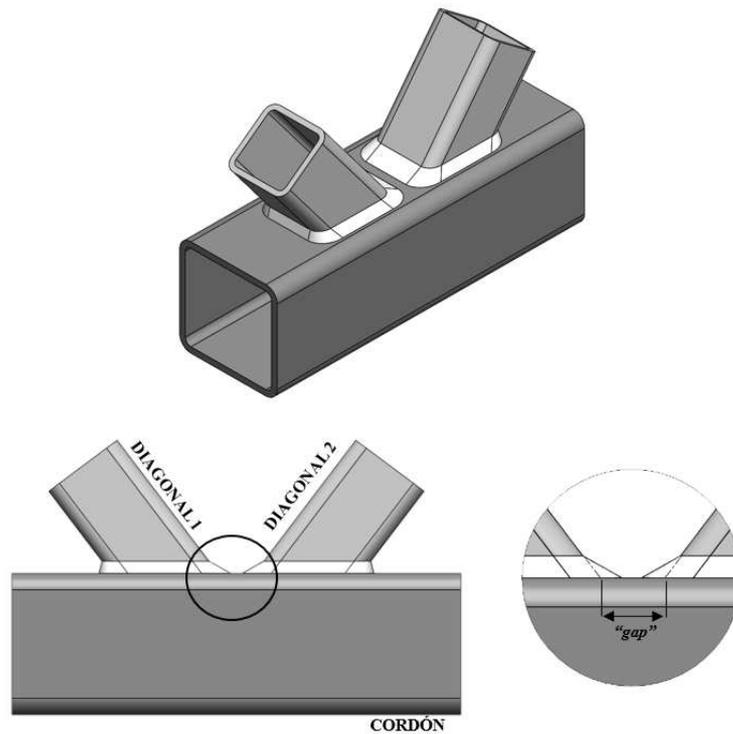


Figura 1-1. Tipología de conexión K con espaciamiento (gap).  
Fuente propia.

Entre los objetivos secundarios se busca:

- Describir el procedimiento de diseño de la unión según la normativa *EN 1993-1-8:2005* del Eurocódigo y la *guía de diseño N°3 del CIDECT*.
- Analizar una armadura Warren según la normativa E.090 Estructuras Metálicas.
- Analizar una unión en K con perfiles tubulares según procedimiento indicado en la normativa *EN 1993-1-8:2005* del Eurocódigo y la *guía de diseño N°3 del CIDECT*.
- Desarrollar un modelo numérico mediante software de las uniones tubulares en K.
- Desarrollar una metodología para el desarrollo numérico de la unión mediante el método por elementos finitos que serán calibrados por ensayos experimentales encontrados en la bibliografía existente y parametrizar la unión variando el espaciamiento y el tipo de material.

Los alcances del trabajo de investigación son:

- Este trabajo de investigación cumplirá con los lineamientos indicados en la normativa *EN 1993-1-8:2005* del Eurocódigo y la *guía de diseño N°3 del CIDECT*.
- Las acciones gravitatorias para la verificación de las secciones se obtendrán de la normativa nacional.
- Las secciones para el cordón son de tubo cuadrado SHS5"x5"x5/16" y para las diagonales de tubo cuadrado SHS 3"x3"x1/4".
- El material para los elementos de la unión serán ASTM A500 Gr. A y ASTM A500 Gr. B.
- Las uniones de estudio serán del tipo K con espaciamiento.
- Las uniones tendrán un desarrollo analítico y numérico mediante el método por elementos finitos los cuales serán calibrados por ensayos experimentales de otros investigadores.

En el capítulo I se presentan los antecedentes, el proceso de fabricación de las uniones en K traslapadas y con espaciamiento, las normas que regulan el espaciamiento en las uniones en K según la normativa *EN 1993-1-8:2005* del Eurocódigo y la *guía de diseño N°3 del CIDECT*, así como los ensayos experimentales realizados por diferentes autores indicados en la bibliografía, y el análisis de una celosía tipo Warren con cargas de gravedad indicadas en la normativa nacional *E.090 Estructuras Metálicas* para obtener las tensiones internas en los elementos que componen la unión.

En el capítulo II se describe el procedimiento analítico para la resolución de las uniones críticas analizadas en la celosía del cordón superior e inferior y el diseño de la unión con los perfiles seleccionados según la normativa *EN 1993-1-8:2005 del Eurocódigo* y la *guía de diseño N°3 del CIDECT*.

En el capítulo III se desarrolla el procedimiento numérico y la calibración de la unión basado en los ensayos experimentales de los autores indicados en la bibliografía mediante el método de los elementos finitos, se analizan además diversas configuraciones y su efecto en el cordón variando el espaciamiento entre las diagonales y el material de los componentes de la unión parametrizando los modelos obteniendo los resultados para su posterior análisis.

En el capítulo IV se analizan y discuten los resultados obtenidos en la investigación.

En el capítulo V se presenta las conclusiones del trabajo de tesis y se indican las recomendaciones para futuras investigaciones.

En los anexos se indican:

Anexo A: *Norma E090 Estructuras metálicas y Guía de diseño N°24 del AISC.*

Anexo B: *Guía de Diseño N°3 del CIDECT y el EUROCÓDIGO 3 Parte 1-8 uniones.*

Anexo C: Cálculo analítico de elementos estructurales.

Anexo D: Resultados gráficos.

## **1.2 ESTRUCTURAS DE SECCIONES TUBULARES**

En los últimos años el uso de las secciones tubulares ha aumentado debido a sus ventajas estructurales, resistencia a la corrosión, ductilidad, facilidad en el montaje, facilidad en el mantenimiento, acabado arquitectónico superior, entre otros.

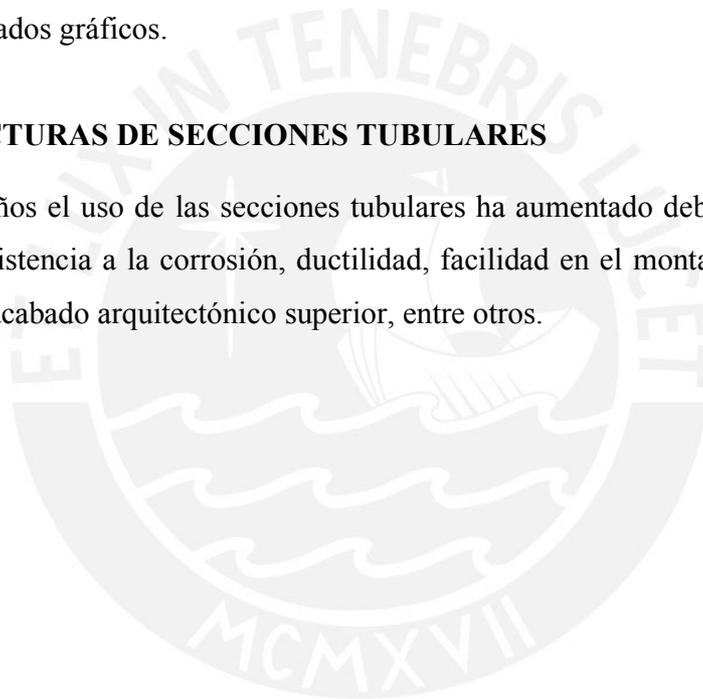




Figura 1-2. Construcción con armaduras tubulares en Chosica – Perú.  
Fuente propia.

Actualmente la tendencia en el diseño arquitectónico exhibe las estructuras de las edificaciones, en el pasado estas se escondían detrás de elementos de hormigón, albañilería u otro tipo de revestimiento, el nuevo concepto es mostrar el esqueleto de la edificación que se logra con el acero, especialmente con los perfiles de sección tubular como se aprecia en la Figura 1-2. Por ello, la utilización de perfiles de este tipo se encuentra en constante crecimiento, debido a su eficiencia estructural combinado con la geometría que proporciona una alta capacidad de resistencia a diversas acciones.

Además de estas ventajas los perfiles tubulares también presentan una alta resistencia a la torsión, pandeo, Fuerzas axiales y protección al fuego. Las secciones transversales cerradas

de estos perfiles se distinguen por tener un área menor expuesta, reduciendo los servicios por mantenimiento y minimizando costos.

Otra característica a destacar es que este tipo de estructuras presenta un bajo peso por unidad de área, reduciendo el efecto del peso muerto frente a eventos sísmicos.

### **1.3 PROCESOS DE FABRICACIÓN DE ARMADURA TIPO WARREN**

Los perfiles tubulares son muy utilizados en la construcción de puentes, aeropuertos, estadios deportivos, edificios comerciales y elementos estructurales como columnas, vigas, etc. El conjunto de estos en un mismo o varios planos se le conoce como armaduras.

La armadura Warren se caracteriza por formar una serie de triángulos isósceles o equiláteros de manera que todas las diagonales tengan la misma longitud.

Las diagonales presentan compresión y tracción con capacidad de asumir grandes luces, esta es la razón principal por la cual se recomienda este tipo de armadura, la alternancia de cargas ascendentes y descendentes hacen que los perfiles estén comprimidos en una situación de carga o traccionados en otra situación de carga, generando una geometría simétrica.

En el procedimiento de cálculo por simplificación los ejes de los elementos en la unión coinciden en un punto, evitando esfuerzos producto de las excentricidades generadas por un distanciamiento del eje, sin embargo, el proceso de fabricación encarece el proyecto debido a que no se puede automatizar los cortes y presentan mayor dificultad para el proceso; las uniones de este tipo se conocen como uniones soldadas en K traslapadas.

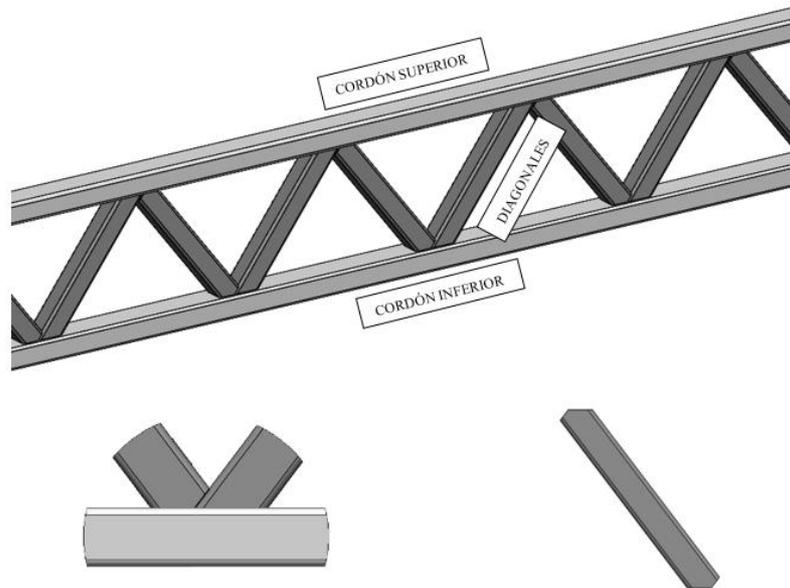


Figura 1-3. Armadura con uniones en K traslapadas y detalles.  
Fuente propia

En la Figura 1-3 los elementos que componen las armaduras son cordones superior e inferior que se reconocen también como bridas superior e inferior, respectivamente y las ramas que comprenden las diagonales (elementos con un ángulo de inclinación respecto a los cordones). Los ejes en la figura mencionada coinciden en un punto o nodo en cada unión, la unión es del tipo K con traslape, para el traslape a una de las diagonales se le debe cortar con dos ángulos distintos en diferente posición para llegar al acabado deseado, en la Figura 1-4 se muestra el procedimiento manual de corte midiendo el ángulo con un goniómetro y realizando el corte con un arco de sierra, una amoladora o tronzoadora de corte; en la Figura 1-5 para un proceso semi automatizado se coloca la pieza recortada a la medida en una máquina de sierra de inglete o sierra de cinta con inglete semiautomáticos y se realiza el corte en el ángulo requerido, luego se retira la pieza y se ajusta el ángulo para realizar el siguiente corte. Para un procedimiento automatizado en la Figura 1-6 se muestra el equipo CNC de corte, se coloca la pieza recortada y mediante programación el equipo realiza todos los cortes necesarios, luego se retira la pieza y se coloca la siguiente. La soldadura también incrementa el costo de la unión, debido a que el área de soldado no es uniforme y no se puede automatizar teniendo que realizar una soldadura manual.



Figura 1-4. Procedimiento de corte de sección tubular.  
 Imagen obtenida de <https://kartfab.com/go-kart-plans/4-ways-cut-steel-go-kart-frame>.



Figura 1-5. Maquinas semiautomáticas de corte.  
 Imagen obtenida de <https://www.kaltenbach.com/en/products/>.



Figura 1-6. Maquinas CNC de corte.  
 Fuente propia.

Para la presente investigación se considera el análisis de las uniones tipo K soldadas con espaciamiento como se muestra en la Figura 1-7, las diagonales para este tipo de unión tienen un solo corte reduciendo así el tiempo de fabricación y el costo por soldadura.

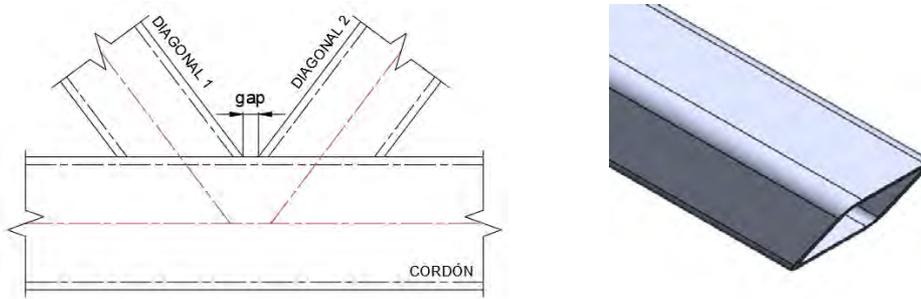


Figura 1-7. Unión K con espaciamento “gap”.  
Fuente propia.

#### 1.4 UNIÓN K SOLDADA CON ESPACIAMIENTO

La unión en K soldada con espaciamento será usada con la armadura de tipo Warren, las principales limitaciones geométricas indicadas se toma de la norma CIDECT (Figura 1-8) de la cual se basan las demás normas internacionales con ligeras variaciones en sus formulaciones para el diseño analítico de la unión.

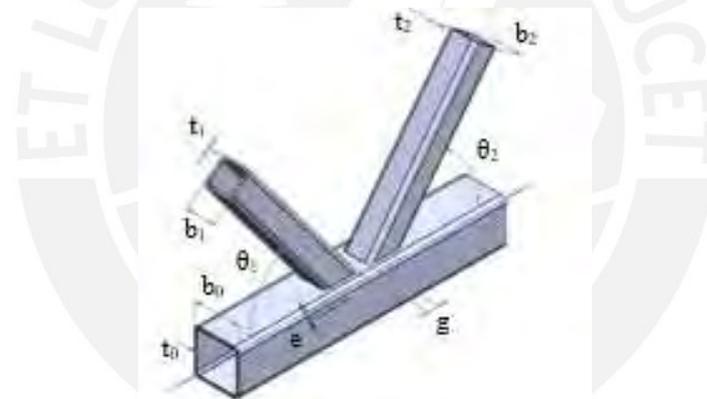


Figura 1-8. Variables en la unión K con espaciamento.  
Imagen adaptada de (CIDECT, 2009).

Las siguientes formulaciones corresponden a la norma indicada.

Rango de validación geométrico para el espaciamento “gap” ( $g$ ):

$$0.5(1 - \beta)b_0 \leq g \leq 1.5(1 - \beta)b_0 \quad (1-1)$$

La variable  $\beta$  representa la semi suma del ancho de las diagonales sobre el ancho del cordón, es decir:

$$\beta = \frac{b_1 + b_2}{2b_0} \quad (1-2)$$

Adicionalmente, verificamos que el “gap” ( $g$ ) sea mayor o igual a la suma del espesor de las diagonales

$$g \geq t_1 + t_2 \quad (1-3)$$

La excentricidad en la unión: Limita el espaciamiento.

$$-0,55 \leq \frac{e}{h_0} \leq 0,25 \quad (1-4)$$

La variable  $e$  representa la excentricidad debido al espaciamiento entre las diagonales, éste se mide desde el punto en el que coinciden el eje de las diagonales hacia el eje del cordón, como se muestra en la Figura 1-8.

Cuando la variable  $e$  se mide hacia el exterior de la armadura se asigna un valor positivo y al medirla hacia el interior obtenemos un valor negativo, para el espaciamiento entre las diagonales se obtendrá una excentricidad positiva (Figura 1-9).

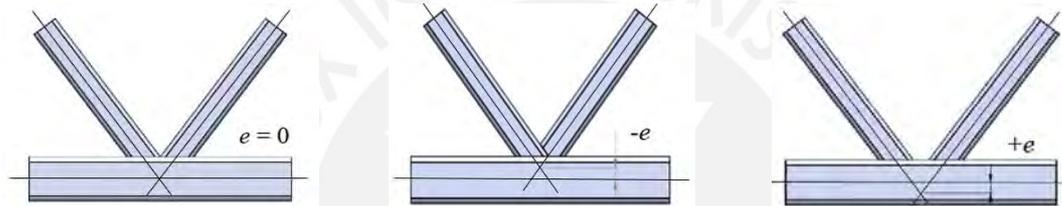


Figura 1-9. Excentricidad por espaciamiento “e”.  
Imagen adaptada de (Ochoa, 2013)

## 1.5 CRITERIO DE DEFORMACIÓN LÍMITE

Este criterio se emplea para estimar la resistencia última en uniones de perfiles tubulares antes de que se produzca el fallo dentro de los límites de las normativas.

El uso de este criterio es necesario considerando que la respuesta de falla en las uniones de perfiles tubulares (modos de fallo y curvas fuerza-desplazamiento) puede variar en función a las dimensiones y ratios entre los miembros de la unión (Zhao, 2000). Esto supone que existan casos en los que la unión no sufra pérdida de rigidez luego de la plastificación y que no se aprecie un pico de carga definido debido al efecto de membrana.

En este caso se establece un límite de deformación aproximado del 3% del ancho del cordón ( $3\% b_0$ ) para la cara del perfil en la que interactúan las tensiones de las diagonales que corresponde al estado limite último de la unión. Éste límite está actualmente normado por el Instituto Internacional de Soldadura (IIW) para el desplazamiento máximo aceptable asociado al estado limite último ( $N_u$ ), mientras que se adopta un límite del 1%  $b_0$  para el

estado límite de servicio ( $N_s$ ). Si la relación  $N_u/N_s > 1,5$  la resistencia de la unión debe basarse en el estado límite de servicio, por otro lado, si la relación  $N_u/N_s < 1,5$  el estado límite ultimo controlara el diseño y se aplica el límite del 3%  $b_0$  ( $N_u$ ) como se muestra en la Figura 1-10.

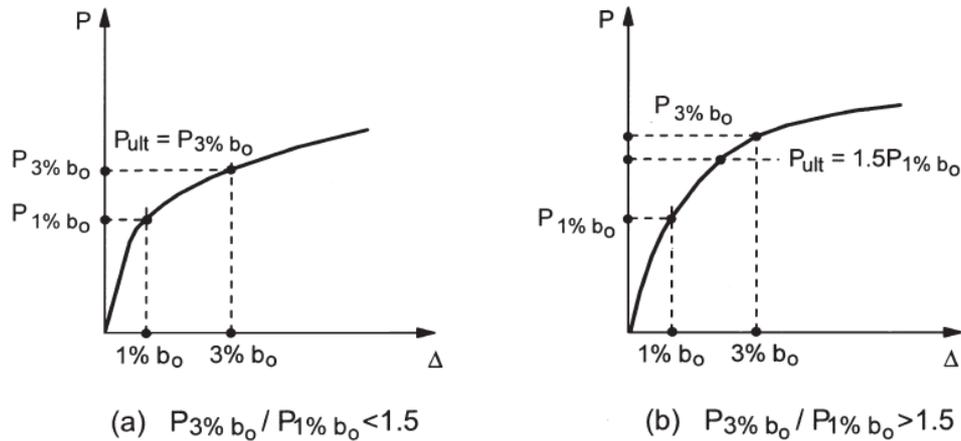


Figura 1-10. Curvas fuerza-deformación.  
Imagen obtenida de (Zhao, 2000).

## 1.6 ESTADO DEL ARTE

Las normativas que regulan el diseño de las uniones en elementos tubulares se encuentran en constante cambio, se realizan a diario investigaciones teóricas y experimentales con el objetivo de predecir el comportamiento de los elementos tubulares de la unión y su geometría a fin de optimizar el material empleado.

La Guía de Diseño N°3 para uniones de secciones cuadradas tubulares bajo cargas predominantemente estáticas está dedicada a la unión de conjuntos planos y multiplanares soldados o atornillados de perfiles de secciones cuadrada o rectangular, analizando los parámetros que gobiernan el comportamiento de la unión.

El Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero, Parte 1-8 Uniones proporciona métodos para el cálculo de las uniones, sometidos a cargas predominantemente estáticas.

En base a las normas citadas, diferentes autores trabajaron en los parámetros que regulan las uniones en perfiles tubulares, como:

- (Oliveira Mendanha, 2006) realizó la simulación FEM por computadora a partir de ensayos experimentales en uniones en K soldadas con espaciamiento en secciones tubulares circulares.

- (Jiki, 2013) en su trabajo de investigación estableció mediante simulación FEM la resistencia de la unión a diferentes medidas de espaciamiento de uniones en K soldadas con espaciamiento en secciones circulares.
- (Pajarón Santos, 2014) realizó simulación FEM de uniones en T soldadas con secciones tubulares rectangulares para obtener la resistencia de la unión y compararla con la normativa Eurocódigo.

### **1.6.1 Modelos analíticos, numéricos y experimentales**

#### **a) *Análisis de uniones de perfiles tubulares en acero tipo K y KT***

##### **Análise de ligações de perfis tubulares em aço do tipo k e kt (Oliveira Mendanha, 2006)**

Este trabajo implica el estudio teórico de las fórmulas presentadas en las normativas internacionales, análisis y calibración de modelos por elementos finitos utilizando el software Ansys a partir de ensayos experimentales realizados en prototipos a escala.

Los modelos analizados se realizaron con elemento Shell. El objetivo principal de la investigación fue evaluar la influencia de la curvatura en el cordón que es un perfil rectangular en las uniones del tipo K (Figura 1-11) y KT (Figura 1-12), los gráficos muestran la relación entre la fuerza en la diagonal a tracción y el esfuerzo que produce sobre el cordón de la unión hasta la falla comparando con el límite de fluencia y límite último del material.

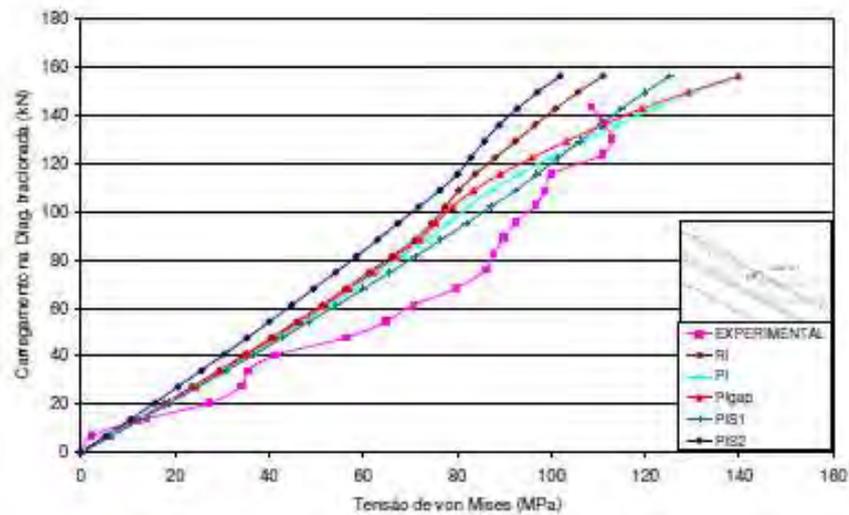
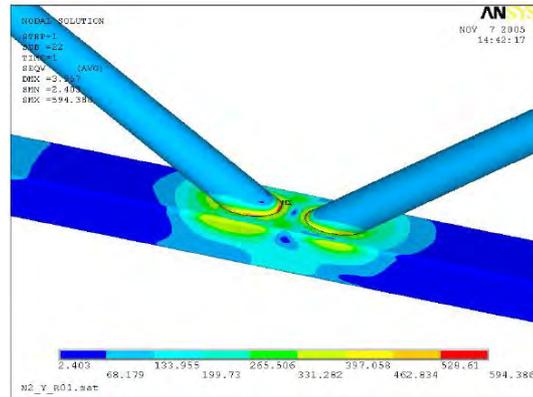


Figura 1-11. Curva Tension Von Mises – Carga en diagonal a tracción en unión K.  
Imagen obtenida de (Oliveira Mendanha, 2006).

La investigación de (Oliveira Mendanha, 2006) llegó a las siguientes conclusiones:

Los resultados numéricos obtenidos son fiables comparados con los resultados de los ensayos experimentales.

El uso de una rótula en la diagonal y/o montante donde se aplica una carga de compresión fue adecuado para restringir el desplazamiento lateral y mejorar los resultados.

Considera un apoyo empotrado en los extremos del cordón para observar la distribución de las tensiones producidas por las diagonales sobre el cordón de la unión.

Las paredes laterales del cordón muestran una independencia en la distribución de tensiones respecto a la pared superior.

Otro detalle observado en los modelos matemáticos es que la relación entre el ancho de la cara del cordón y el espesor de mismo, influye en la resistencia de la unión, por lo que cuanto mayor es la relación  $b/t$  mayor es la concentración de tensiones.

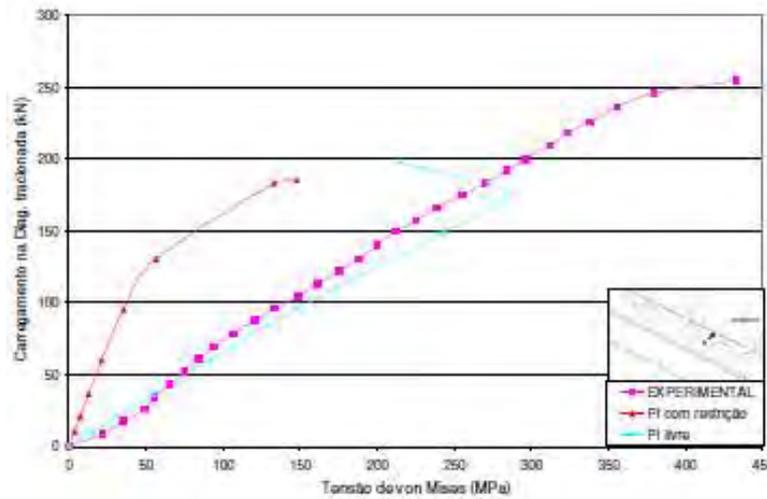
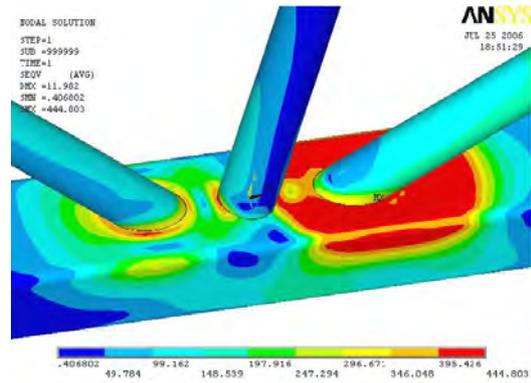


Figura 1-12. Curva Tension Von Mises – Carga en diagonal a tracción en unión KT.  
Imagen obtenida de (Oliveira Mendanha, 2006)

**b) Resultados de ubicación para el espaciamiento de diagonales en uniones tubulares tipo K usando FEM**

**Location results for brace spacing in gap tubular “K” joints using FEM (Jiki, 2013)**

Para el trabajo de investigación se realizaron experimentos numéricos para aislar y localizar el espaciamiento ideal (“gap”) para las diagonales de la unión "K". Se llegó a la conclusión que cuanto mayor sea el espacio entre las diagonales, más débil es la resistencia de la unión. También evidenció que la mejor ubicación para las diagonales ocurre cuando los esfuerzos cambian de signo de positivo a negativo o viceversa en un nodo analizado.

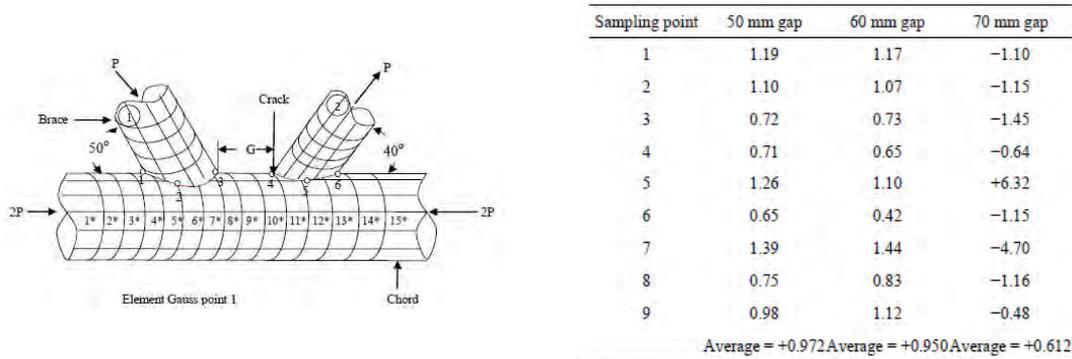


Figura 1-13. Resultados de unión en K.  
Imagen obtenida de (Jiki, 2013).

Las conclusiones obtenidas del trabajo son:

La distancia entre diagonales en la unión tubular "K" debe seleccionarse cuidadosamente para reducir la concentración de esfuerzos.

Para obtener el mejor resultado, la unión debe ser traslapada.

Los resultados óptimos obtenidos para el espaciamiento deben ser de 50 mm como máximo, esto es porque a más de 50 mm se obtiene una concentración de tensiones adversas. Se propone colocar como parámetro el valor máximo de 50 mm en el espaciamiento para evitar sobre esfuerzos en la unión (Figura 1-13).

Recomendación del uso del método por elementos finitos como herramienta ideal para una mejor selección del espaciamiento entre diagonales.

Se propone que la relación entre el espaciamiento y el diámetro del cordón debe ser mayor o igual a 1, es decir,  $g / D \leq 1$ .

**c) Análisis por elementos finitos de nudos en T de estructuras tubulares con perfiles RHS y SHS (Pajarón Santos, 2014)**

El trabajo de investigación tuvo como objetivo el ajuste numérico de un modelo de elementos finitos y validación con ensayos experimentales.

El modelamiento numérico presentó la misma dificultad que otros trabajos de investigación, y es el problema de rigidez inicial en las curvas fuerza-desplazamiento al simular de los ensayos experimentales, la rigidez inicial suele ser mayor por un defecto de medición de las galgas o un problema de carga inicial en los dispositivos para realizar el ensayo.

El Criterio de Deformación Límite propone una estimación correcta de la fuerza antes de que ocurra la falla en la unión, resultando en valores mas elevados que los propuestos en las formulaciones de las normativas internacionales.

Las ecuaciones proporcionadas por las normativas europeas para obtener la resistencia de cálculo proporcionan valores más bajos que los obtenidos en los modelos de elementos finitos y en los ensayos experimentales, promedio de 15 a 25% menos, concluyendo que las normativas europeas proporcionan valores de fuerza de fallo más conservadores.

Finalmente concluyó que es posible utilizar espesores de 2 mm en los perfiles, esto supone un gran ahorro económico al momento de realizar estructuras tubulares con perfiles RHS (Figura 1-14).

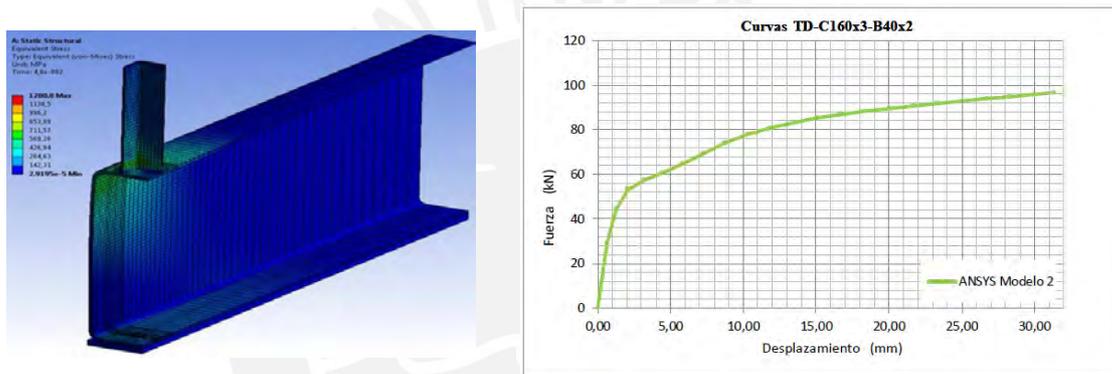


Figura 1-14. Curva fuerza-desplazamiento de unión en T.  
Imagen obtenida de (Pajarón, 2014).

### 1.6.2 Normativas regulatorias

Las normativas son las que regulan el diseño de las uniones y los elementos que la componen. En el trabajo de investigación se evaluarán las uniones principalmente con la normativa *Guía de diseño N° 3 del CIDECT* y *Eurocódigo 3 parte 1-8 uniones*.

La normativa americana que trata sobre las uniones tubulares es la *Guía de Diseño N°24 del AISC*, la normativa nacional es la *E090 Estructuras metálicas* que es una traducción de la norma americana por lo que las restricciones y resistencia de los perfiles que componen la unión presentan resultados similares.

## 1.7 PROCEDIMIENTO DE ANALISIS DE LA ESTRUCTURA

El trabajo de investigación analiza una estructura de armadura, definiéndose el comportamiento de los elementos y cargas para obtener las tensiones internas y se desarrollan las ecuaciones que interactúan en los nudos (uniones) para su evaluación según las normativas indicadas.

### 1.7.1 Hipótesis para el análisis

Todo problema de diseño estructural requiere cierto grado de simplificación para poder aproximarse al problema real, un pórtico resume una estructura de acero.

Para el procedimiento de análisis del pórtico es necesario indicar las hipótesis en que se basa:

- La estructura presenta un comportamiento elástico.
- Solo se consideran las cargas de gravedad: carga permanente y sobrecarga.

### 1.7.2 Cálculo y combinatoria de cargas

Se analizó una estructura con una luz de 30 m entre soportes, siendo el vano de 15 m entre las armaduras (Ver Anexo C).

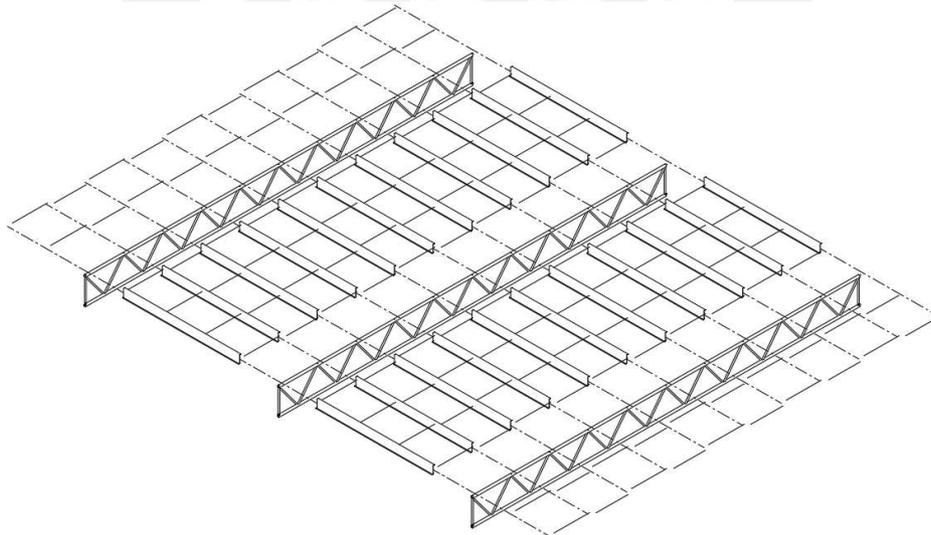


Figura 1-15. Estructura metálica de la nave.  
Fuente propia.

La estructura se considera una cobertura tipo Termotecho (TCA-PUR, ver Anexo C.)

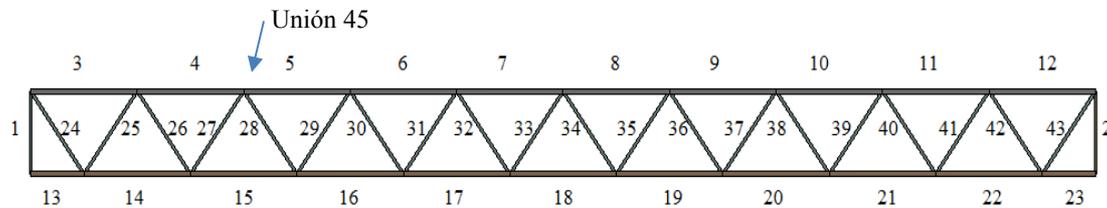


Figura 1-16. Armadura tipo Warren de sección tubular cuadrada.  
Fuente propia

### Cálculo de cargas

Carga muerta (D):

Representa la carga por el peso propio de los elementos que componen la estructura sumada a la carga por los paneles metálicos e iluminación, que es de  $31.6 \text{ kgf/m}^2$ .

Carga viva (L):

La norma E-0.20 de cargas, especifica que para techos con coberturas livianas cualquiera sea la pendiente este valor es de  $30 \text{ kgf/m}^2$ .

Combinatoria de cargas

Según normativa (E.090 Estructuras Metálicas, 2016), las combinaciones de carga para la evaluación del pórtico es  $1.2 \cdot D + 1.6 \cdot L = 85.92 \text{ kgf/m}^2$ , obteniendo para el área tributaria un valor de  $1288.8 \text{ kgf/m}$  o  $12.63 \text{ kN/m}$ .

### Consideraciones

Se asume la estructura como armadura con cargas puntuales en los nodos.

Se usará elemento tipo viga.

Se considera apoyo simple y apoyo móvil.

Se realizan dos modelos, diagonales que transmiten momento y diagonales que no transmiten momento para considerar todos los casos posibles y elegir el más desfavorable.

### Prediseño

Simplificando el modelo tenemos lo siguiente, una viga simplemente apoyada

Para las cargas actuantes sobre el tijeral se calcula como un par de fuerzas en la brida superior a compresión y la brida inferior a tracción (Figura 1-17).

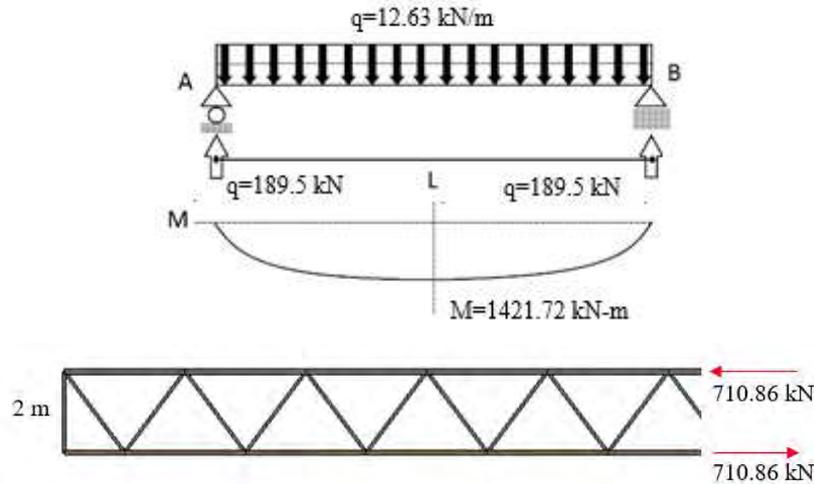


Figura 1-17. Cargas sobre las bridas en el tijeral.  
Fuente propia.

### Resultado

En una estructura tipo armadura los elementos presentan mayores Fuerzas axiales tanto de tracción y compresión.

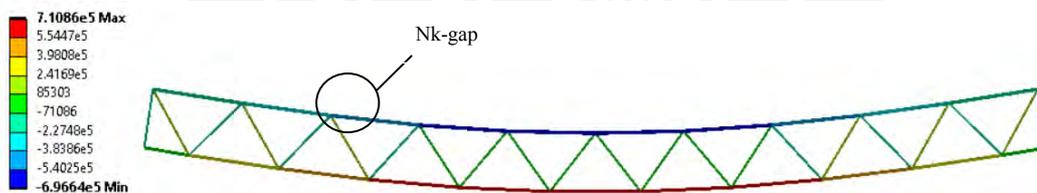


Figura 1-18. Fuerzas axiales en los elementos de la armadura (kN).  
Fuente propia.

Se considera el modelo con las diagonales articuladas por presentar mayores valores axiales a tracción y compresión, el nudo más crítico es el mostrado en la Figura 1-18 en las diagonales de los extremos.

Para la brida superior tenemos lo siguiente en los esfuerzos axiales:

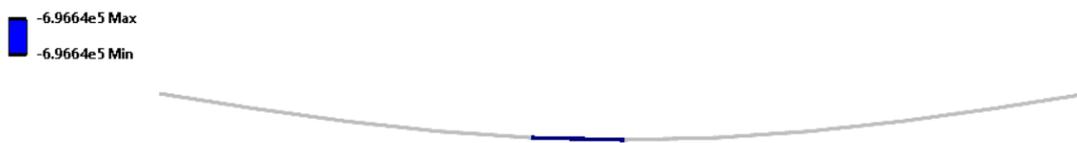


Figura 1-19. Fuerza axial en la brida superior (kN).  
Fuente propia.

En la brida inferior los esfuerzos axiales son:

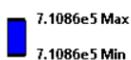


Figura 1-20. Fuerza axial en la brida inferior (kN).  
Fuente propia.

Comparando los resultados en la brida superior con los obtenidos en la Figura 1-17 tenemos una desviación aprox. 2%, para la brida inferior la desviación es aproximadamente 0%.

Tabla 1-1. Fuerzas axiales en los elementos

ID	P (kN)	ID	P (kN)	ID	P (kN)	ID	P (kN)	ID	P (kN)
1	-189.56	11	-355.43	21	454.95	31	-71.09	41	165.87
2	-189.56	12	-127.95	22	255.91	32	23.7	42	-213.26
3	-127.95	13	-221.16	23	0	33	-23.7	43	213.26
4	-355.43	14	255.91	24	213.26	34	-23.7		
5	-526.04	15	454.95	25	-213.26	35	23.7		
6	-639.77	16	<b>597.12</b>	26	165.87	36	-71.09		
7	-696.64	17	682.43	27	-165.87	37	71.09		
8	-696.64	18	710.86	28	118.48	38	-118.48		
9	-639.77	19	682.43	29	-118.48	39	118.48		
10	-526.04	20	597.12	30	71.09	40	-165.87		

Los perfiles resultantes son:

Tabla 1-2. Perfiles calculados

Descripción	Perfil	Fuerza Axial Máx. (kN)
Brida Superior	HSS5x5x0.3125	-696.64
Diagonales	HSS3x3x0.25	-213.26 / 213.26
Brida Inferior	HSS5x5x0.25	710.86
Montantes	HSS3x3x0.25	-189.56

## **CAPÍTULO 2**

### **ANÁLISIS DE LAS UNIONES CRÍTICAS EN LA ARMADURA**

En el presente capítulo se desarrolla el análisis de los elementos de las uniones críticas en la armadura presentada en el capítulo 1 evaluando con las normativas del CIDECT y EUROCODIGO.

#### **2.1 ANÁLISIS DE NUDOS CRÍTICOS**

De la armadura analizada en el capítulo 1, al nudo de análisis se le denomina Nk-gap, dependiendo de la posición del nodo se le asigna el número. El nudo crítico a analizar es el N45k-gap. En la etapa de diseño se revisa las uniones en la armadura representando los perfiles en planos y verificar interferencias, así como los elementos de unión como pernos, planchas o soldadura.

Al representar las uniones en sus dimensiones reales se tiene lo siguiente:

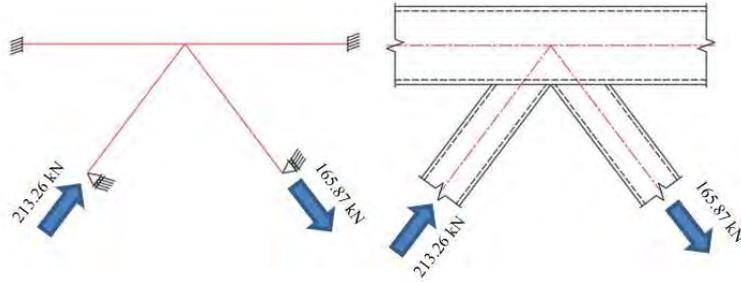


Figura 2-1. Nudo N45k-gap D.C.L.  
Fuente propia.

Para el nudo N45k-gap que representa la unión con mayores esfuerzos de las uniones en la brida superior la distancia entre los vértices exteriores de las diagonales es cero, por lo que la unión no se reconoce en el reglamento debido a las limitaciones geométricas, en consecuencia, se tendrá que dar un espaciado que cumpla con las limitantes, con ello se presenta una excentricidad ya que los ejes de los perfiles no convergen en un punto.

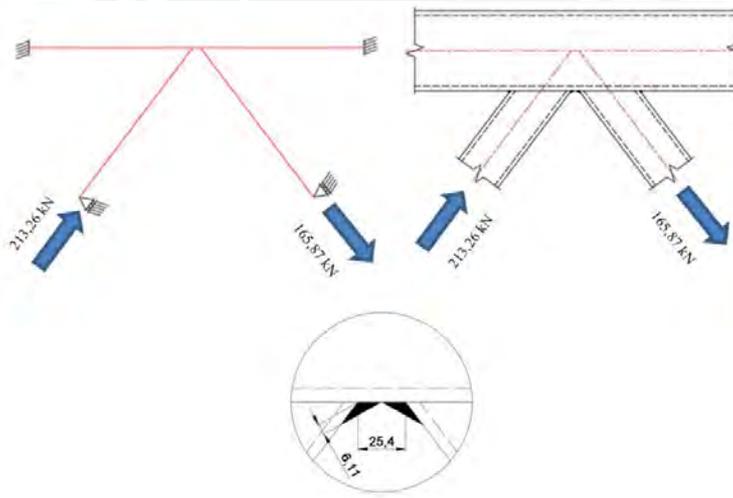


Figura 2-2. Nueva configuración Nudo 45 D.C.L.  
Fuente propia.

Para el tamaño de la garganta de la soldadura indicada en la Figura 2-2 se utiliza la referencia tomada de (Lee & Wilmshurst, 1995), la cual podemos contrastar con la normativa CIDECT para el material ASTM A500 Gr. B con un  $f_{yi} = 320 \text{ N/mm}^2$ , dando como resultado que la garganta de la soldadura  $a \geq 6.1 \text{ mm}$ .

Otra de las solicitudes de la norma es la longitud efectiva del cordón de soldadura que para un ángulo de  $53^\circ$  necesita de 320.4 mm como mínimo, la longitud mínima del modelo es de 320.6 mm cumpliendo ese requerimiento.

A la nueva configuración del nudo N45k-gap le correspondería un espaciamiento mínimo de 25,4 mm según la ecuación (1-3), siendo la denominación N45k-gap25,4.

Al generarse un espaciamiento se debe tomar atención a la excentricidad, el espaciamiento máximo entre diagonales según la misma ecuación (1-3) es de 76,2 mm (este cambio en el espaciamiento no varía la carga máxima de las diagonales) por tanto, para la evaluación de la excentricidad se tomará el valor máximo del espaciamiento, el procedimiento siguiente es según (ICT, 2007). Con ello validamos que cualquier espaciamiento que se tome entre el rango de 25,4 mm a 76,2 mm no afectara a la unión, para analizar la situación más crítica se toma el espaciamiento de 76,2 mm (Figura 2-3).

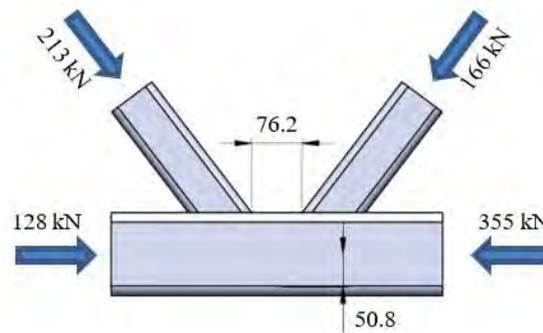


Figura 2-3. Excentricidad en la unión N45k-gap76,2. (dimensiones en mm)  
Fuente propia.

El momento generado por la excentricidad (50,8 mm) será:

$$M_e = 11,55 \text{ kNm}$$

Como la longitud y la rigidez  $E-I$  de los elementos del cordón superior son iguales a la izquierda y a la derecha del nudo, el momento  $M_e$  puede distribuirse por igual sobre ambos elementos, es decir, se calcula para:

$$M_{sd} = 5,78 \text{ kNm}$$

De los elementos a analizar se considera el más crítico, se comprueba ahora como una viga-columna mediante una ecuación de interacción a flexo-compresión:

$$\frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + k \frac{M_{sd}}{M_{Rd}} \leq 1 \quad (2-5)$$

La ecuación resuelta es de  $0,4 + 0,035k \leq 1$ , siendo  $k \leq 1,5$  es imposible que la situación analizada sea crítica, por lo que se dan definitivamente como válidos los resultados obtenidos anteriormente (ICT, 2007).

El cordón que es de sección cuadrada limita el espaciamiento como se indica en la ecuación (1-4) para la unión en estudio la excentricidad máxima es de  $e \leq 31,75$  mm, por tanto, el espaciamiento para la unión es de  $g=47,6$  mm. Se toma como espaciamiento mínimo 25,4 mm y espaciamiento máximo 47,6 mm.

## DISEÑO DE LA UNIÓN

Se resolverá la unión con el procedimiento del CIDECT y luego con el procedimiento del Eurocodigo.

### 2.1.1 Procedimiento de diseño de la unión según CIDECT

Para el procedimiento del CIDECT se divide la unión que no es puramente K en unión K y unión X tal como se muestra en la Figura 2-4.

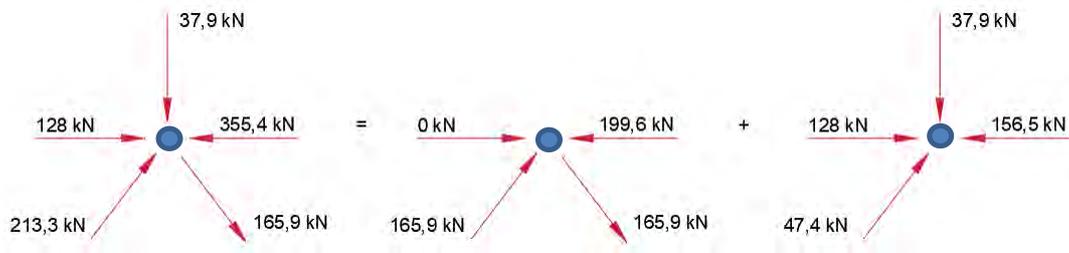


Figura 2-4. División de la unión en K y X.  
Fuente propia.

Se considera para la unión el espaciamiento mínimo de  $g=25,4$  mm.

$$n = \frac{N_0}{A_0 f_{y0}} = -0,18 \quad (2-6)$$

$$\beta = \frac{b_1 + b_2}{2b_0} = 0,6 \quad (2-7)$$

Con los valores de las ecuaciones anteriores obtenemos de la Figura 2-5 el valor de  $Q_f=0,96$ .

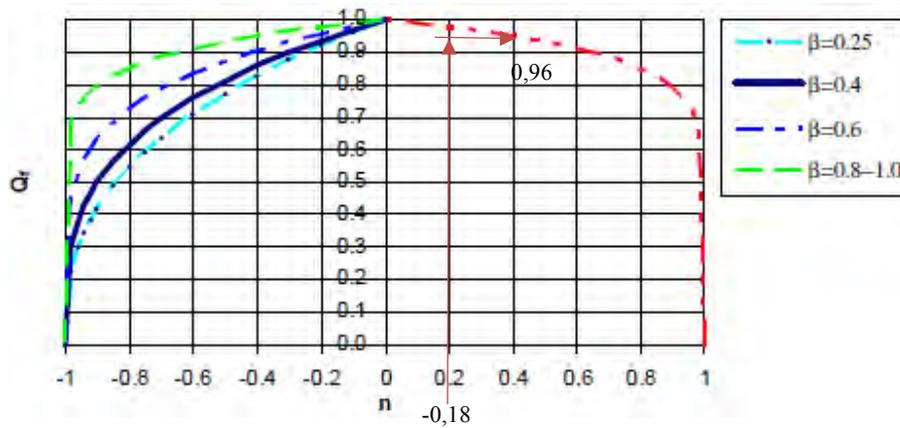


Figura 2-5. Función de carga para cordón en unión K con espaciamento.  
Imagen obtenida de (Wardenier, Packer, Zhao, & van der Vegte, 2010)

$$2\gamma = \frac{b_0}{t_0} = 16 \quad (2-8)$$

Con el valor de  $2\gamma$  obtenemos de la curva siguiente el valor de  $C_k=0,43$  (Figura 2-6).

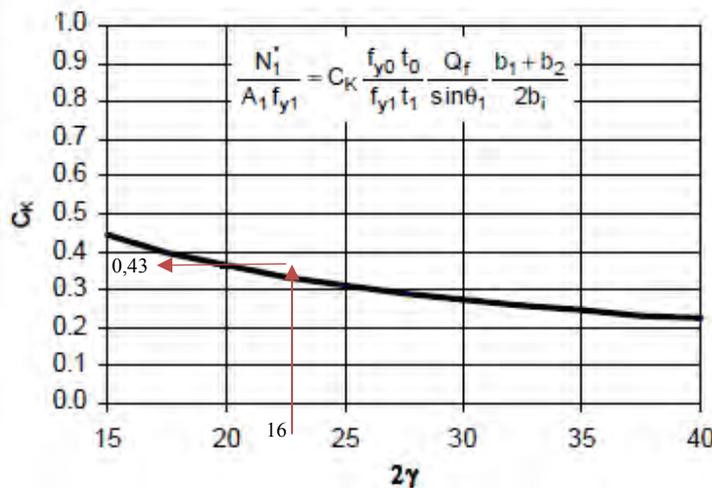


Figura 2-6. Curva eficiencia para uniones con espaciamento en K de perfiles cuadrados.  
Imagen obtenida de (Wardenier, Packer, Zhao, & van der Vegte, 2010)

Se resuelve las diagonales 1 y 2 para la unión puramente en K.

$$\frac{N_i^*}{A_i f_{yi}} = C_k \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} \frac{Q_f}{\sin \theta_i} \frac{b_1 + b_2}{2b_i} = 0,65 \quad (2-9)$$

Debido a la carga actuante para la diagonal 1 y 2

$$\frac{N_i}{A_i f_{yi}} = 0,31 \quad (2-10)$$

El ratio de utilización para la unión es

$$\frac{N_i}{N_i^*} = 0,48 \quad (2-11)$$

Para la unión en X la cual solo contiene una diagonal,

$$n = \frac{N_0}{A_0 f_{y0}} = -0,14 \quad (2-12)$$

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} = 0,6 \quad (2-13)$$

El valor de  $Q_f = 0,95$  obtenido de la Figura 2-7.

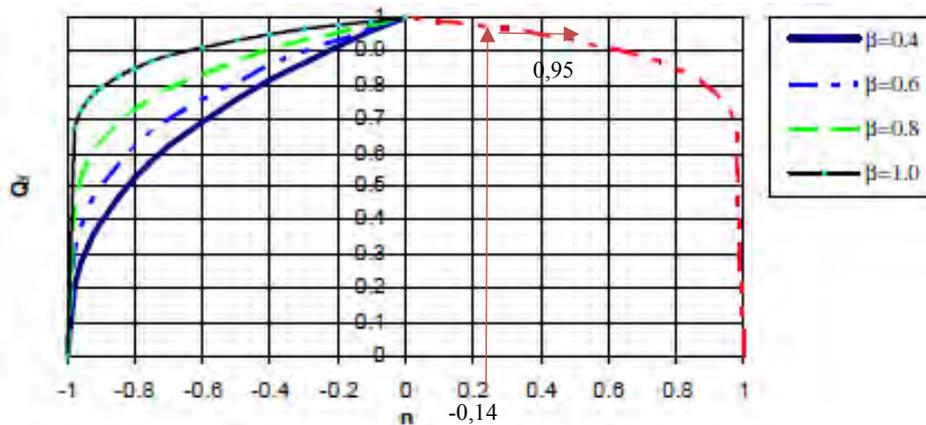


Figura 2-7. Curva eficiencia para uniones en X de perfiles cuadrados. Imagen obtenida de (Wardenier, Packer, Zhao, & van der Vegte, 2010)

Para el valor  $C_X = 0,25$  de la Figura 2-8 se utilizan las ecuaciones (2-8) y (2-13).

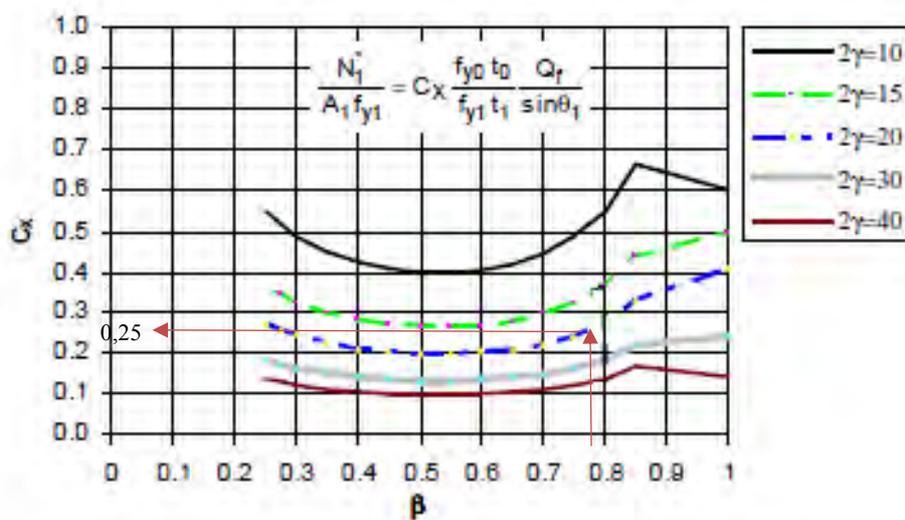


Figura 2-8. Curva eficiencia para uniones X en compresión. Imagen obtenida de (Wardenier, Packer, Zhao, & van der Vegte, 2010)

$$\frac{N_1^*}{A_1 f_{y1}} = C_x \frac{f_{y0} t_0}{f_{y1} t_1} \frac{Q_f}{\text{sen} \theta_1} = 0,37 \quad (2-14)$$

Debido a la carga actuante en la diagonal de la unión en X tenemos:

$$\frac{N_1}{A_1 f_{y1}} = 0,089 \quad (2-15)$$

El ratio de utilización para la unión es

$$\frac{N_1}{N_1^*} = 0,24 \quad (2-16)$$

La combinación de las eficiencias para la unión K y X es  $0,48+0,24=0,72 < 1$  para que se cumpla los criterios.

Para calcular en base a la tensión máxima en el elemento diagonal tenemos que:

$$N_1^* = 335,5 \text{ kN} > 213,3 \text{ kN.}$$

Las demás comprobaciones de la resistencia de la unión se pueden revisar en el anexo.

## 2.1.2 Procedimiento de diseño de la unión según Eurocódigo

Para la resolución de la unión según el Eurocódigo se considera el siguiente procedimiento:

De la Figura 2-4 tenemos lo siguiente:

La fuerza axial del cordón entre las diagonales es  $N_{0,Ed,gap}=256,37 \text{ kN}$ .

El ratio n es el cociente entre el esfuerzo y el límite elástico:

$$n = \frac{N_{0,Ed}}{A_0 f_{y0}} = -0,31 \quad (2-17)$$

El resultado del ratio en la ecuación anterior es negativo que corresponde a la tensión de compresión,

$$k_n = 1,3 + \frac{0,4n}{\beta} = 1,15 \quad (2-18)$$

El resultado de  $k_n = 1,15$  al ser mayor que 1, el valor máximo que toma es de  $k_n = 1$ .

El área resistente frente al esfuerzo cortante del cordón,

$$A_v = \left( 2h_0 + b_0 \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}} \right) t_0 = 2002,12 \text{ mm}^2 \quad (2-19)$$

Realizando las comprobaciones de ancho efectivo se aplica la fórmula para la comprobación de la resistencia en el nudo en K con espaciamiento

$$N_{1,Rd,1} = \frac{8,9k_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma}}{\text{sen}\theta_1} \beta / \gamma_{M5} = 342,5 \text{ kN} \quad (2-20)$$

El valor obtenido en la ecuación (2-19) es mayor que el valor de la tensión interna en las diagonales que al ser idénticas satisfacen la unión  $N_{1,Rd,1} \geq 213,3 \text{ kN}$  para la diagonal 1 y  $N_{2,Rd,1} \geq 165,9 \text{ kN}$  para la diagonal 2.

### 2.1.3 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2-1. Resultados según procedimientos normativos

Procedimiento	Tensión Axial Máx. (kN)
<i>Guía de diseño N°3 CIDECT</i>	335.5
<i>Eurocódigo 3 Parte 1-8 Uniones</i>	342.5

Comparando la tensión máxima obtenida por ambas normativas la diferencia es de 2%, siendo la norma del CIDECT más conservadora.

## **CAPÍTULO 3**

### **ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

En el presente capítulo se desarrolla el cálculo de los modelos teóricos definidos en los capítulos anteriores mediante el método por elementos finitos, el software con el que se desarrollan los modelos es el Ansys v.2019 R3. En primer lugar, se calibran los modelos según los resultados experimentales luego se desarrollan los cálculos con los parámetros descritos en los artículos y normativas mencionados en el estado del arte y se obtienen los resultados.

#### **3.1 DEFINICIONES GENERALES**

El método por elementos finitos consiste en un desarrollo matemático que busca encontrar soluciones numéricas aproximadas para predecir la respuesta de sistemas físicos sujetos a influencias externas y así obtener un resultado en base a una discretización de los elementos reales, el nivel de aproximación dependerá de la precisión del modelo en la que influye diversos factores.

Cuando en un sólido tridimensional Figura 3-1 actúan fuerzas sobre la configuración indeformada, éste será objeto de traslación, rotación y tracción o compresión. El resultado de estas deformaciones es la configuración deformada, la medida en coordenadas de la configuración indeformada viene dada por un tensor de segundo orden lineal (Green-Lagrange):

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3-21)$$

La Ley de Hooke generalizada resuelve las tensiones conociendo la matriz constitutiva.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (3-22)$$

Las tensiones internas del cuerpo en equilibrio de acuerdo a la segunda ley de Newton deberán cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{ij,j} + a_i = 0 \quad (3-23)$$

Las tracciones superficiales se relacionan con las tensiones internas mediante:

$$\vartheta_i = \sigma_{ji}n_j \quad (3-24)$$

Donde  $n_j$  es el vector unitario normal a la superficie.

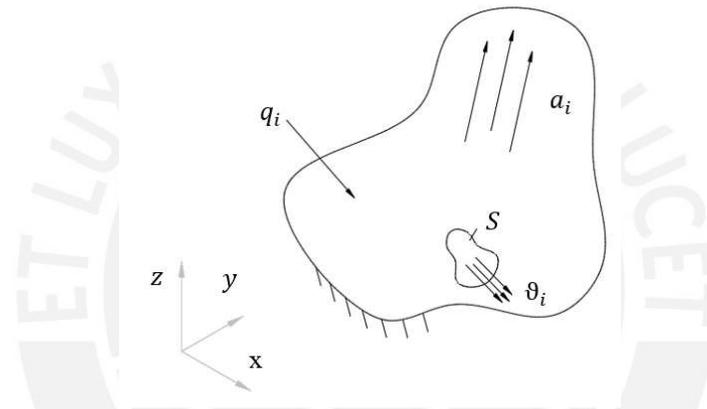


Figura 3-1. Sólido tridimensional.  
Fuente propia.

Para obtener las ecuaciones de equilibrio en la formulación por Elementos Finitos se aplica el principio de los trabajos virtuales considerando que el medio continuo está en un estado de equilibrio y se aplica un desplazamiento virtual.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \int_V a_i \delta u_i dV + \int_S \vartheta_i \delta u_i dS \quad (3-25)$$

El PTV establece que el trabajo realizado por las fuerzas externas durante un desplazamiento virtual debe ser igual al trabajo realizado por las fuerzas internas.

### 3.2 APLICACIÓN Y SIMULACIÓN NUMÉRICA

La aplicación del método por elementos finitos mediante software comienza con la creación de la geometría mediante un software de diseño asistido por computadora (CAD), se definen las propiedades físicas del modelo y los materiales que intervienen, luego se realiza la discretización (división en un número finitos de elementos), se definen las condiciones de borde del modelo (sujeciones, contactos y las cargas), que interactúan con éste, en consecuencia se obtienen los resultados para las comparaciones con la resolución analítica y calibrar el modelo comparando con ensayos reales en laboratorio.

Las investigaciones de referencia en el presente trabajo indicadas en el estado del arte sirvieron como guía para el desarrollo de los modelos en el software Ansys.

El trabajo de investigación para el modelo por elementos finitos es el Analisis de uniones en acero de perfiles tubulares tipo K y KT (Oliveira Mendanha, 2006) en el que se modelaron uniones en K soldadas con secciones tubulares circulares en las diagonales y secciones rectangulares en las bridas (Figura 3-2).

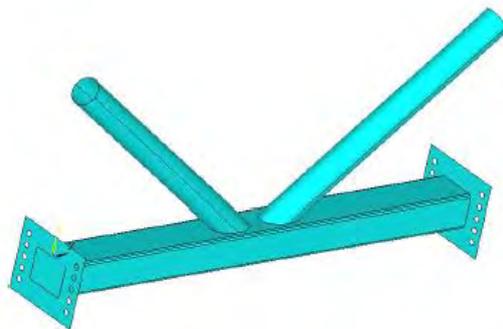


Figura 3-2. Modelo 3D de la unión en K.  
Imagen obtenida (Oliveira Mendanha, 2006).

Los modelos utilizados en este estudio fueron calibrados mediante los ensayos experimentales llevados a cabo en el laboratorio de estructuras “Prof. Altamiro Tibiriçá Dias” de PROPEC/EM/UFOP en Brasil. Estos ensayos representan los estudios mas relevantes y cercanos al presente trabajo de investigación.

Se utilizó la recomendación geométrica para la soldadura indicada por (Lee & Wilmshurst, 1995).

En el prototipo para el ensayo se instaló unas rosetas de galgas extensométricas en el centro del espaciamiento de las diagonales para obtener la deformación de ese punto y graficar los resultados (Figura 3-3).

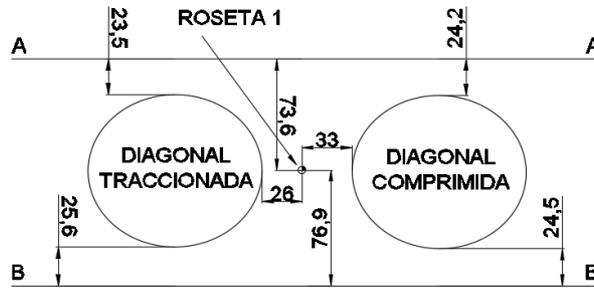


Figura 3-3. Ubicación de roseta sobre la brida, vista de planta. (mm)  
Imagen adaptada de (Oliveira Mendanha, 2006).

El autor manifestó que hay una buena aproximación en los resultados experimentales y numéricos sin embargo hay variaciones por la ubicación de la roseta debido a que el posicionamiento es manual (Figura 3-4).

Para el análisis de los modelos se utilizó un material con relación de deformación no lineal inelástico la curva esfuerzo-deformación puede idealizarse como una curva bilineal.

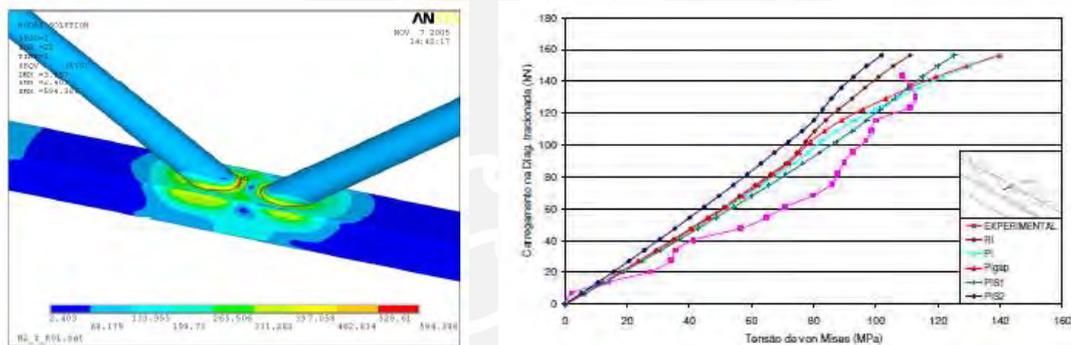


Figura 3-4. Ubicación de roseta sobre la brida.  
Imagen obtenida (Oliveira Mendanha, 2006)

### 3.3 ESTUDIO DE CONVERGENCIA DE MALLA

El estudio de convergencia de malla se realiza sobre el modelo para definir los parámetros usados en el software y reproducir una réplica fiel a los ensayos experimentales. El equilibrio entre la exactitud en los resultados al refinar la malla y el tiempo de cálculo (recursos informáticos) proporcionan una herramienta eficaz para el cálculo por elementos finitos.

Los pasos para la convergencia de malla son:

- Crear malla con el menor número de elementos que sea razonable y analizar el modelo.

- Volver a crear la malla con mayor densidad de elementos en las zonas de concentración de esfuerzos y analizar el modelo para comparar los resultados con el mallado anterior.
- Incrementar la densidad de malla de manera localizada y analizar nuevamente el modelo para lograr que los resultados converjan satisfactoriamente (Figura 3-5).

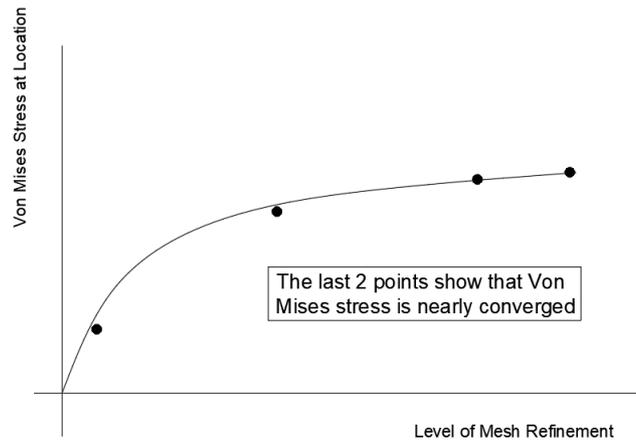


Figura 3-5. Esquema del prototipo N2-2.  
Imagen adaptada de

<https://www.nafems.org/publications/knowledge-base/the-importance-of-mesh-convergence-part-1/>

Teóricamente para un nivel sucesivo de refinamiento de malla todos los elementos del modelo deben dividirse en todas las direcciones, si bien es importante, no es necesario llevarlo a cabo en todo el modelo, el principio de St. Venant implica que las tensiones locales en una región de una estructura no afectan las tensiones en otros sectores del modelo. Se puede probar la convergencia de un modelo refinando la malla solo en las regiones de interés y retener la malla no refinada (probablemente no convergente) en otros sectores. Para ciertos modelos depende de la evaluación del mallado se debería implementar regiones de transición de mallas gruesas a finas a una distancia de la región de interés.

La diferencia común entre los resultados en la tensión son las zonas del modelo como una curva o un borde que son concentradores de esfuerzos, las cuales deben tener una alta densidad de malla, esto es un efecto de modelado en la geometría diferente a la convergencia de malla.

### 3.4 SIMETRÍA

Se puede reducir el tamaño del modelo y por tanto el tiempo de ejecución de un análisis y la demanda de recursos informáticos en un modelo por elementos finitos aplicando simetría permitiendo modelar una parte del modelo.

Las condiciones para aplicar esta técnica son que la geometría, propiedades del material y condiciones de contorno sean simétricas, así como las cargas aplicadas al modelo. A veces se reduce el tiempo de ejecución de un análisis en un factor de 16. (Engineering, s.f.).

La aplicación de la simetría se basa en la comprensión del comportamiento general, el ejemplo más utilizado es de una viga simplemente apoyada, la simetría se puede utilizar en la viga porque se conocen las restricciones como que la rotación en el centro de la viga es cero, el desplazamiento vertical en ambos lados del corte es idéntico y el desplazamiento lateral en ambos lados del corte es cero (Figura 3-6).

La simetría tiene limitaciones, por ejemplo, no aplicar en un modelo con carga no simétrica y no aplicar en un análisis dinámico.

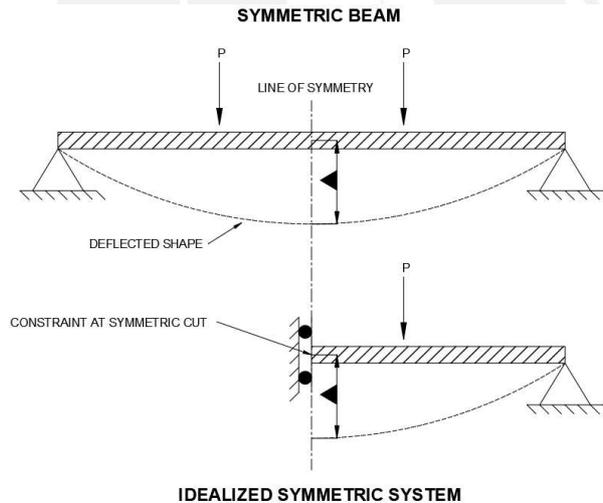


Figura 3-6. Simetría en una viga.

Imagen adaptada de

<https://www.xceed-eng.com/reducing-fea-runtime-with-symmetry/>

### **3.5 CALIBRACIÓN CON MODELOS PREVIOS**

Analizar mediante el Método de los Elementos Finitos los fenómenos físicos y mecánicos es un procedimiento rápido y económico que permite el estudio de modelos a costos inferiores de los ensayos reales permitiendo recoger más información y conclusiones certeras.

Para las propuestas de uniones en K con espaciamiento de la tesis a tratar el empleo del análisis mediante elementos finitos será una potente herramienta.

Para el proyecto se procede a crear diversos modelos numéricos que simulen condiciones de carga y de contorno variando el espaciamiento de las uniones en K, las fiabilidades de los modelos analizados serán calibrados de ensayos experimentales reales revisados en el estado del arte.

#### **3.5.1 Metodología de modelamiento por elementos finitos**

Para la representación del modelo numérico se recrea de la forma más exacta los ensayos experimentales llevados a cabo por Fabiano Oliveira Mendanha para uniones en K, acorde a las conclusiones se ha reproducido un modelo para las uniones en perfiles tubulares de armaduras.

El objetivo de realizar varios modelos es abordar varias posibilidades geométricas que pueden representar la unión K con espaciamiento, la variación de los esfuerzos Von Mises están en función del espaciamiento entre las diagonales de la unión.

La geometría de los elementos que componen las uniones, consiste de láminas de diferente espesor doblados y que se unen mediante soldadura.

Para la iniciación del modelado de los elementos de la unión primero se debe realizar el diseño en un programa asistido por computadora.

#### **3.5.2 Pasos y procedimiento de análisis**

Para obtener una correcta simulación en los programas de elementos finitos es necesario seguir unas pautas en el análisis para conseguir resultados precisos y convergencia en las soluciones cuando se realiza un análisis no-lineal. Este análisis tiene en cuenta la rigidez que experimenta la unión en K con espaciamiento ante la carga aplicadas. La rigidez será función de la geometría y de los materiales que la constituye.

De la información recolectada en los demás documentos del estado del arte se puede establecer un algoritmo para procedimiento de cálculo (Figura 3-7).

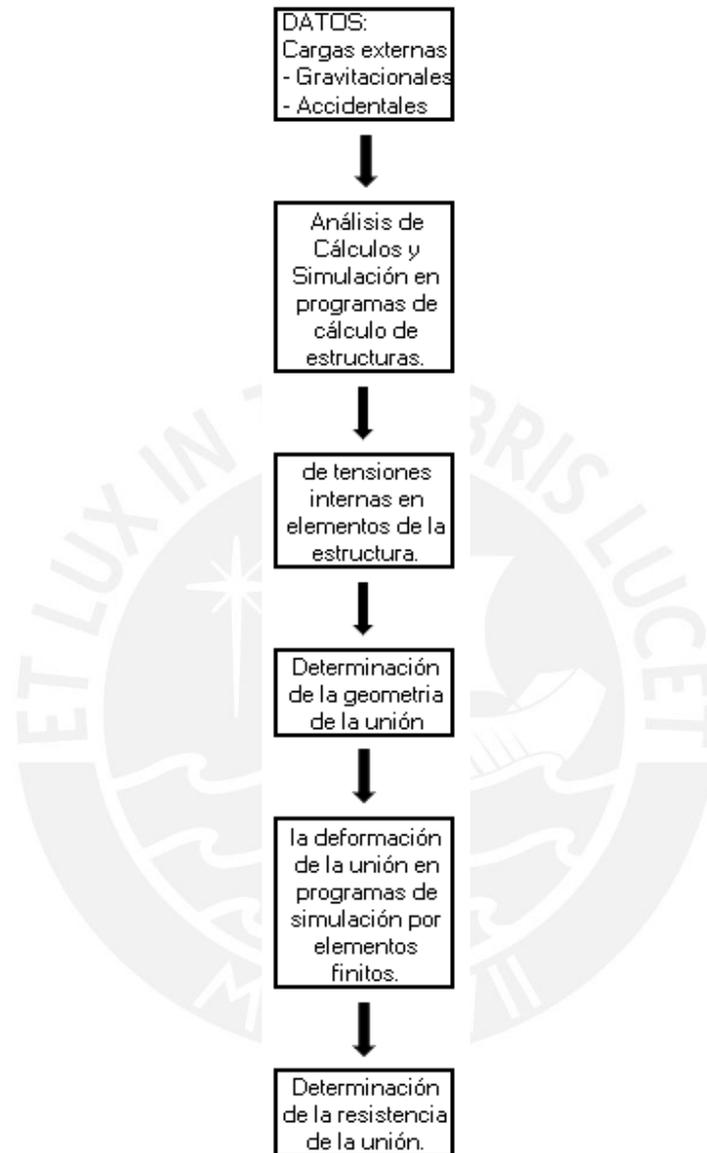


Figura 3-7. Algoritmo de cálculo.

Fuente propia.



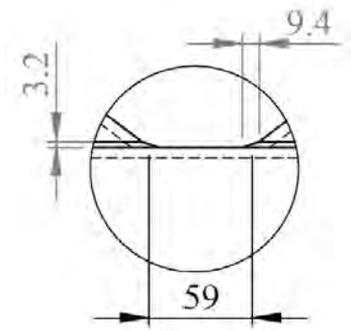


Figura 3-9. Detalle del cordón de la soldadura.  
Fuente propia

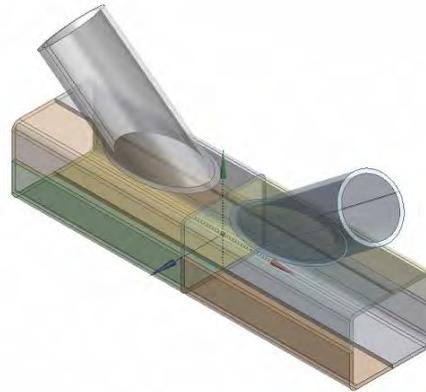


Figura 3-10. Modelo sólido de la unión N2-2.  
Fuente propia.

En la Figura 3-10 se muestra los elementos sólidos que intervienen en la unión en la que se produce las tensiones críticas de la unión.

Posteriormente se realizó el sketch de los ejes de las diagonales y bridas hasta completar las longitudes que se usaron en la experimentación (Figura 3-11).

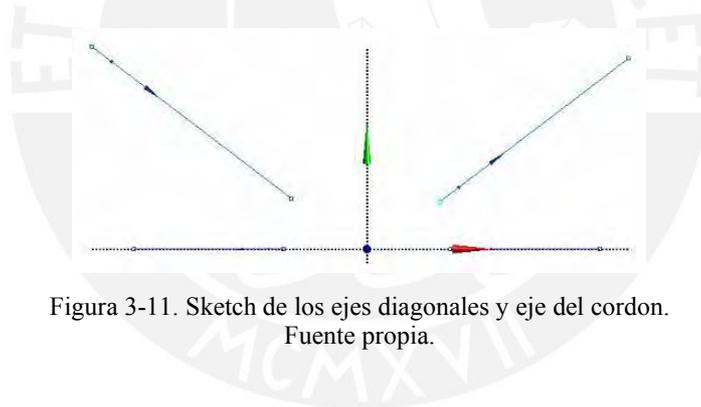


Figura 3-11. Sketch de los ejes diagonales y eje del cordón.  
Fuente propia.

### 3.5.4 Tipo de elemento

Para el modelo se ha empleado elementos SOLID 186 (Figura 3-12) y BEAM 188 (Figura 3-13) que están disponible en el programa Ansys por defecto. SOLID 186 es un elemento sólido 3D de 20 nodos con 3 grados de libertad en cada nodo: traslación en los 3 ejes. El desplazamiento del elemento es cuadrático.

Soporta plasticidad, hiperelasticidad, fluencia, grandes desviaciones y la deformación.

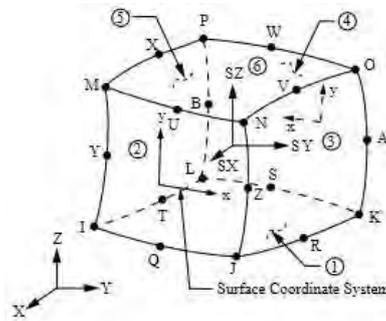


Figura 3-12. Esquema del elemento SOLID 186.

Imagen obtenida de

[https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans\\_help\\_v182/ans\\_elem/Hlp\\_E\\_SOLID186.html](https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID186.html)

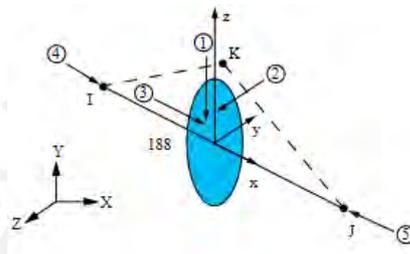


Figura 3-13. Geometría del elemento BEAM 188.

Imagen obtenida de

[https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans\\_help\\_v182/ans\\_elem/Hlp\\_E\\_BEAM188.html](https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_BEAM188.html)

BEAM 188 es un elemento lineal, cuadrático o cúbico de dos nodos en 3D, cada nodo tiene 6 grados de libertad. Soporta elasticidad, plasticidad, fluencia y otros modelos de materiales no lineales.

### 3.5.5 Definición de malla y convergencia

A mayor número de elementos empleados los resultados obtenidos en un análisis por elementos finitos son mejores pero el costo computacional que supone a nivel de memoria y tiempo de cálculo exige que se realice un estudio de la malla óptima, llegando a un compromiso entre la calidad de los resultados y los recursos empleados en su obtención.

Para los elementos que conforman la unión en K con espaciamiento es conveniente utilizar un mallado con elementos rectangulares uniformes, de manera que la malla sea lo más uniforme posible y se obtengan resultados precisos. El método de obtención de una malla adecuada pasa por un análisis de convergencia.

Para el modelo se ha realizado un mallado en los miembros cordón y diagonales mediante el empleo de métodos de mallado que generan cuadriláteros.

El estudio de convergencia radica en determinar el tamaño adecuado de los elementos cuadrangulares que conforman la malla de la unión en K con espaciamiento, a partir del estudio de la deformación máxima en el eje global Y, es decir la deformación correspondiente a la cara del cordón que produce la abolladura de este, cuando se aplica la misma carga, la carga está aplicada a las diagonales como axiales a tracción y compresión.

La malla se afina hasta que exista convergencia en los resultados para la calibración (Figura 3-14).

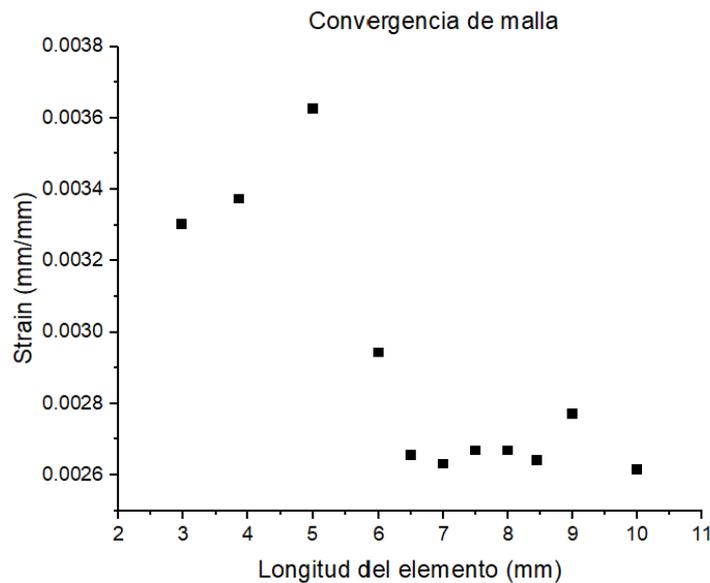


Figura 3-14. Curva desplazamiento máximo del eje Y – tamaño de elementos.  
Fuente propia.

Se observa que el valor de la deformación converge para tamaños de elementos del rango de 6.5 mm a 8.5mm, se adapta por seguridad un tamaño de elementos de 7.5 mm que proporcione resultados con un alto porcentaje de fiabilidad y un costo computacional de tiempo y memoria asumibles. No se consideró trabajar con la simetría del modelo porque los elementos no están simétricos respecto de ningún plano de trabajo.

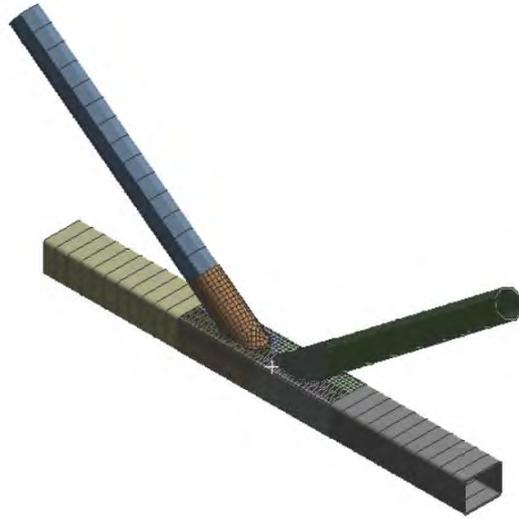


Figura 3-15. Mallado del elemento sólido y lineal.  
Fuente propia.

Para el elemento lineal el mallado no es necesario que sea refinado ya que los esfuerzos críticos se encuentran cerca de la unión entre los elementos (sólidos) como en la Figura 3-15.

Tabla 3-1. Resumen de propiedades de mallado N2-2

Tipo de elemento	Núm. de elementos	Núm. de nodos	Núm. de partes
Sólido	6456	37247	3
Lineal	49	102	4

La unión entre los elementos tipo sólido y elementos tipo viga se hacen mediante un nodo rígido (restringido en los 6 grados de libertad), el cual se crea en el centroide de la cara del sólido y el punto próximo de la viga, este punto construye una araña de elementos en todos los nodos de la cara hacia la viga, todas las fuerzas y momentos pasan por ese único punto así se transmite las tensiones entre ambos tipos de elementos (Figura 3-16).

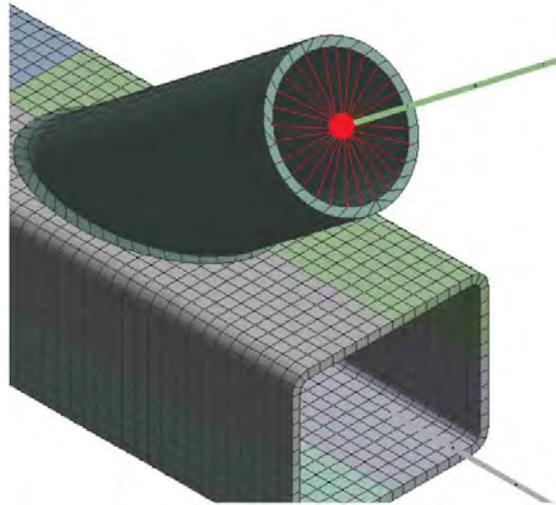


Figura 3-16. Nodo rígido entre elemento sólido y elemento lineal.  
Fuente propia.

Para verificar la correcta conexión se verifica los desplazamientos en el modelo (Figura 3-17).

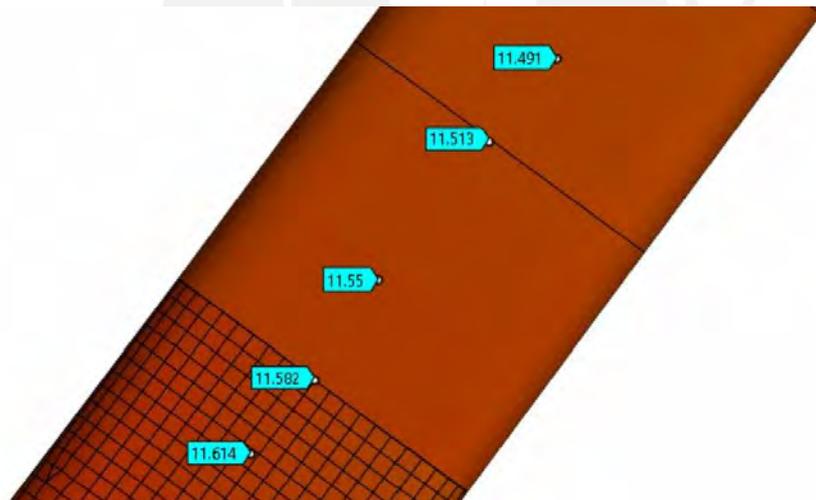


Figura 3-17. Gráfico de desplazamiento en conexión entre viga y sólido. (mm)  
Fuente propia.

### 3.5.6 Modelado del material

Los principales materiales son los ensayados por (Oliveira Mendanha, 2006), acero estructural no lineal con las siguientes propiedades (Figura 3-18).

Tabla 3-2. Datos del material ensayado por (Oliveira Mendanha, 2006).

Descripción	Valor
Módulo de Young	2.05E+05 MPa
Coefficiente de Poisson	0.3
Módulo de compresibilidad	1.7083E+11 Pa
Modulo cortante	7.8846E+10 Pa

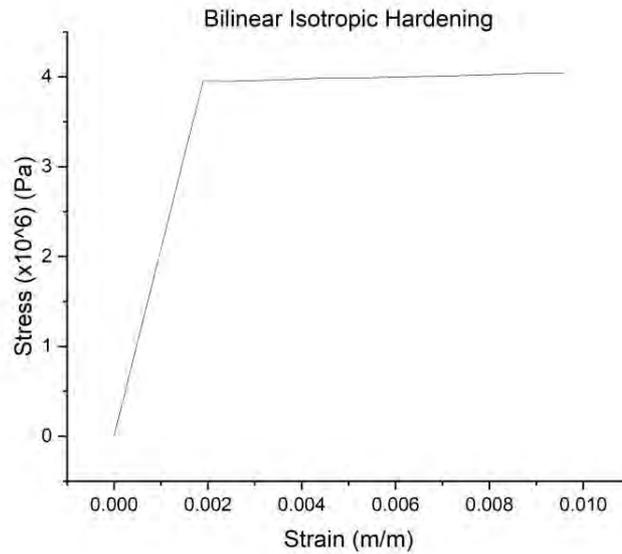


Figura 3-18. Gráfico Strain – Stress del material.  
Fuente propia.

### 3.5.7 Modelado de la soldadura

El modelado de las soldaduras es importante para el comportamiento adecuado del modelo y la obtención de los resultados que vayan acorde a los ensayos experimentales.

Un cordón de soldadura realizado se considera satisfactorio cuando al ocurrir una falla se da en los miembros de la unión y no en la soldadura.

Las medidas de los catetos de la soldadura se definen según (Lee & Wilmshurst, 1995), siguiendo la recomendación (Figura 3-19). Se modela los cordones de soldadura tal como se muestra en la Figura 3-20.

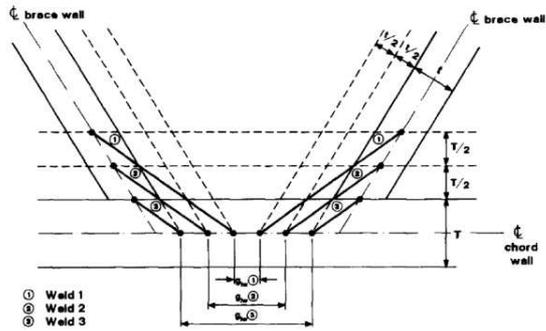


Figura 3-19. Esquema de soldadura.  
Imagen obtenida de (Lee & Wilmshurst, 1995).



Figura 3-20. Soldadura en unión N2-2.  
Fuente propia.

El material de la soldadura no está definido en la tesis guía, se considera el mismo material del cordón para todo el modelo, soldadura y diagonales.

### 3.5.8 Modelado de cargas

El modelo de elementos finitos tiene por objetivo determinar las tensiones y deformaciones producidas en los miembros de la unión en K con espaciamento al aplicar cargas axiales de tensión y compresión, de esta manera se pueden reproducir las fuerzas de colapso y los distintos modos de fallo que aparecen en la unión. También se pueden obtener las tensiones, deformaciones y desplazamientos o tensión – deformación similar a las que se obtienen en un ensayo real (Figura 3-21).

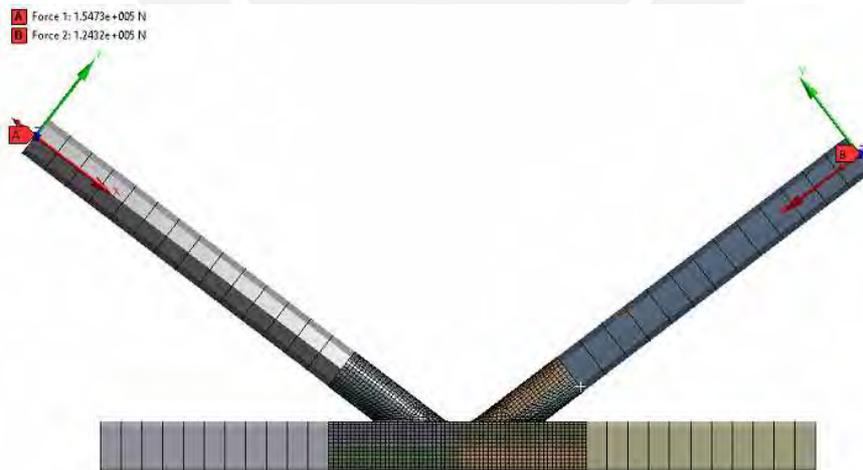


Figura 3-21. Acciones sobre el modelo.  
Fuente propia.

### 3.5.9 Modelado de contactos y las condiciones de contorno

Para tener un modelo numérico válido y preciso es fundamental definir correctamente las condiciones de contorno que presenta la unión, se puede por motivos de comodidad y mejora del mallado confeccionar partes solidarias y estas a su vez independientes unas de otras según convenga. Por lo que es necesario establecer contactos entre las distintas partes que se hayan formado o mantener todas las partes conectadas como un solo sólido.

Los contactos para el elemento sólido se definen como contacto tipo bounded que hace que las superficies en contacto que lo comparten queden unidas entre sí, estos se aplican entre las caras inferiores de las diagonales y la cara superior del cordón o brida.

El modelo debe empotrarse en los extremos de la brida restringiendo los extremos en los seis grados de libertad (Figura 3-22).

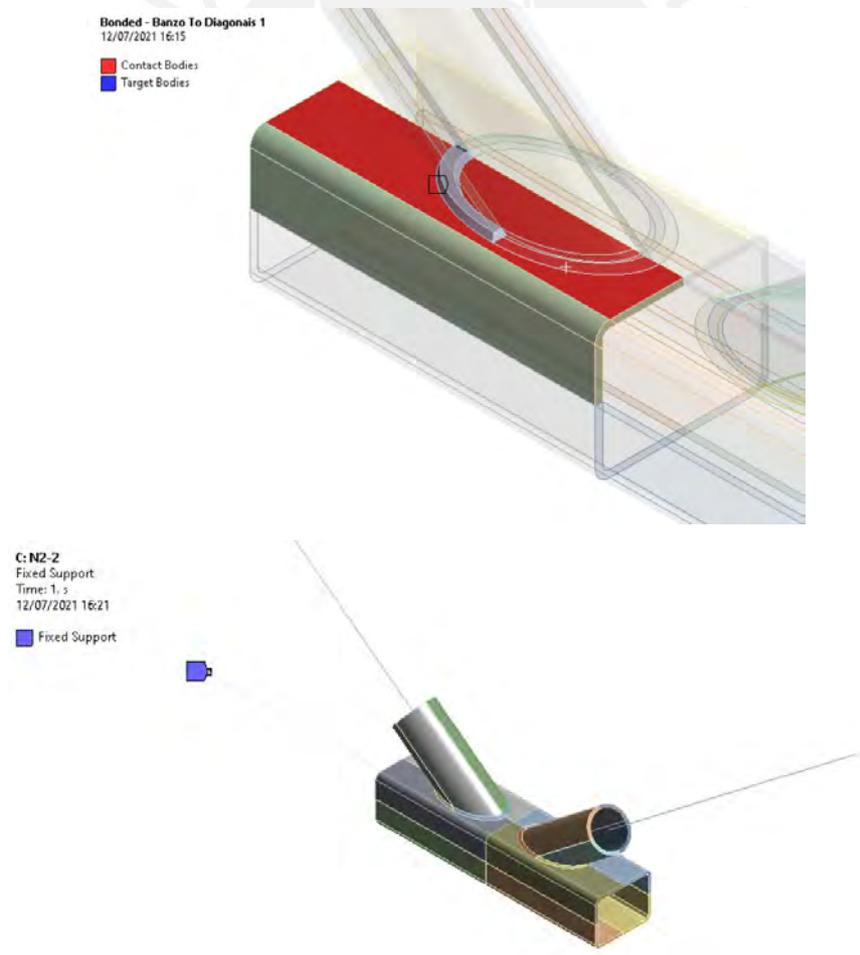


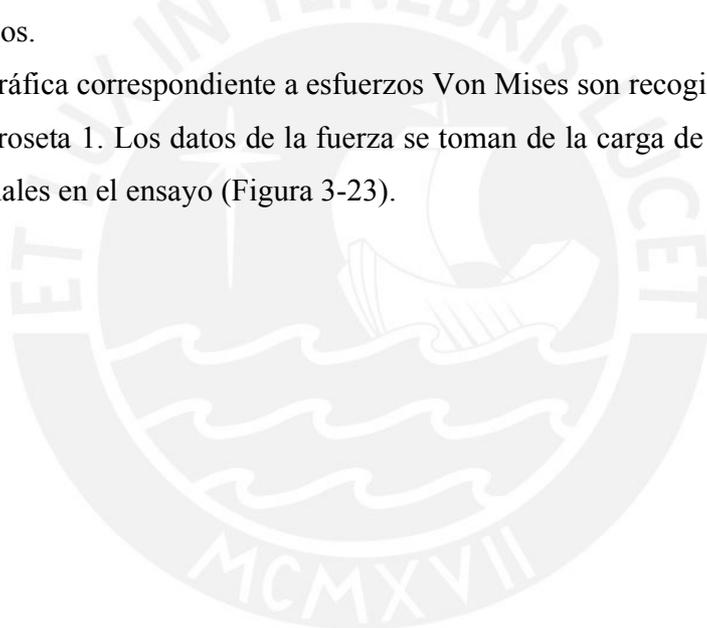
Figura 3-22. Restricción entre diagonales y brida, empotramiento de los extremos de la brida.  
Fuente propia.

### **3.5.10 Verificación de los modelos de elementos finitos**

Teniendo los modelos descritos a utilizar como geometría, contactos, condiciones de borde y cargas, definidas las características y curvas tensión-deformación de los materiales, se comprueba que el modelo es válido y se puede proceder a su calibración y validación. En la presente tesis se utilizan para la validación del modelo numérico, resultados de ensayos experimentales con perfiles tubulares de acero soldados en K con espaciamiento y sometidos a cargas axiales de tensión y compresión.

Las curvas Esfuerzo-Tensión del comportamiento de las uniones en K con espaciamiento de perfiles tubulares provienen de los ensayos experimentales llevados a cabo por el laboratorio de estructuras ensayos recogidos por (Oliveira Mendanha, 2006) para el desarrollo de los modelos numéricos.

Los datos de la gráfica correspondiente a esfuerzos Von Mises son recogidos del nodo en la que se instala la roseta 1. Los datos de la fuerza se toman de la carga de compresión sobre una de las diagonales en el ensayo (Figura 3-23).



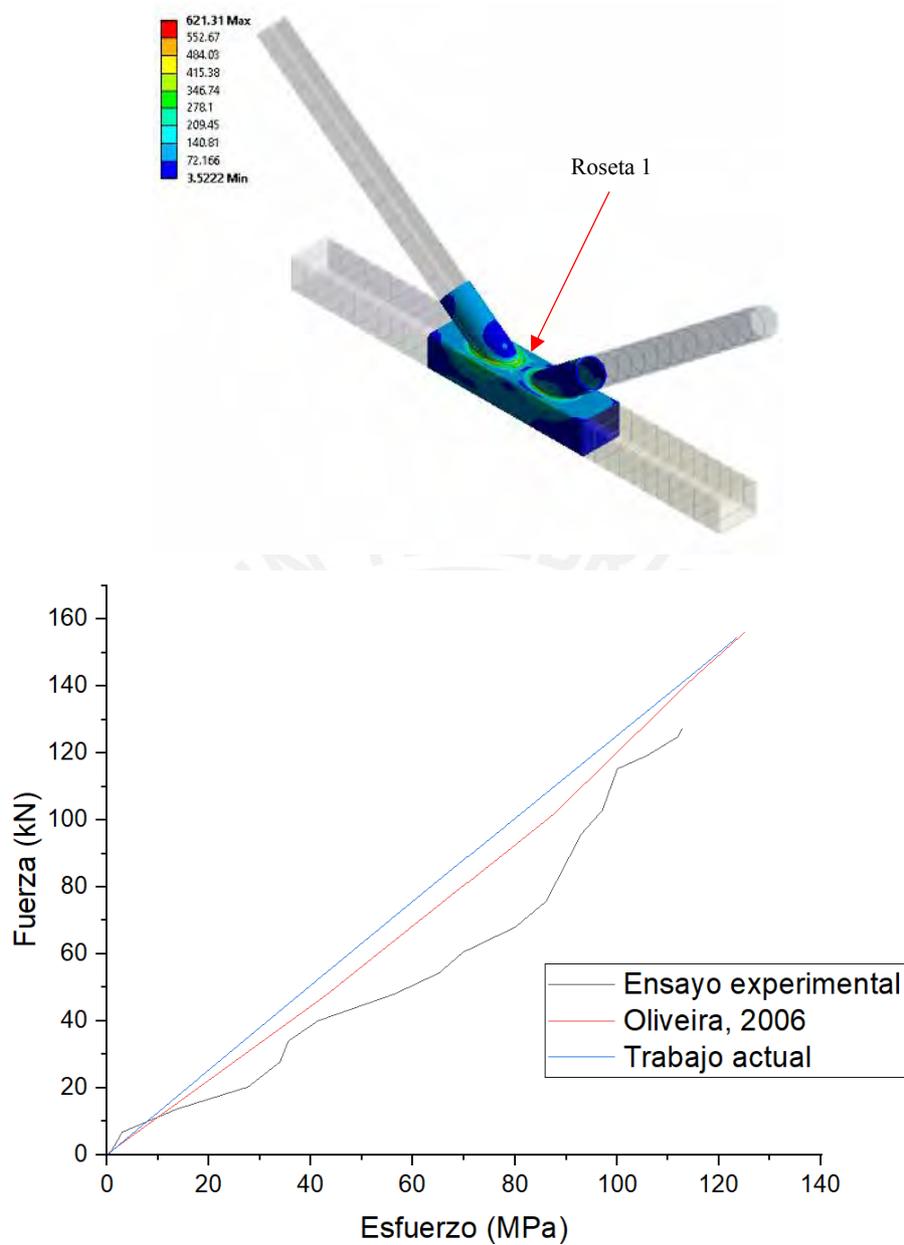


Figura 3-23. Esfuerzos Von Mises en el modelo, curva Esfuerzo-Tensión.  
Fuente propia.

### 3.5.11 Resultados del análisis

Para calibrar los modelos de elementos finitos y poder validarlo en función de la respuesta que dan las curvas fuerza-desplazamiento, se realizan una serie de experimentos para ver cómo les afectan diversos factores, y obtener así, modelos fidedignos que simulen de una manera correcta los resultados obtenidos en los ensayos experimentales.

### **Influencia de los medidores**

Al modelizar la unión se obtuvo los datos para generar la curva Fuerza-esfuerzos Von Mises situando el punto a desplazar en el centro de la brida en la cara superior (punto medio entre diagonales Roseta 1) tal como dispone la galga de medición en el ensayo experimental de (Oliveira Mendanha, 2006) para medir las tensiones producidas por las cargas axiales en las diagonales, una segunda galga (Roseta 2) se instala en el punto central del lado frontal de la brida.

En la Figura 3-24 se aprecia las galgas de medición instaladas debido a la geometría y disposición es probable que esta no pueda colocarse exactamente en el punto indicado en las caras de la brida y la curva de respuesta del modelo varíe.



Figura 3-24. Disposición de las galgas de medición.  
Imagen obtenida de (Oliveira Mendanha, 2006).

Por ello en la Figura 3-25 se simula la influencia de la posición de la galga en puntos más cercanos a la cara de las diagonales en la Roseta 1 y lo mismo para la Roseta 2, los nodos que se eligen en la dirección del eje Z y eje -Z.

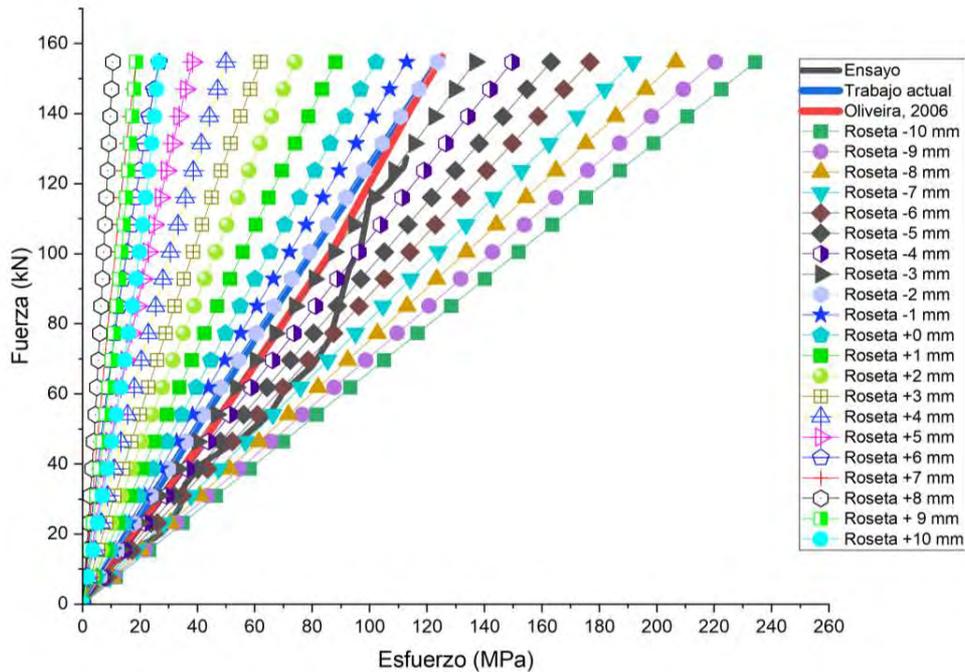


Figura 3-25. Curva Esfuerzo Tensión, influencia de la posición de la galga (Roseta 1).  
Fuente propia.

Se observa que el posicionamiento del nodo para la toma de datos de tensiones cambia respecto a la posición, la galga no es un punto sino cubre un área, por ello la ubicación del punto para la toma de medidas influye en la respuesta Esfuerzo-Tensión del modelo significativamente, siendo la curva Roseta -3mm con los valores más aproximados a los del ensayo. En la Figura 3-27 se indica la posición de cada roseta respecto al eje central de la brida la posición varía en 1 mm en sentido negativo o positivo de acuerdo al plano YZ.

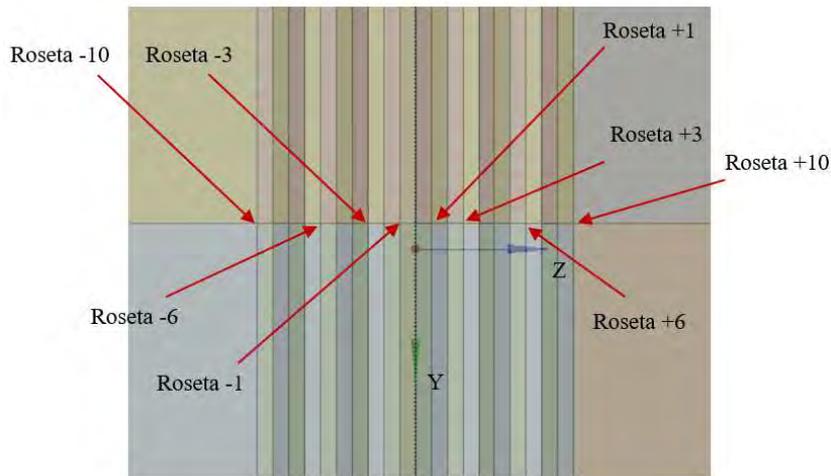


Figura 3-26. Posicionamiento de roseta sobre la parte superior de la brida.  
Fuente propia.

Para la Roseta 2 en la Figura 3-27 se observa que la curva Roseta -10mm obtiene los valores más aproximados al ensayo.

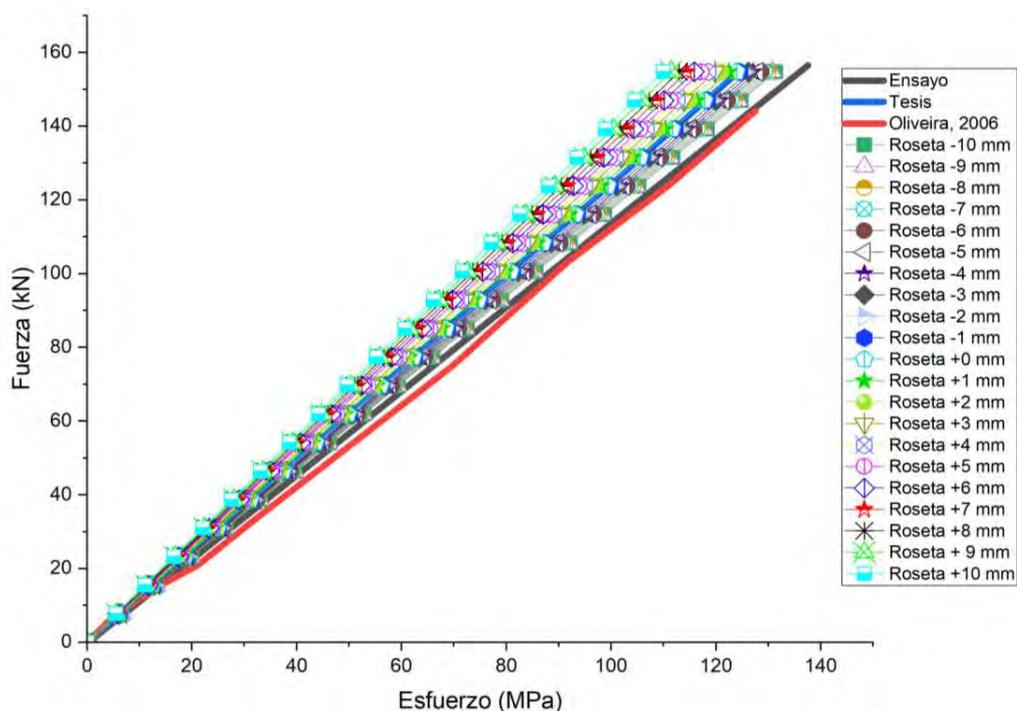


Figura 3-27. Curva Esfuerzo-Tensión, influencia de la posición de la galga (Roseta 2).  
Fuente propia.

En la curva Esfuerzo-Tensión se observa que la respuesta desarrollado en Ansys es similar a la del ensayo experimental en la zona lineal y en la zona no-lineal, el pico de carga máxima es ligeramente superior por lo que puede tomarse este modelo como válido ya que la fuerza de pico es prácticamente la misma y el modo de fallo que experimenta es el mismo, haciendo que el desplazamiento producido por la abolladura en la cara superior y lateral del cordón tenga valores próximos a los que se obtuvieron en el ensayo experimental.

### 3.5.12 Unión N45k-gap en armadura

Con la calibración realizada en el modelo anterior, se procede a simular el modelo de la unión resuelta analíticamente en el capítulo 2.

Se considera analizar la unión N45k-gap que está situado en la brida superior porque es la más crítica al estar sometido a una carga de compresión. Se muestran las medidas y

condiciones de la unión en la Figura 3-28. El espaciamiento inicial considerado es de 25.4 mm.

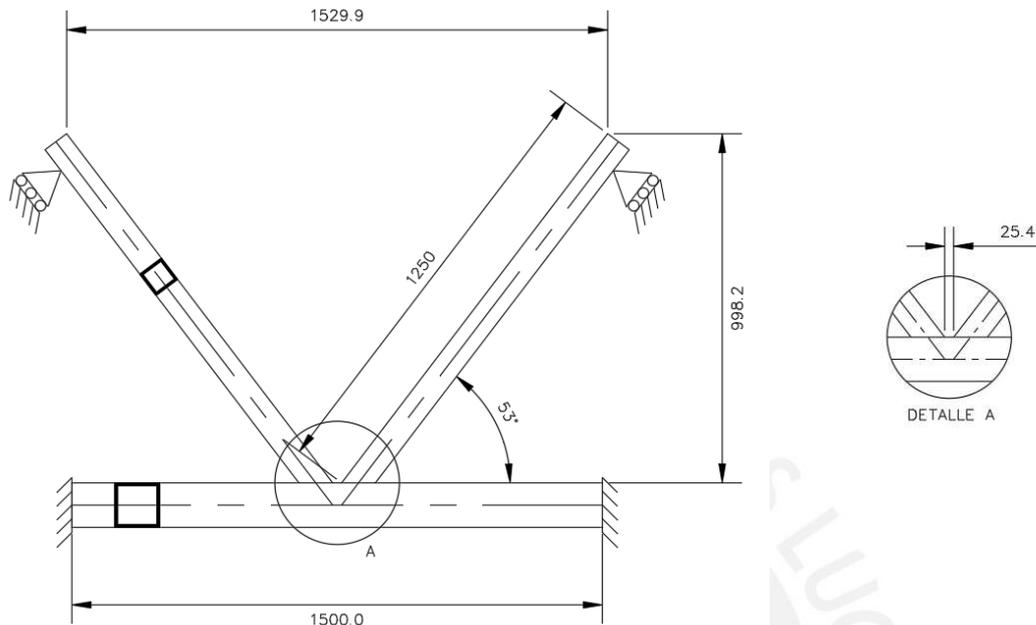


Figura 3-28. Dimensiones de la unión propuesta. (mm)  
Fuente propia.

Los materiales declarados en el programa Ansys sería el material normado en ASTM A500 Gr. B

Yield Strength = 320 MPa.

Tensile Ultimate Strength = 400 MPa.

Tangent Modulus = 0 MPa.

Para obtener el módulo tangente se necesita una muestra del material, realizar un ensayo de tracción y crear el modelo de plasticidad multilínea con los datos obtenidos, sin embargo, no podría ser conservador porque la muestra tomada puede obtener una mayor resistencia y el modelo podría construirse con un material que está por encima de la resistencia mínima en su especificación.

Por lo que se construye el modelo de manera conservadora utilizando el módulo tangente de cero y así utilizar la resistencia mínima indicada en la especificación. Si el diseño resiste la carga máxima para el material asignado entonces cualquier otro diseño superara el análisis realizado por tanto es conservador.

Se construyó el modelo siguiendo el mismo procedimiento de la unión N2-2 con elementos sólidos y lineales, la brida y las diagonales son de sección tubular cuadrada (Figura 3-29).

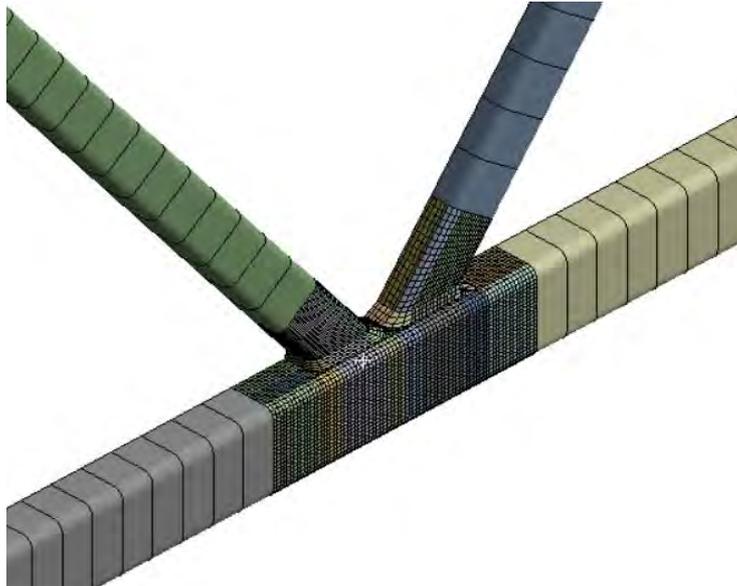


Figura 3-29. Modelo 3D de la unión Nk-gap.  
Fuente propia.

Tabla 3-3. Resumen de propiedades de mallado Nk-gap

Tipo de elemento	Núm. de elementos	Núm. de nodos	Núm. de partes
Sólido	15793	76714	3
Lineal	56	116	4

Se realizó el estudio de malla en la unión, el tamaño de los elementos de malla se va reduciendo hasta encontrar una convergencia en los resultados.

Los elementos fueron refinados de manera local definiendo un área de acción en la que los esfuerzos son mayores en todo el modelo, aplicado en la parte sólida.

En la Figura 3-30 se observó que para un tamaño de elemento de 5.5 mm se puede analizar la unión para estudiar los resultados.

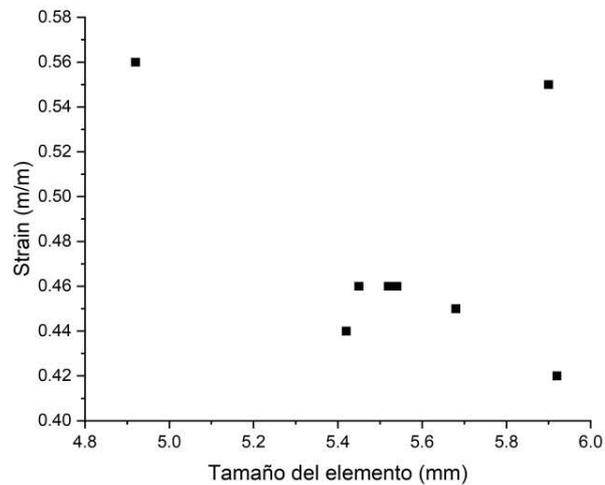


Figura 3-30. Curva Strain – Tamaño del elemento.  
Fuente propia.

Tal como se indicó para el modelo de calibración el tamaño de malla para los elementos tipo lineal viga no influyen en los resultados porque la concentración de esfuerzos se da en el espaciamiento entre diagonales de la cara superior de la brida.

En la Figura 3-31 se muestra el conector ficticio que restringe los seis grados de libertad entre los elementos lineales y sólidos, fusionándolos.

Para este modelo que tienen propiedades similares en uno de sus planos, se utiliza la simetría en ese plano con las secciones construidas son a la mitad del perfil para ambos casos HSS 5X5X0.3125 para la brida y HSS 3X3X0.25 (Figura 3-32).

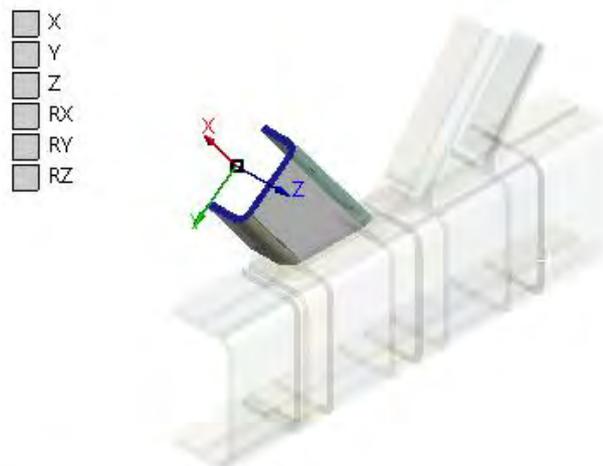


Figura 3-31. Conector nodo ficticio sólido a viga.  
Fuente propia.

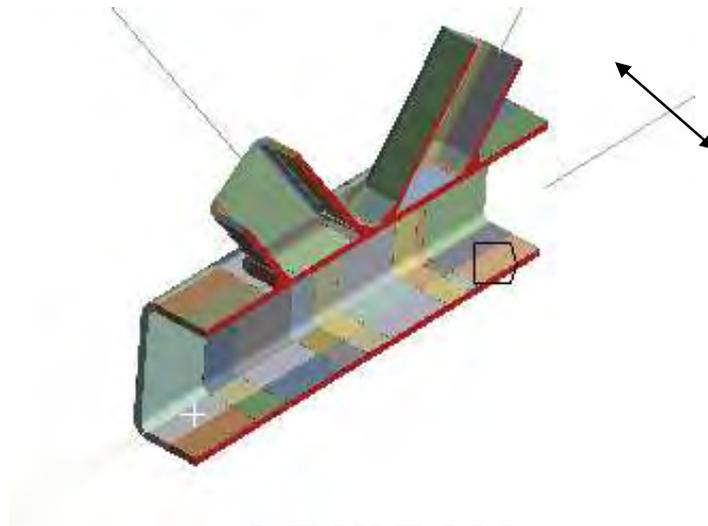


Figura 3-32. Simetría en el plano X.  
Fuente propia.

Según Figura 3-28 las restricciones para el cordón se consideraron empotrados en los extremos y desplazamiento axial en las diagonales. Las tensiones internas sobre las diagonales se cargaron a tracción con un valor de 82,935 kN y a compresión con un valor de 106,63 kN.

Force Z: 1.0663e+005 N  
Components: -1.0663e+005;0;0



Figura 3-33. Carga a compresión en eje de diagonal.  
Fuente propia.

En la Figura 3-34 se muestra la deformación máxima y esfuerzos Von Mises máximos para la unión.

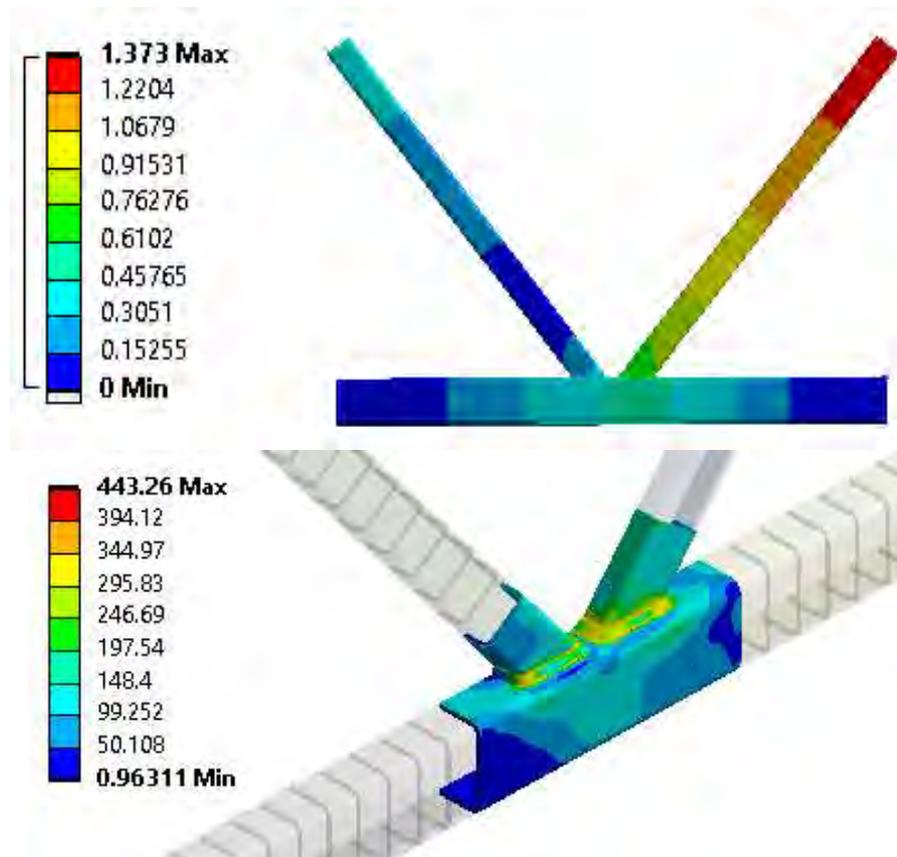


Figura 3-34. Deformación global de la unión y esfuerzos Von Mises (MPa).  
Fuente propia.

### 3.5.13 Verificación de los modelos de elementos finitos

Una vez validado el modelo con la calibración de los resultados experimentales se verificó que las fuerzas máximas permitidas antes de que ocurran los modos de fallo que experimenta la unión se corresponden numéricamente con los valores que propone el CIDECT, contrastando así la capacidad que tiene la unión.

#### a) *Unión N45k-gap25.4*

El modo de fallo que se produce en la unión 45 corresponde a un fallo por rotura o agotamiento de la cara de la brida. La curva obtenida fuerza - desplazamiento no proporciona un valor distinguido de la fuerza antes de que se produzca el fallo por ello se empleó el Criterio de Deformación Limite (Figura 3-35), para lo cual se incrementó el valor de las fuerzas que actúan en las diagonales para lo que se empleando las tensiones internas máximas

permitidas por la normativa para el tipo de unión de 350 kN en tracción y compresión (Figura 3-36).

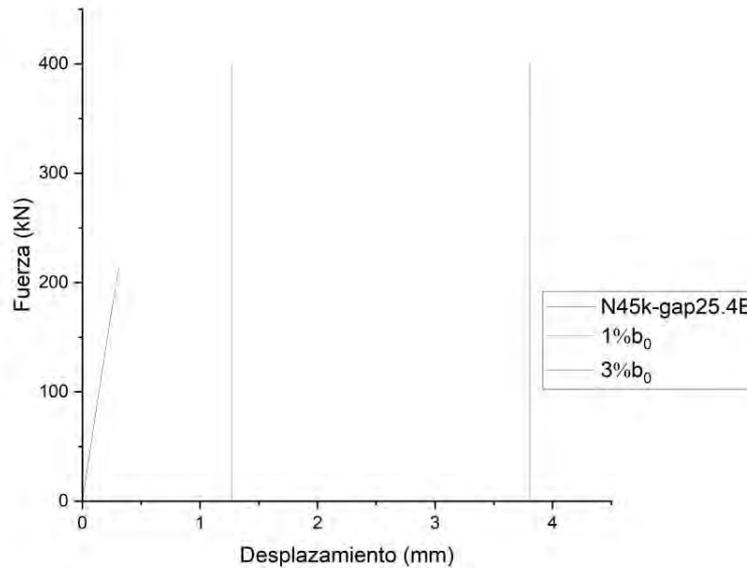


Figura 3-35. Curva fuerza – desplazamiento (213.26 kN).  
Fuente propia.

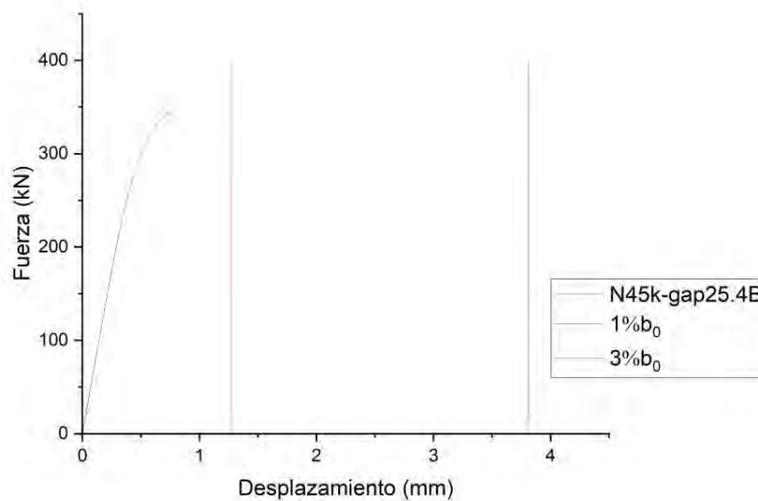


Figura 3-36. Curva fuerza – desplazamiento (350 kN).  
Fuente propia.

(Lu, de Winkel, Wardenier, & Yu, 1994), (Kosteski, Packer, & Puthli, 2003) y (Zhao, 2000) validaron y establecieron un límite de deformación aproximado del 3%  $d_0$  en la brida ( $N_u$ ) para la carga correspondiente a la cara donde se conecta las diagonales. Éste límite

actualmente también es aceptado por el Instituto Internacional de Soldadura para el desplazamiento máximo aceptable asociado al estado limite final, mientras que  $1\% b_0$  ( $N_s$ ) se adopta para establecer el estado limite de servicio. Si la relación  $N_u / N_s$  es mayor que 1.5 la resistencia de la unión se debe basar en el estado limite de servicio de lo contrario el estado limite final lo controla el diseño y se aplica el  $3\% d_0$ .

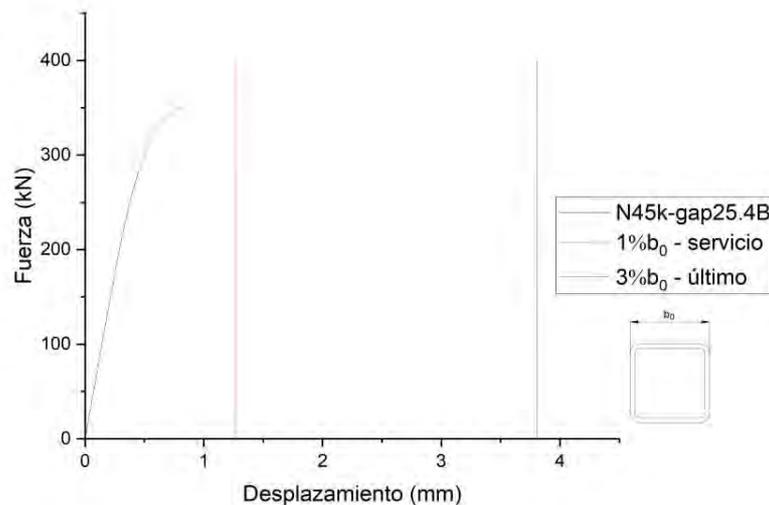


Figura 3-37. Curva fuerza – desplazamiento para unión N45kgap25,4B.  
Fuente propia.

Para el Criterio de Deformación Límite se emplea la curva fuerza – desplazamiento que corresponde a la galga instalada a 20 mm del borde externo de la diagonal a compresión.

De la Figura 3-37 se observa que las cargas aplicadas para el modelo son bajas para la unión por lo que se incrementó el espaciamiento a 43.16 mm mostrado en la

Figura 4-18 las cargas pueden medirse según el Criterio de  $L_u$  por lo que para un  $1\% b_0$  el valor obtenido de la gráfica es  $N_s = 331,85$  kN y el  $3\% b_0$  es  $N_u = 342,97$  kN del cual  $1.5 N_s > N_u$  por lo que la fuerza máxima permitida en la unión antes del fallo es  $N_u = 342,97$  kN.

La fuerza  $N_u$  es mayor que la fuerza máxima permitida en la unión dada por la norma CIDECT es de 335,5 kN y EN de 342,5 kN, analizando el ratio entre la fuerza antes del fallo de los modelos de elementos finitos y la resistencia de cálculo que proporcionan las normativas siendo los ratios de 1.02 y 1.00 respectivamente, se concluye que el modelo por elementos finitos desarrollado en Ansys para el modelo

N45kgap se ajusta a las normativas indicadas, resultando las ecuaciones de cálculo de la fuerza antes del fallo más conservativas que el Criterio de deformación Limite aplicado al modelo de elementos finitos.

Se realizó una comparación de los desplazamientos máximos obtenidos para la unión modelado con simetría y sin simetría (modelo completo):

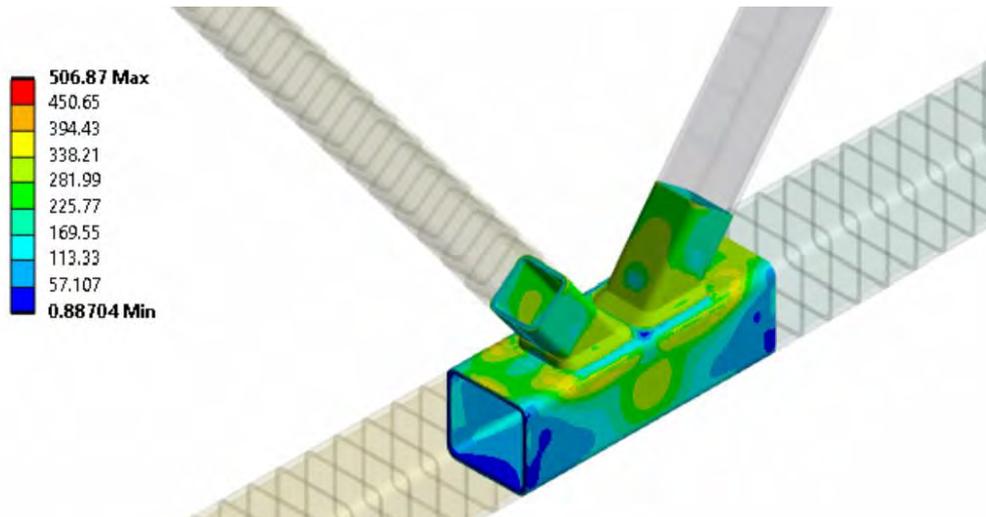


Figura 3-38. Esfuerzos Von Mises (MPa) de unión completa. Fuente propia.

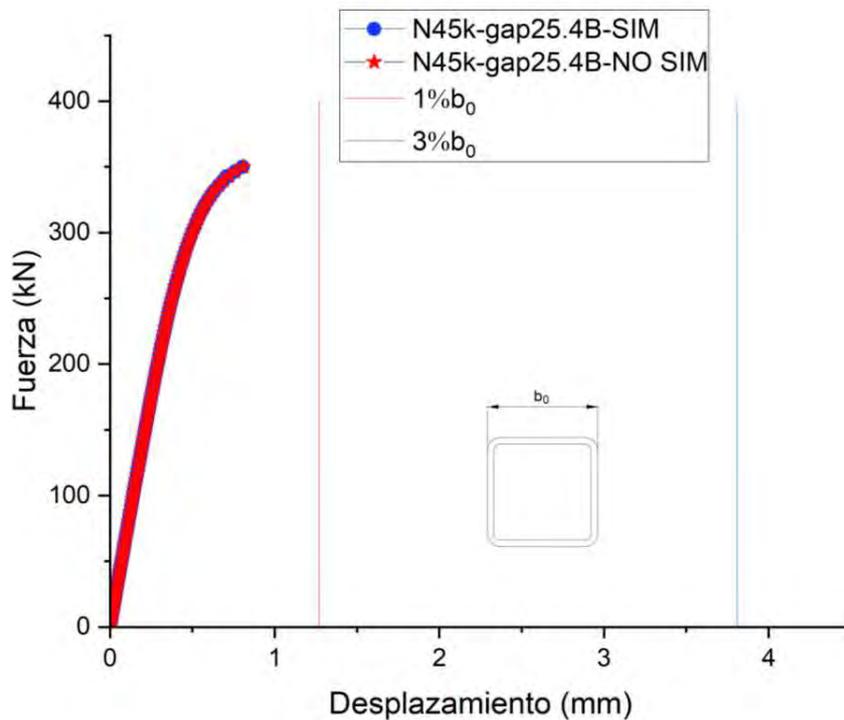


Figura 3-39. Curva fuerza – desplazamiento para unión N45kgap25,4B

Se obtiene un valor de desplazamiento de 0.8108 mm para el modelo sin simetría y 0.8068 mm para el modelo con simetría. Estos valores demuestran una similitud considerable entre ambos casos. En consecuencia, se decidió emplear el método de la simetría como una técnica para reducir el costo computacional.

### 3.6 PARAMETRIZACION DE MODELOS

Se parametriza la unión N45k-gap variando el espaciamiento entre diagonales y el material.

Tabla 3-4. Parametrización de los modelos numéricos

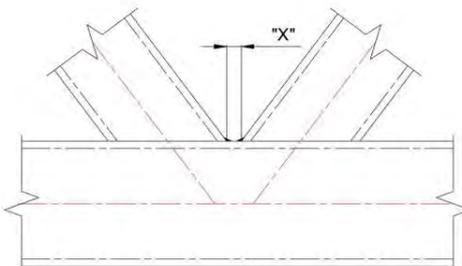
Espaciamiento		
		
Variación del espaciamiento ("x")		
x min (mm)	=	25.4
x max (mm)	=	47.6
Material (AISC 15Th)		
Designación ASTM	Fy (ksi)	Fu(ksi)
A500 Gr.B	46	58
A500 Gr. C	50	62

Tabla 3-5. Resumen de las uniones con su espaciamiento

REF	g (mm)	Material	REF	g (mm)	Material
N45kgap25,4B	25,40	A500 Gr.B	N45kgap25,4C	25,40	A500 Gr.C
N45kgap27,62B	27,62	A500 Gr.B	N45kgap27,62C	27,62	A500 Gr.C
N45kgap29,84B	29,84	A500 Gr.B	N45kgap29,84C	29,84	A500 Gr.C
N45kgap32,06B	32,06	A500 Gr.B	N45kgap32,06C	32,06	A500 Gr.C
N45kgap34,28B	34,28	A500 Gr.B	N45kgap34,28C	34,28	A500 Gr.C
N45kgap36,50B	36,50	A500 Gr.B	N45kgap36,50C	36,50	A500 Gr.C
N45kgap38,72B	38,72	A500 Gr.B	N45kgap38,72C	38,72	A500 Gr.C
N45kgap40,94B	40,94	A500 Gr.B	N45kgap40,94C	40,94	A500 Gr.C
N45kgap43,16B	43,16	A500 Gr.B	N45kgap43,16C	43,16	A500 Gr.C
N45kgap45,38B	45,38	A500 Gr.B	N45kgap45,38C	45,38	A500 Gr.C
N45kgap47,60B	47,60	A500 Gr.B	N45kgap47,60C	47,60	A500 Gr.C

Para la revisión del tamaño de elemento de cada modelo se realiza a continuación un estudio de convergencia de malla, para este análisis no se toma en cuenta el tipo de material. La convergencia de malla se analiza en el elemento sólido (Figura 3-40 a Figura 3-49).

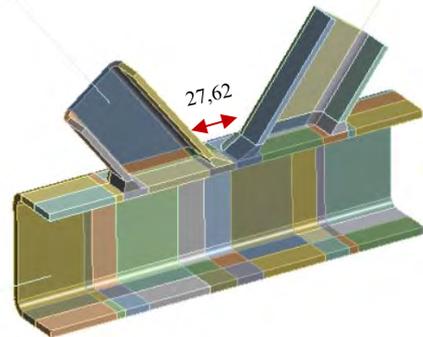
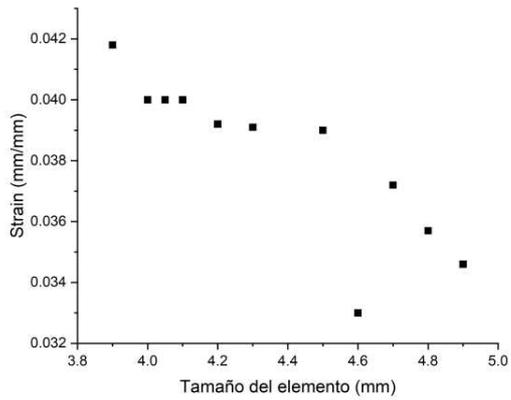


Figura 3-40. Curva fuerza – desplazamiento (gap=27,62).  
Fuente propia.

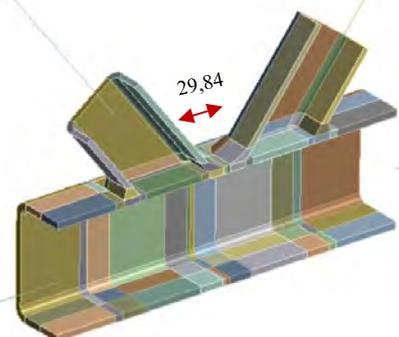
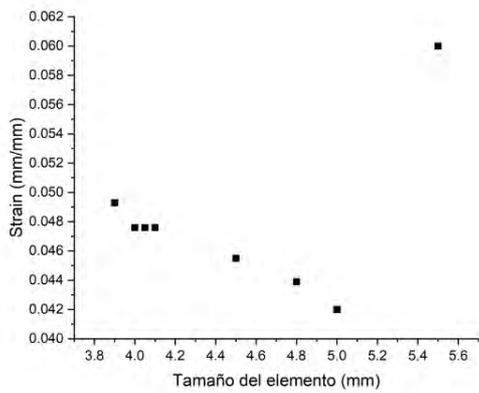


Figura 3-41. Curva fuerza – desplazamiento (gap=29,84).  
Fuente propia.

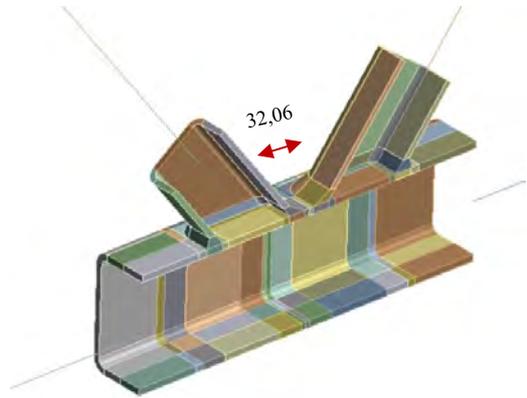
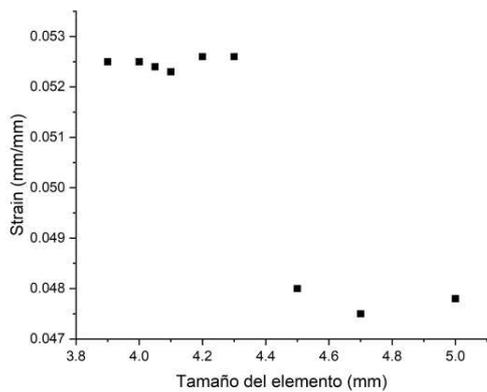


Figura 3-42. Curva fuerza – desplazamiento (gap=32,06).  
Fuente propia.

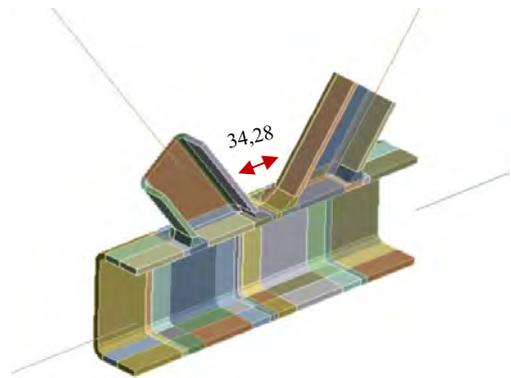
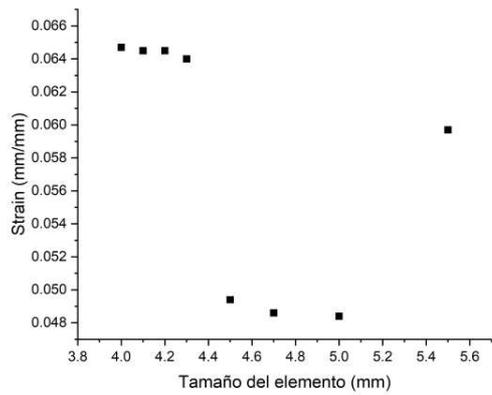


Figura 3-43. Curva fuerza – desplazamiento (gap=34,28).  
Fuente propia.

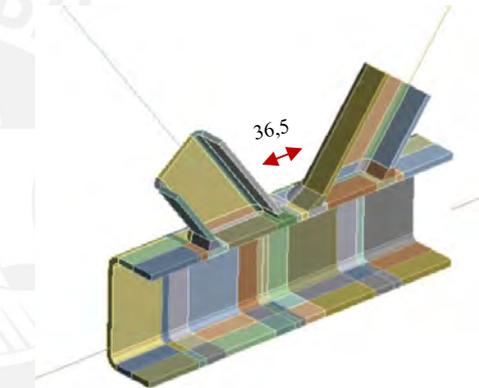
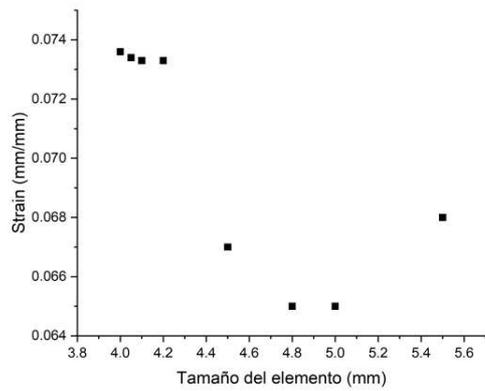


Figura 3-44. Curva fuerza – desplazamiento (gap=36,5).  
Fuente propia.

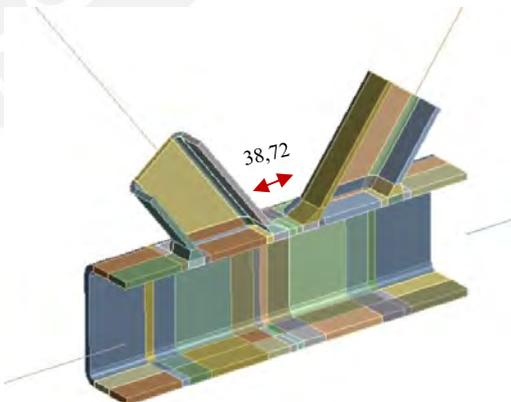
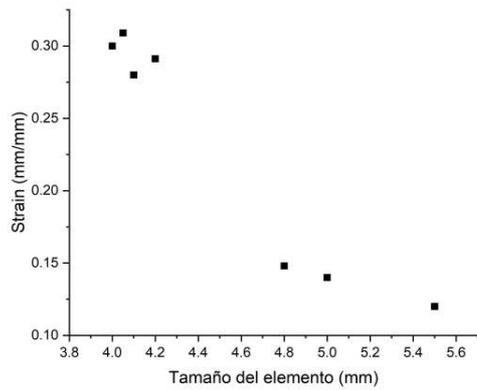


Figura 3-45. Curva fuerza – desplazamiento (gap=38,72).  
Fuente propia.

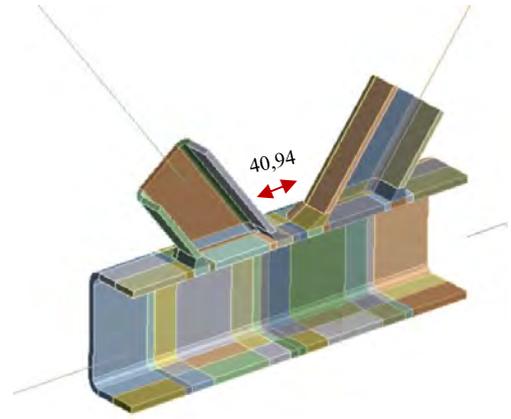
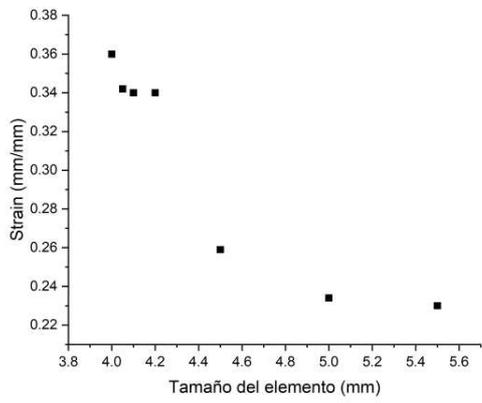


Figura 3-46. Curva fuerza – desplazamiento (gap=40,94).  
Fuente propia.

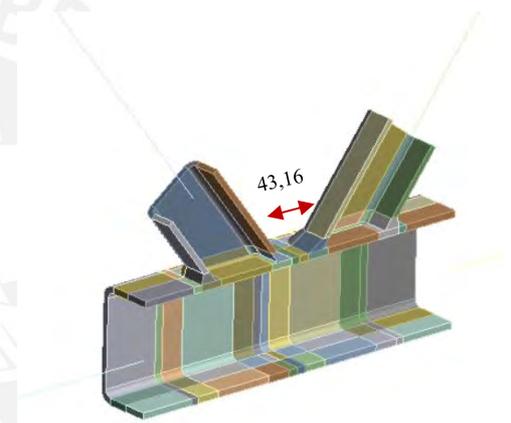
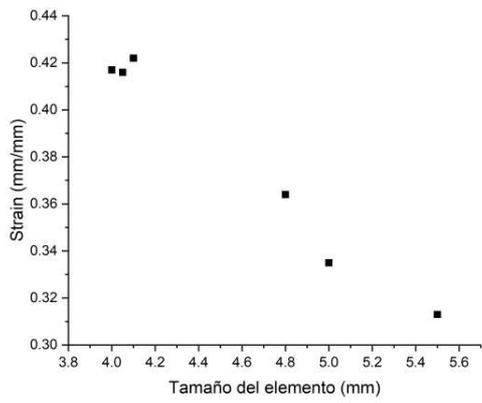


Figura 3-47. Curva fuerza – desplazamiento (gap=43,16).  
Fuente propia.

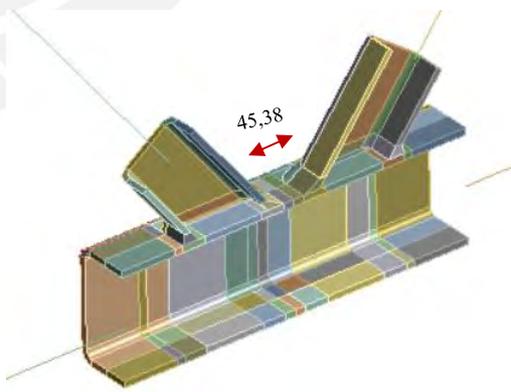
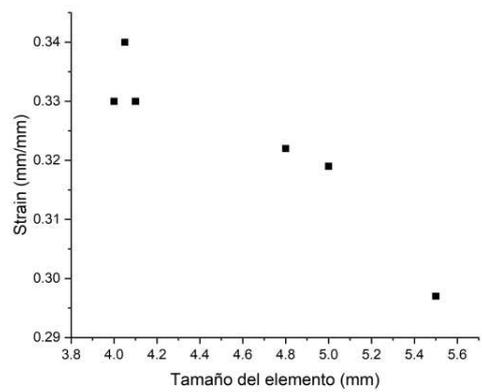


Figura 3-48. Curva fuerza – desplazamiento (gap=45,38).  
Fuente propia.

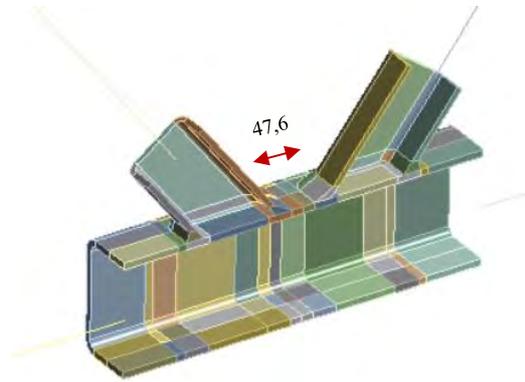
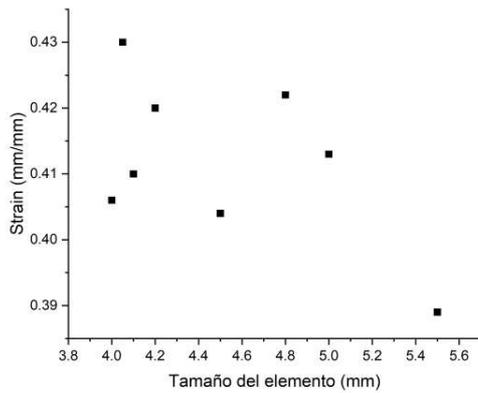


Figura 3-49. Curva fuerza – desplazamiento (gap=47,6).  
Fuente propia.

La deformación plástica solo aparece en una región bajo el arco de la soldadura (Ver Figura 3-50) esto se debe a que es la región que soporta mas tensiones y puede ser debido a la complejidad de la geometría de esta soldadura. Se observa que la deformación plástica no se extiende por ninguno de los elementos de sección tubular que componen la unión.

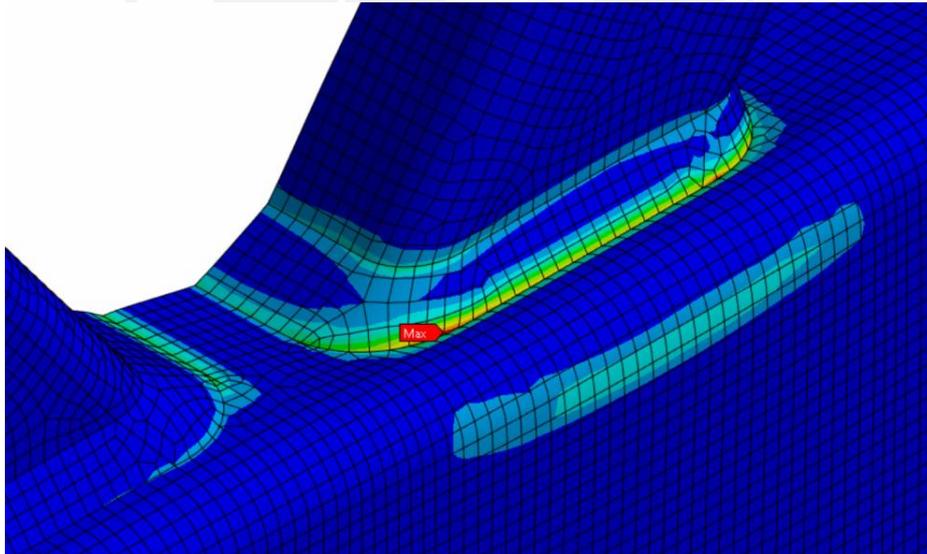


Figura 3-50. Detalle de deformación plastica  
Fuente propia.

Se verifican las siguientes curvas para el material A500 Gr. B con diferentes espaciamentos, en la Figura 3-51 se verifica una tendencia en las curvas al incrementar el espaciamento entre diagonales, da como resultado un incremento en la deformación en el cordón.

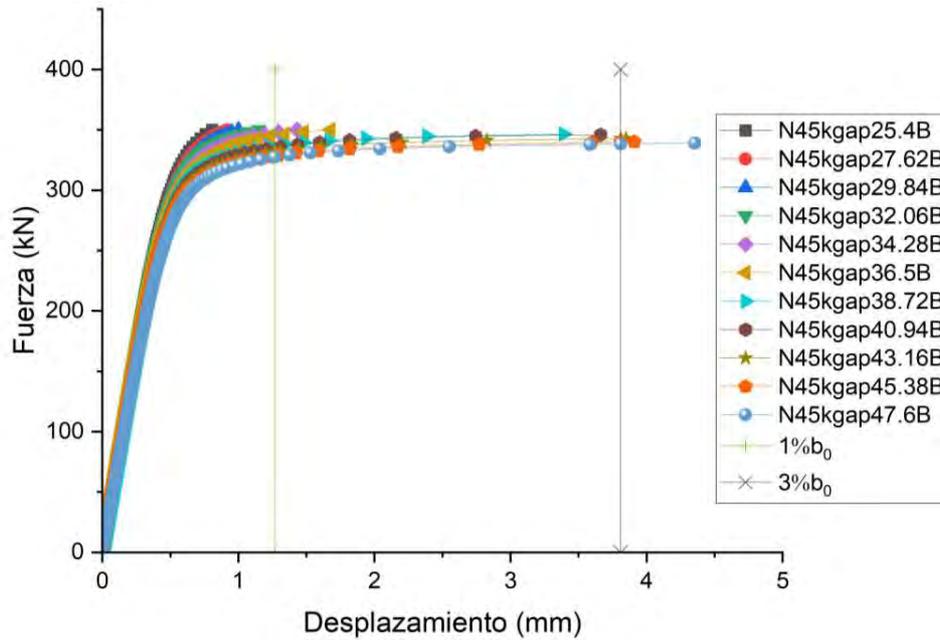


Figura 3-51. Grafica fuerza vs desplazamiento de uniones N45kgap con diferente espaciamento de material ASTM A500 Gr.B.  
Fuente propia.

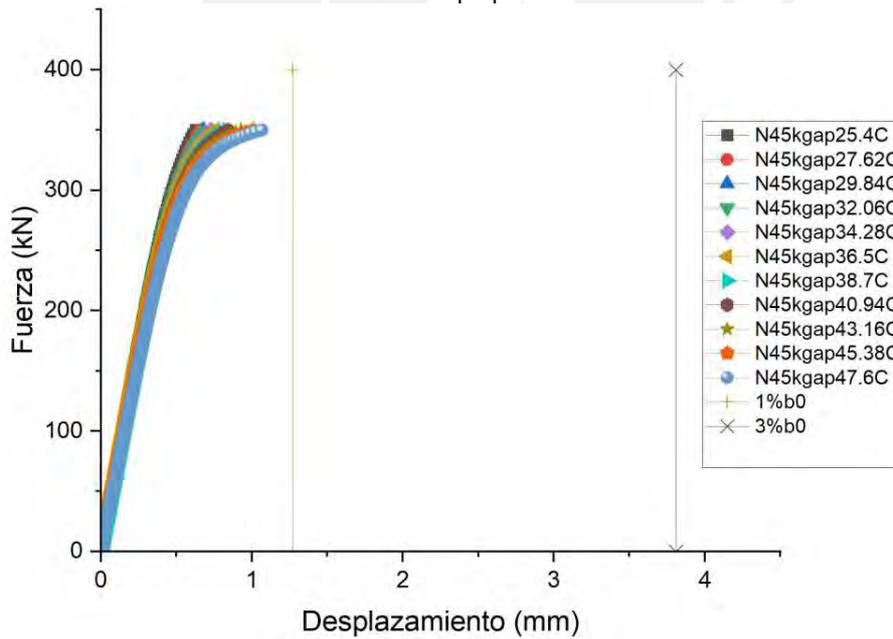


Figura 3-52. Grafica fuerza vs desplazamiento de uniones N45kgap con diferente espaciamento de material ASTM A500 Gr. C.  
Fuente propia.

## **CAPÍTULO 4**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En el presente capítulo se analiza los resultados gráficos de las uniones con su espaciamiento y la tendencia en las gráficas obtenidas con el espaciamiento entre las diagonales de la unión.

#### **4.1 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE MODELOS NUMÉRICOS**

##### **4.1.1 Unión N45k-gap25,4**

En el modelo inicial N45kgap25,4B las cargas no llevan a la unión a un estado de falla debido a que los desplazamientos máximos no superan los indicativos de control de  $1\% b_0$  y el  $3\% b_0$ .

Según la Figura 3-37 el desplazamiento máximo es de 0,81 mm para la carga de 350kN, la tensión máxima calculada genera un desplazamiento de 0,66 mm según el procedimiento del CIDECT y de 0,71 mm para la tensión obtenida del Eurocódigo, las tensiones para lograr la falla son de 1,27 mm o 3,81 mm que son mucho mayores por lo que se considera que la resistencia máxima de la unión es la obtenida por las normas, siendo estas más conservadoras. Variando el material para la unión N45kgap25,4C la gráfica Fuerza vs Desplazamiento se muestra en la Figura 4-1.

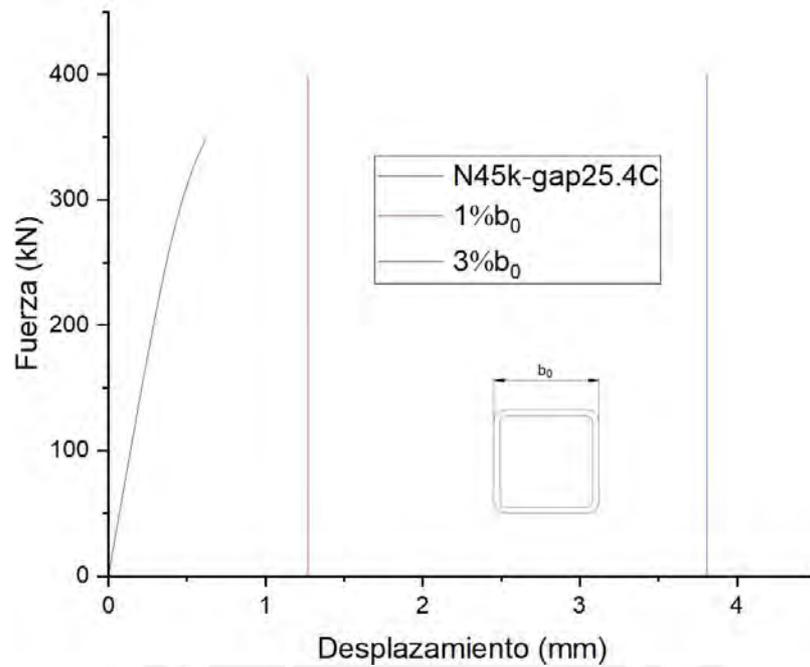


Figura 4-1. Curva Fuerza vs Desplazamiento para la unión con material ASTM A500 Gr.C.  
Fuente propia.

La grafica comparativa es la mostrada en la Figura 4-2 en la que se aprecia que el perfil con material ASTM A500 Gr. B presenta mayor deformación que el material ASTM A500 Gr. C en 0.19 mm.

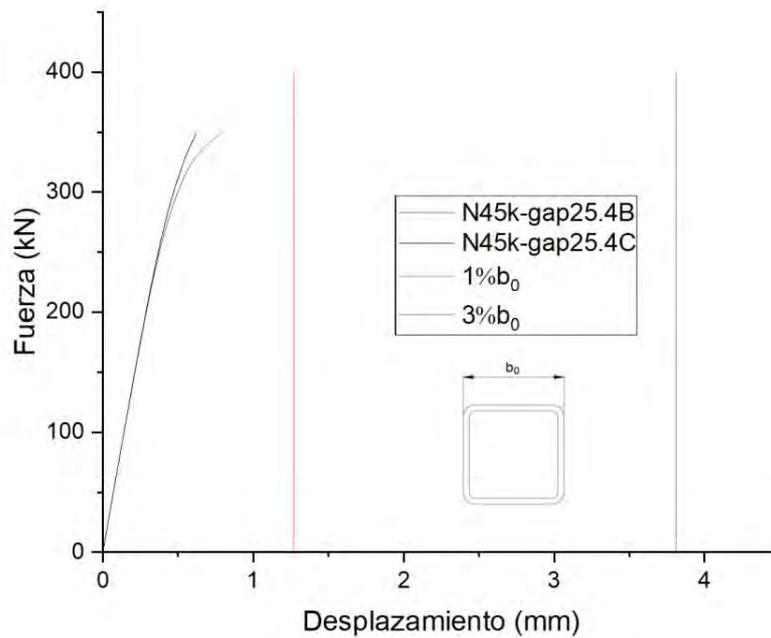


Figura 4-2. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap25,4.  
Fuente propia.

#### 4.1.2 Union N45kgap27,62

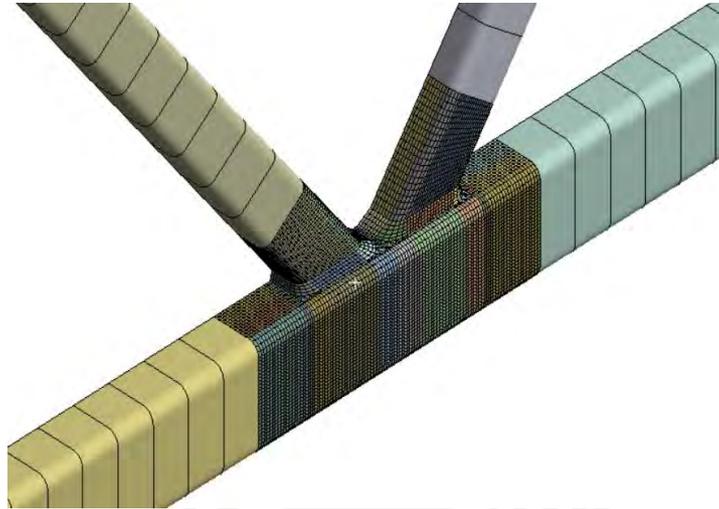


Figura 4-3. Modelo 3D unión N45kgap27,62.  
Fuente propia.

Tabla 4-1. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap27,62

Tipo de elemento	Núm. de elementos	Núm. de nodos	Núm. de partes
Solido	20668	106641	3
Lineal	54	112	4

La curva obtenida para la unión N45kgap27,62 con los materiales ASTM A500 Gr. B y Gr. C se muestra en la Figura 4-4.

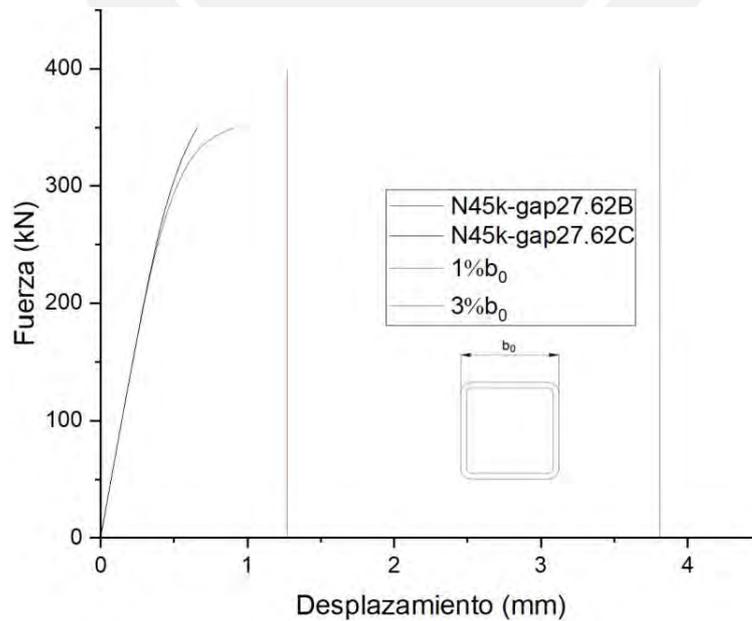


Figura 4-4. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap27,62.  
Fuente propia.

Se muestra la diferencia en la Figura 4-4 de 0,25 mm en la deformación del cordón para ambos materiales siendo el más crítico el material ASTM A500 Gr. B al presentar una deformación máxima de 0.91 mm. La deformación para el material ASTM A500 Gr. C es de 0.66 mm.

#### 4.1.3 Unión N45kgap29,84

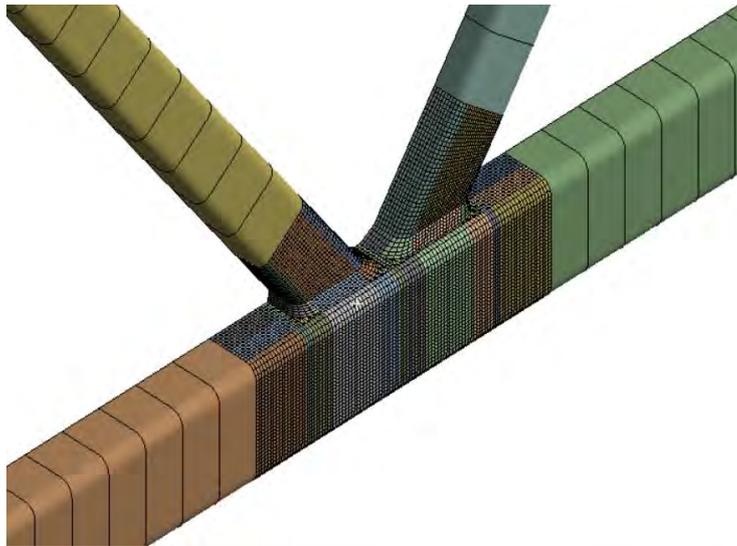


Figura 4-5. Modelo 3D unión N45kgap29,84.  
Fuente propia.

Tabla 4-2. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap29,84 (Figura 4-5).

Tipo de elemento	Núm. de elementos	Núm. de nodos	Núm. de partes
Solido	21017	108871	3
Lineal	54	112	4

La curva obtenida para la unión N45kgap29,84 con ambos materiales ASTM A500 Gr. B y Gr. C es la siguiente:

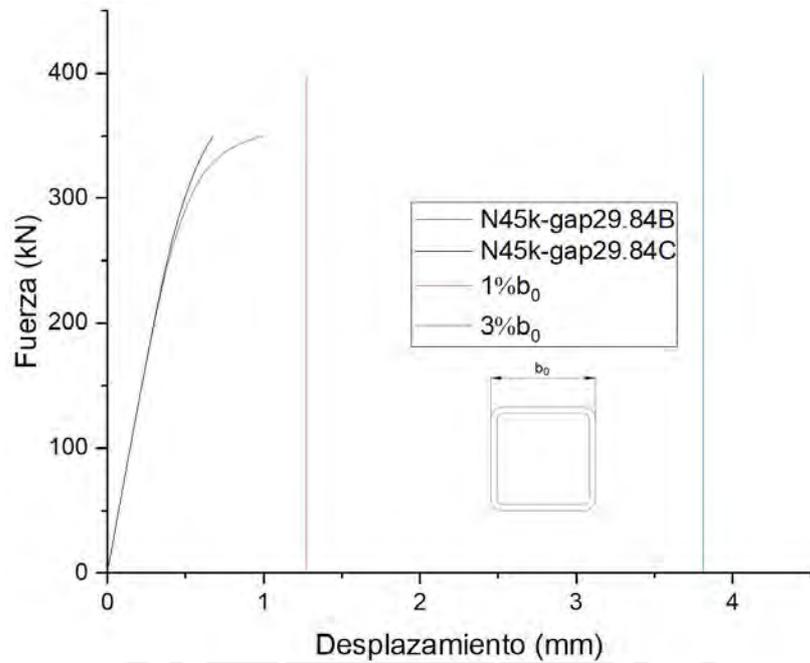


Figura 4-6. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap29,84.  
Fuente propia.

La deformación máxima para el material ASTM A500 Gr. B es de 1 mm y para el material ASTM A500 Gr. C de 0.68 mm, la variación que presenta es de 0.32 mm.

#### 4.1.4 Unión N45kgap32,06

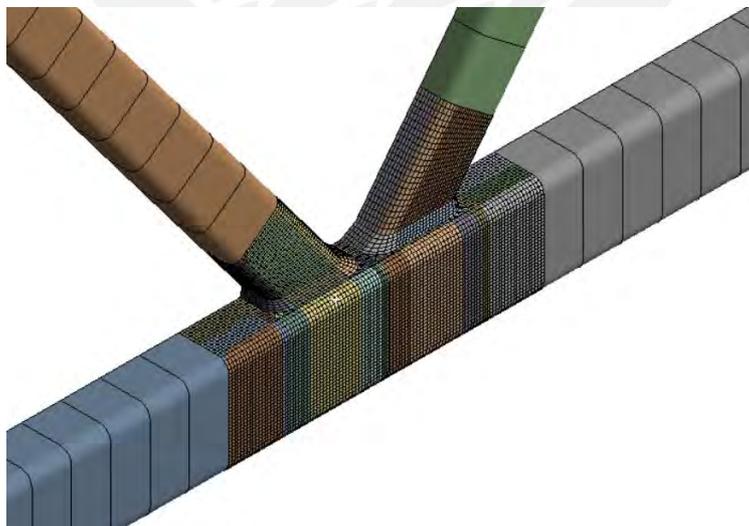


Figura 4-7. Modelo 3D unión N45kgap32,06.  
Fuente propia.

Tabla 4-3. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap32,06 (Figura 4-7).

Tipo de elemento	Núm. de elementos	Núm. de nodos	Núm. de partes
Solido	21499	111422	3
Lineal	54	112	4

La curva obtenida para la unión N45kgap32,06 con ambos materiales ASTM A500 Gr. B y Gr. C se muestra en la Figura 4-8.

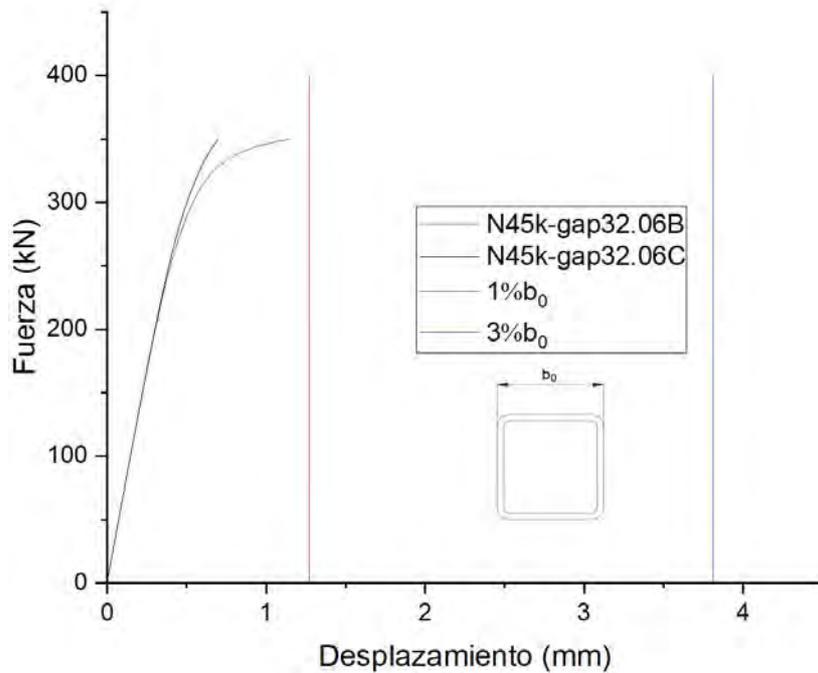


Figura 4-8. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap32,06.  
Fuente propia.

Para el espaciamiento de 32,06 mm en ambos materiales no se produce la falla sin embargo el material A500 Gr. B está próximo al límite debido a la deformación máxima de 1,15 mm, para el material A500 Gr. C la deformación máxima presentada es de 0.7 mm, la diferencia entre ambas gráficas es de 0.45 mm.

#### 4.1.5 Unión N45kgap34,28

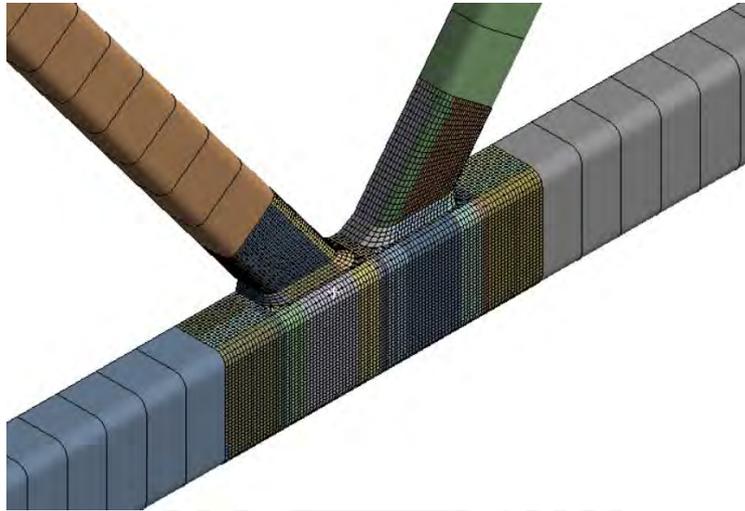


Figura 4-9. Modelo 3D unión N45kgap34,28.  
Fuente propia.

Tabla 4-4. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap34,28 (Figura 4-9).

Tipo de elemento	Núm. de elementos	Núm. de nodos	Núm. de partes
Sólido	27266	133177	3
Lineal	54	112	4

La curva obtenida para la unión N45kgap34,28 con ambos materiales ASTM A500 Gr. B y Gr. C se muestra en la Figura 4-10.

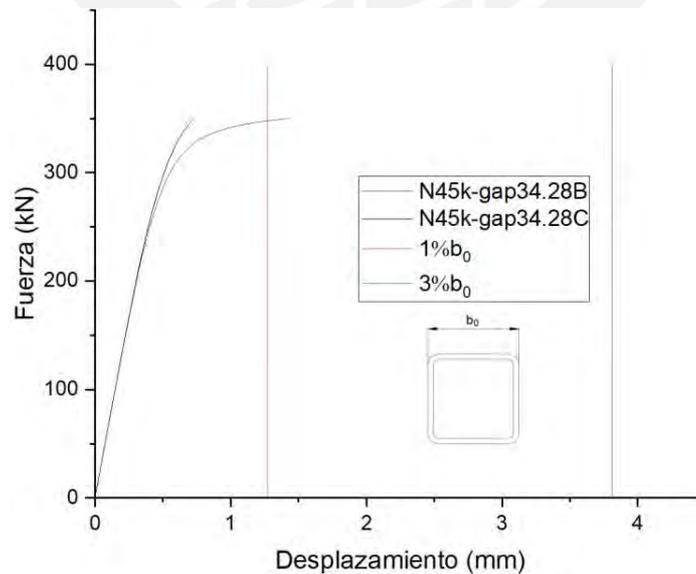


Figura 4-10. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap34,28.  
Fuente propia.

El espaciamiento de 34,28 mm en el material A500 Gr. B falla en carga de servicio superando la deformación del 1%  $b_0$ , la deformación obtenida es de 1,43 mm.

A diferencia del material A500 Gr. C la deformación es 0.73 mm teniendo este material mayor factor de seguridad.

La diferencia de las deformaciones es de 0.7 mm.

La carga última de servicio es  $N_s = 347.82$  kN.

#### 4.1.6 Unión N45kgap36,5

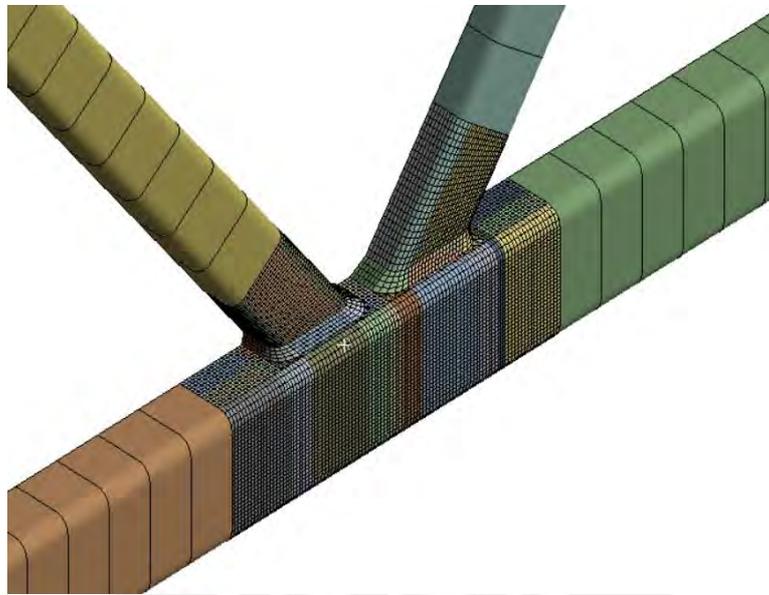


Figura 4-11. Modelo 3D unión N45kgap36,5.  
Fuente propia.

Tabla 4-5. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap36,5 (Figura 4-11).

Tipo de elemento	Núm. de elementos	Núm. de nodos	Núm. de partes
Solido	27258	133169	3
Lineal	54	112	4

La curva obtenida para la unión N45kgap36,5 con ambos materiales ASTM A500 Gr. B y Gr. C se muestra en la Figura 4-12.

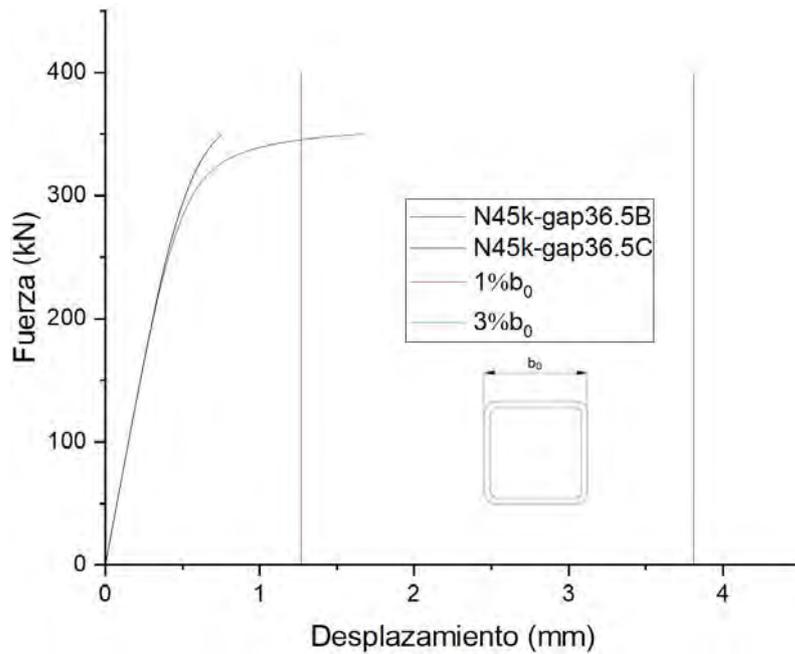


Figura 4-12. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap36,5.  
Fuente propia.

En la Figura 4-12 se aprecia la deformación máxima de ambos cordones siendo para el material A500 Gr. B la deformación de 1.68 mm y para el material A500 Gr. C una deformación de 0.75 mm, la diferencia es de 0.92 mm en la deformación de los materiales. La carga última de servicio es  $N_s = 345.36$  kN estado de carga en el que se produce la falla.

#### 4.1.7 Unión N45kgap38,72

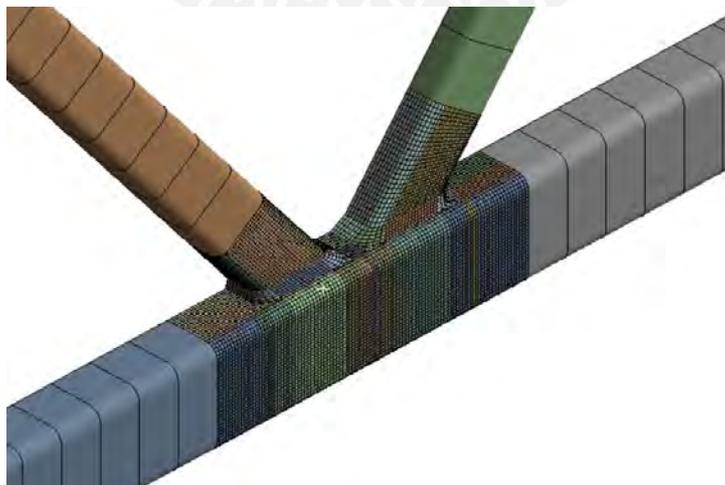


Figura 4-13. Modelo 3D unión N45kgap38,72.  
Fuente propia.

Tabla 4-6. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap38,72 (Figura 4-13).

Tipo de elemento	Núm. de elementos	Núm. de nodos	Núm. de partes
Sólido	26796	132371	3
Lineal	54	112	4

La curva obtenida para la unión N45k-gap38,72 con ambos materiales ASTM A500 Gr. B y Gr. C se muestra en la Figura 4-14.

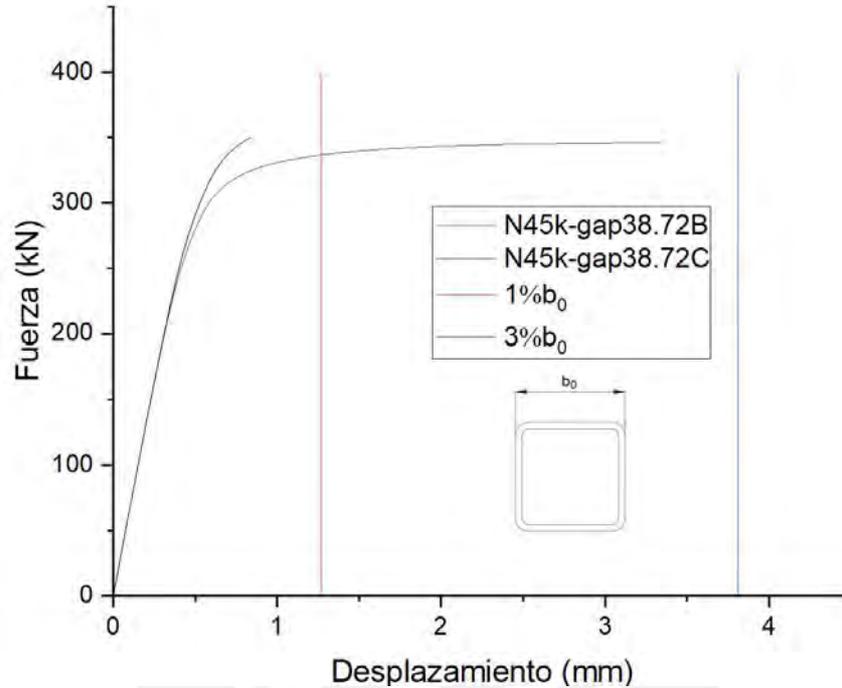


Figura 4-14. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45k-gap38,72.  
Fuente propia.

En la Figura 4-14 se aprecia la deformación máxima de ambos cordones siendo para el material A500 Gr. B la deformación de 3.36 mm y para el material A500 Gr. C una deformación de 0.84 mm, la diferencia es de 2.52 mm en la deformación.

La carga última de servicio es  $N_s = 338.63$  kN estado de carga en el que se produce la falla.

#### 4.1.8 Unión N45kgap40,94

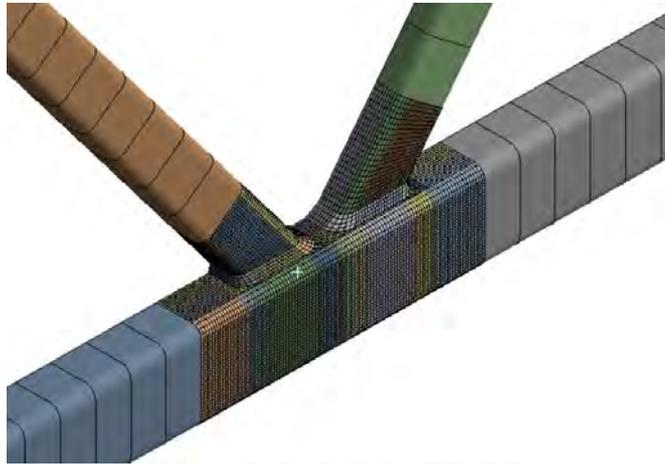


Figura 4-15. Modelo 3D unión N45kgap40,94.  
Fuente propia.

Tabla 4-7. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap40,94 (Figura 4-15).

Tipo de elemento	Núm. de elementos	Núm. de nodos	Núm. de partes
Solido	20334	105363	3
Lineal	54	112	4

La curva obtenida para la unión N45kgap40,94 con ambos materiales ASTM A500 Gr. B y Gr. C se muestra en la Figura 4-16.

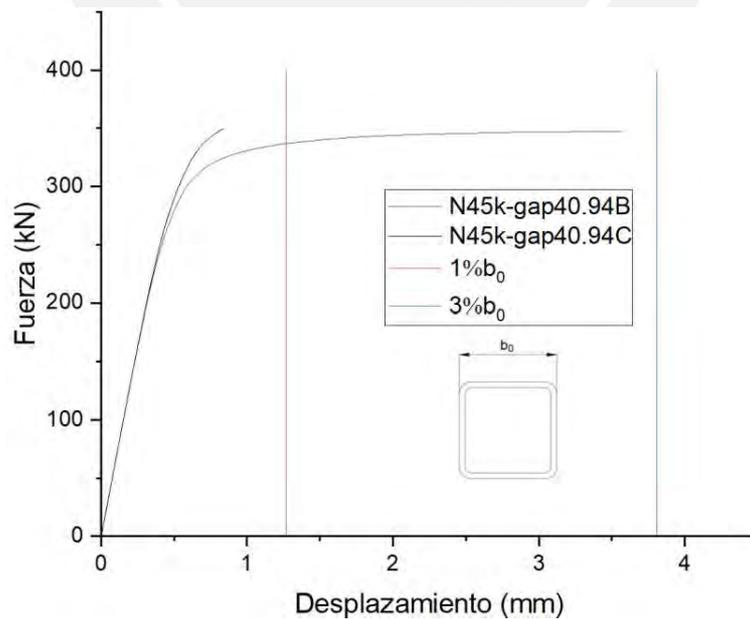


Figura 4-16. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap40,94.  
Fuente propia.

La unión N45kgap40,94 para el comparativo con el material se tiene que la deformación máxima para el material ASTM A500 Gr. B es de 3.58 mm y para el material ASTM A500 Gr. C es de 0.84 mm, la diferencia de deformaciones es de 2.74 mm.

La carga última de servicio es  $N_s = 336.87$  kN estado de carga en el que se produce la falla.

#### 4.1.9 Unión N45kgap43,16

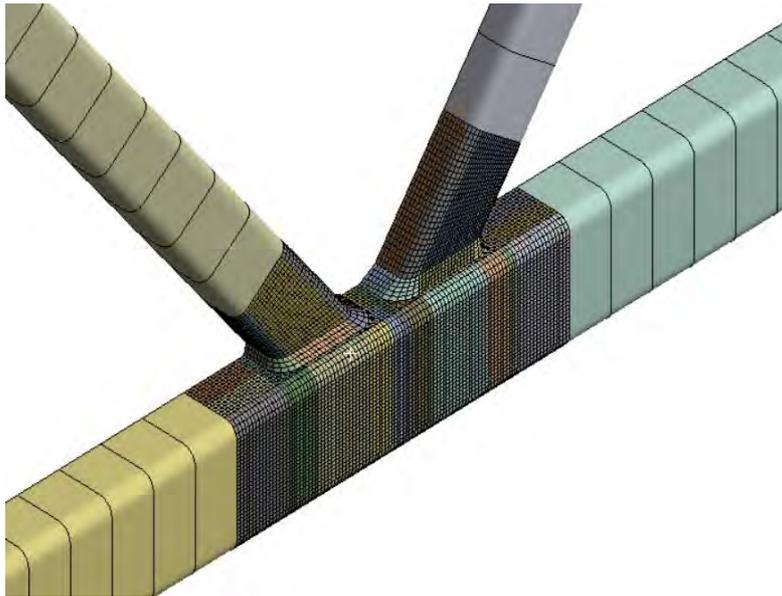


Figura 4-17. Modelo 3D unión N45kgap43,16.  
Fuente propia.

Tabla 4-8. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap43,16 (Figura 4-17).

Tipo de elemento	Núm. de elementos	Núm. de nodos	Núm. de partes
Solido	20389	105426	3
Lineal	54	112	4

La curva obtenida para la unión N45kgap43,16 con ambos materiales ASTM A500 Gr. B y Gr. C se muestra en la Figura 4-18.

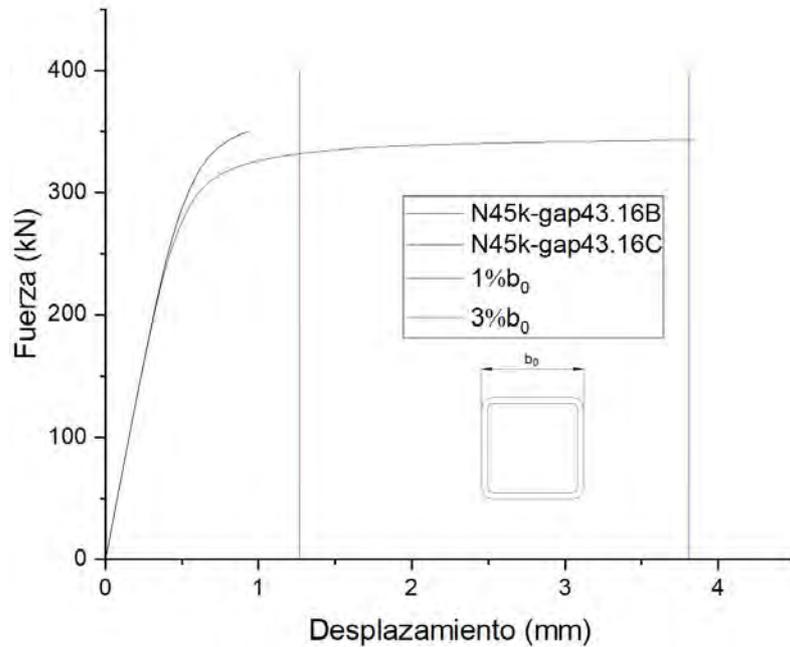


Figura 4-18. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap43,16.  
Fuente propia.

La unión N45kgap43,16 para el material ASTM A500 Gr. B presenta deformación máxima del cordón de 3.85 mm, la deformación del cordón para el material ASTM A500 Gr. C es de 0.93 mm, la diferencia es de 2.92 mm.

La carga última de servicio es  $N_s = 331.85$  kN estado de carga en el que se produce la falla y la carga última es  $N_u = 342.97$  kN comparando los resultados  $1.5N_s > N_u$  siendo la tensión que domina el diseño la carga última  $N_u = 342.97$  kN.

#### 4.1.10 Unión N45kgap45,38

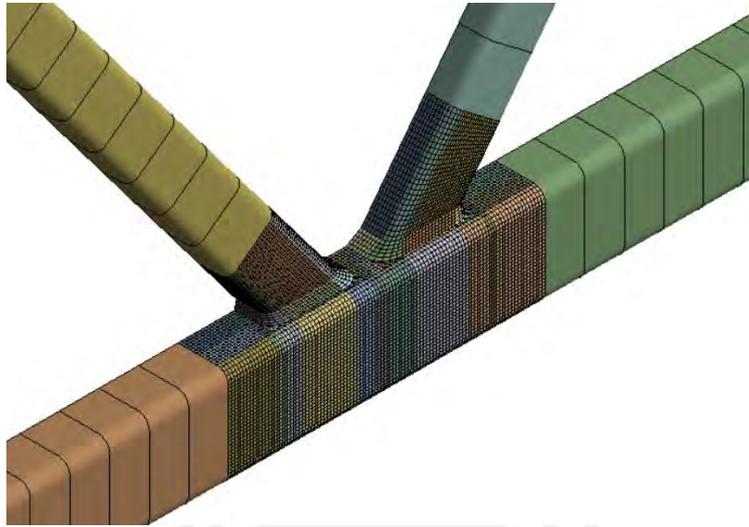


Figura 4-19. Modelo 3D unión N45kgap45,38.  
Fuente propia.

Tabla 4-9. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap45,38 (Figura 4-19).

Tipo de elemento	Núm. de elementos	Núm. de nodos	Núm. de partes
Sólido	22092	113716	3
Lineal	54	112	4

La curva obtenida para la unión N45kgap45,38 con ambos materiales ASTM A500 Gr. B y Gr. C se muestra en la Figura 4-20.

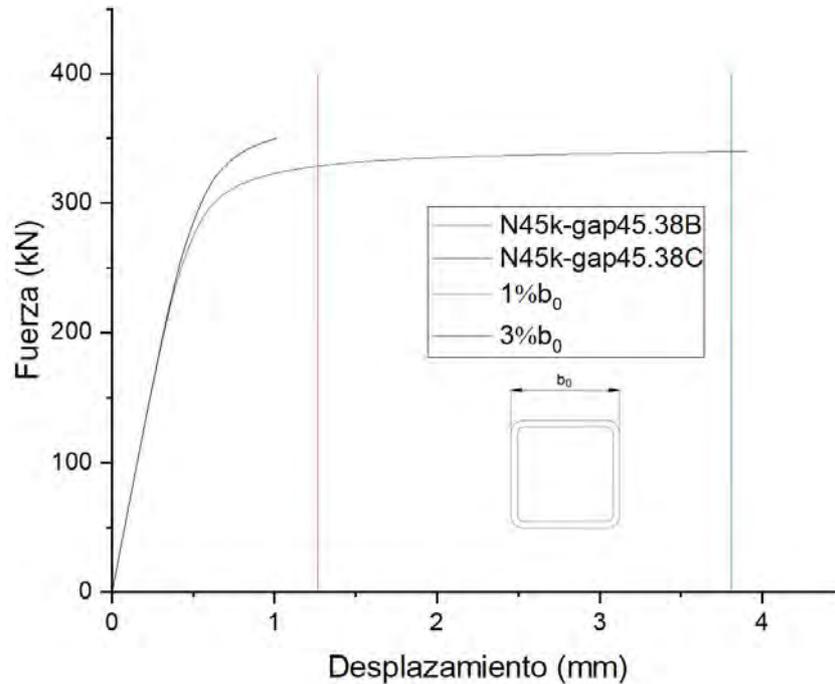


Figura 4-20. Curva comparativa Fuerza vs Desplazamiento unión N45kgap45,38.

Fuente propia.

El cordón en la unión N45kgap45,38 para el material ASTM A500 Gr. B presenta deformación máxima del cordón de 3.91 mm la deformación del cordón para el material ASTM A500 Gr. C es de 0.93 mm.

La carga última de servicio es  $N_s = 328.61$  kN estado de carga en el que se produce la falla y la carga última es  $N_u = 340.14$  kN comparando los resultados  $1.5N_s > N_u$  siendo la tensión que domina el diseño la carga última  $N_u = 340.14$  kN.

#### 4.1.11 Unión N45kgap47,6

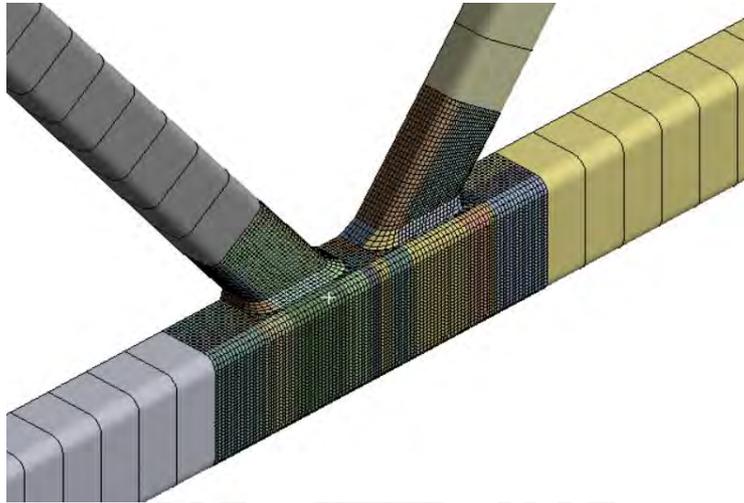


Figura 4-21. Modelo 3D unión N45kgap47,6.  
Fuente propia.

Tabla 4-10. Resumen de propiedades de mallado N45k-gap47,6 (Figura 4-21).

Tipo de elemento	Núm. de elementos	Núm. de nodos	Núm. de partes
Solido	27270	133170	3
Lineal	56	116	4

La curva obtenida para la unión N45kgap47,6 con ambos materiales ASTM A500 Gr. B y Gr. C se muestra en la Figura 4-22.

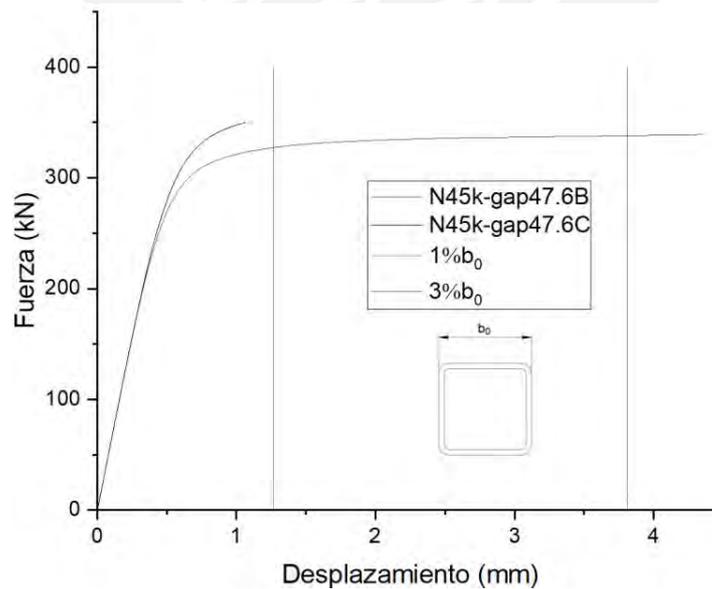
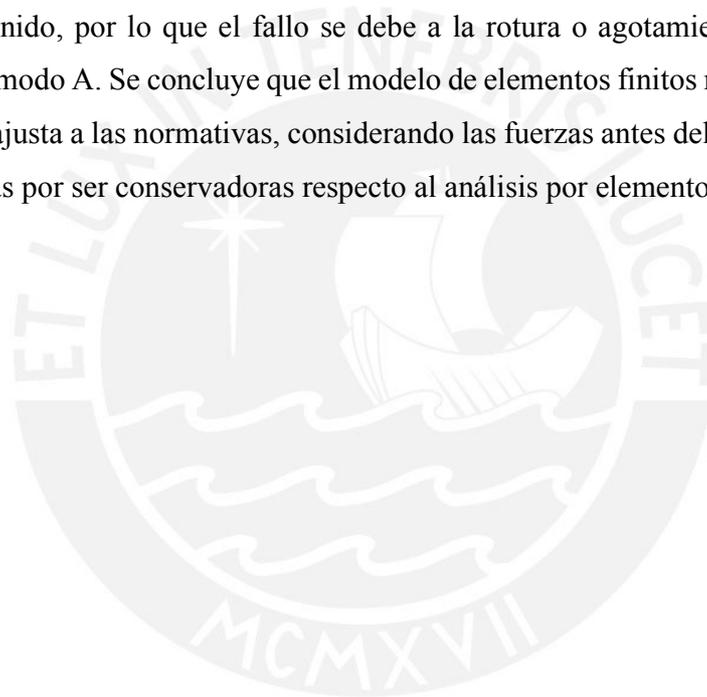


Figura 4-22. Curva fuerza-desplazamiento de N45kgap47,6.  
Fuente propia.

El cordón en la unión N45kgap47,6 para el material ASTM A500 Gr. B falla por resistencia última debido a la deformación máxima del cordón de 4.36 mm superando el indicador del 3% $b_0$ . La deformación del cordón para el material ASTM A500 Gr. C es de 1.06 mm, la diferencia es de 3.29 mm.

La carga de servicio es  $N_s = 327.41$  kN y la carga última es  $N_u = 339.1$  kN comparando los resultados  $1.5N_s > N_u$  siendo la tensión que domina el diseño la carga última  $N_u = 339.1$  kN.

Al analizar el ratio entre la fuerza antes de fallo del modelo de elementos finitos y la resistencia de cálculo que proporciona la norma se obtiene el valor de 1% por la proximidad al resultado obtenido, por lo que el fallo se debe a la rotura o agotamiento de la cara del cordón que es el modo A. Se concluye que el modelo de elementos finitos realizado en Ansys para la unión se ajusta a las normativas, considerando las fuerzas antes del fallo indicadas en ambas normativas por ser conservadoras respecto al análisis por elementos finitos.



#### 4.1.12 Resumen de resultados

Se resume la resistencia de las uniones en la siguiente tabla:

Tabla 4-11. Resultados según procedimientos normativos

REFERENCIA	$F_t$ (kN)	$\Delta F_t$ (mm)	$N_s$ (kN)	$\Delta N_s$ (mm)	$N_u$ (kN)	$\Delta N_u$ (mm)	$N_{st}$ (kN)	$\Delta N_{st}$ (mm)
N45kgap25,4B	350	0.81	-	-	-	-	-	-
N45kgap25,4C	350	0.63	-	-	-	-	-	-
N45kgap27,62B	350	0.91	-	-	-	-	-	-
N45kgap27,62C	350	0.66	-	-	-	-	-	-
N45kgap29,84B	350	1.00	-	-	-	-	-	-
N45kgap29,84C	350	0.68	-	-	-	-	-	-
N45kgap32,06B	350	1.15	-	-	-	-	-	-
N45kgap32,06C	350	0.7	-	-	-	-	-	-
N45kgap34,28B	350	1.43	347.82	1.27	-	-	-	-
N45kgap34,28C	350	0.73	-	-	-	-	-	-
N45kgap36,50B	350	1.68	345.36	1.27	-	-	-	-
N45kgap36,50C	350	0.75	-	-	-	-	-	-
N45kgap38,72B	350	3.36	338.63	1.27	-	-	-	-
N45kgap38,72C	350	0.84	-	-	-	-	-	-
N45kgap40,94B	350	3.58	336.87	1.27	-	-	-	-
N45kgap40,94C	350	0.84	-	-	-	-	-	-
N45kgap43,16B	350	-	331.85	1.27	342.91	3.82	342.97	3.85
N45kgap43,16C	350	0.93	-	-	-	-	-	-
N45kgap45,38B	350	-	328.61	1.27	339.94	3.81	340.14	3.91
N45kgap45,38C	350	1.01	-	-	-	-	-	-
N45kgap47,60B	350	-	327.41	1.27	338.15	3.81	339.1	4.36
N45kgap47,60C	350	1.06	-	-	-	-	-	-

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El estudio de armaduras compuestas por perfiles tubulares y sus uniones son de fundamental importancia para el desarrollo tecnológico de este producto muy poco explorado en el mercado nacional, es importante señalar que la norma *E.090 Estructuras metálicas* tiene requisitos específicos para el diseño de este tipo de estructura metálica.

Este estudio es parte integral del desarrollo de un sistema de armadura de suelo formado por diagonales y cordón superior e inferior de perfiles tubulares cuadrados (SHS) con uniones soldadas entre las diagonales y los cordones, el análisis de cargas es un análisis estático con cargas de gravedad, carga muerta producto del peso de los elementos y equipos sobre la armadura y carga viva por las personas que se proyecta transitaran por el proyecto.

Es importante comprender y desarrollar a detalle los modelos numéricos que representen a las estructuras reales permitiendo un análisis paramétrico a fin de optimizar el proceso. El desarrollo de nuevas tecnologías y mejoras en sistemas de computación evitan realizar ensayos experimentales costosos.

El presente trabajo de tesis tuvo como objetivo principal desarrollar un modelo numérico representativo de las uniones tubulares tipo K de sección cuadrada, así como una evaluación de la metodología de ensayo experimental de otros autores indicados en el estado del arte contribuyendo con el desarrollo de la línea de investigación en este tipo de uniones metálicas. El proceso de diseño inicia con los lineamientos de la normativa nacional *E.090 Estructuras metálicas* calculando las acciones externas que se aplicaran sobre la armadura y

posteriormente obtener las reacciones internas obteniendo una tensión axial máxima para el cordón inferior de 710.86 kN y las diagonales Fuerzas axiales máximas de +/- 213.26 kN ubicando el nodo más crítico.

La normativa *EN 1993-1-8:2005 del Eurocódigo* y la *guía de diseño N°3 del CIDECT* indicaron el procedimiento de cálculo de la unión en K obteniendo un valor de resistencia de la unión de 342.5 kN y 335.5 kN respectivamente; el valor más conservador es representado por el Eurocódigo siendo este procedimiento de cálculo más simplificado que el de la guía CIDECT.

Para la correcta calibración de los modelos representados en el trabajo de tesis se recurrió a la bibliografía sobre uniones en K de diferentes autores siendo el perfil más común para los trabajos de investigación el de sección circular que tiene mayor demanda en el mercado por sus propiedades físicas.

Para el cálculo numérico por elementos finitos de las uniones en K se utilizó el software Ansys 2019 R3, se desarrolló una metodología de cálculo utilizando dos tipos de elementos para el modelo, elemento tipo viga y elemento tipo sólido, además de la función simetría para reducir el costo computacional.

Se presentó varios modelamientos de la unión en K que consiste de diagonales tubulares cuadradas soldados a cordones (horizontales) cuadrados. Se variaron dos parámetros: El espaciamiento de las diagonales sobre el cordón y el material de los perfiles. Se incluye los esfuerzos últimos y de servicio con los gráficos de deflexión por cada modelo obtenido del software Ansys.

La comparación de resultados numéricos y experimentales en relación con la distribución de esfuerzos muestran una tendencia similar lo que indica que los modelos numéricos utilizados son adecuados. Para el desarrollo de los modelos numéricos se tuvieron en cuenta la geometría de la unión, la sección de los perfiles, el espaciamiento de las diagonales, la resistencia del cordón y la geometría del cordón de soldadura.

En el análisis de las uniones denominadas N45kgap25,4 a N45kgap47,6 se presenta una excentricidad de 16,9 mm a 31,7 mm, respectivamente, según el procedimiento analítico esta excentricidad no denota variación importante en la unión, por lo que es importante considerar las condiciones de borde en la parte superior de las diagonales con la restricción del desplazamiento a solo axial a fin de obtener la distribución de esfuerzos en el cordón; con la restricción de los seis grados de libertad en los extremos del cordón (empotramiento) es

posible observar la distribución de las tensiones entre los miembros de la unión generado en el prototipo y modelos numéricos tomados como referencia para el desarrollo de este trabajo. El espaciamiento “*gap*” máximo considerado de 47,6 mm es inferior al gap de 50 mm indicado como máximo en el estado del arte.

El modelado del cordón de soldadura juega un papel fundamental en la distribución de tensiones en la cara superior del cordón, es importante verificar las dimensiones cuando se trata con perfiles cuadrados comparando con las indicaciones de la norma para el cálculo del cateto de soldadura y la longitud efectiva.

Las fórmulas indicadas en la norma limitan el espaciamiento de la unión estudiada, para este caso el espaciamiento varía desde 25.4 mm hasta 47.6 mm; para las tensiones calculadas en la armadura los espaciamientos cumplen con los indicadores por límite de servicio y último siendo las deformaciones máximas obtenidas inferiores para el material ASTM A500 Gr. B. Para la carga máxima de 350 kN en las diagonales a tracción y compresión el espaciamiento con mayor factor de seguridad es la unión N45kgap25.4 con un gap de 25.4 mm que presenta una deformación de 0.81 mm muy inferior al indicador para el límite de servicio de 1.27 mm ( $1\% b_0$ ).

Para la unión N45kgap32,06 con un espaciamiento de 32.06 mm la deformación máxima obtenida es de 1.15 mm inferior al límite de servicio, este espaciamiento es seguro porque no presenta fallas por estados últimos de servicio o estado último.

Para la unión N45kgap34,28 con un espaciamiento de 34.28 mm la deformación máxima obtenida es de 1.27 mm en la que se presenta la resistencia máxima en el estado límite de servicio con un valor de resistencia de 347.28 kN.

En la unión N45kgap40.94 con un espaciamiento de 40.94 mm supera el límite de servicio, pero no el límite último a partir de esta distancia la unión para una carga de 350 kN falla.

En la unión N45kgap43,16 con un espaciamiento de 43.16 mm supera el límite de servicio y el límite último, siendo la resistencia última la que predomina en el diseño con un valor de 342.97kN.

Las configuraciones siguientes superan los límites indicados en el proyecto por ello no se debe considerar esos espaciamientos de 45,38 mm y 47,60 mm.

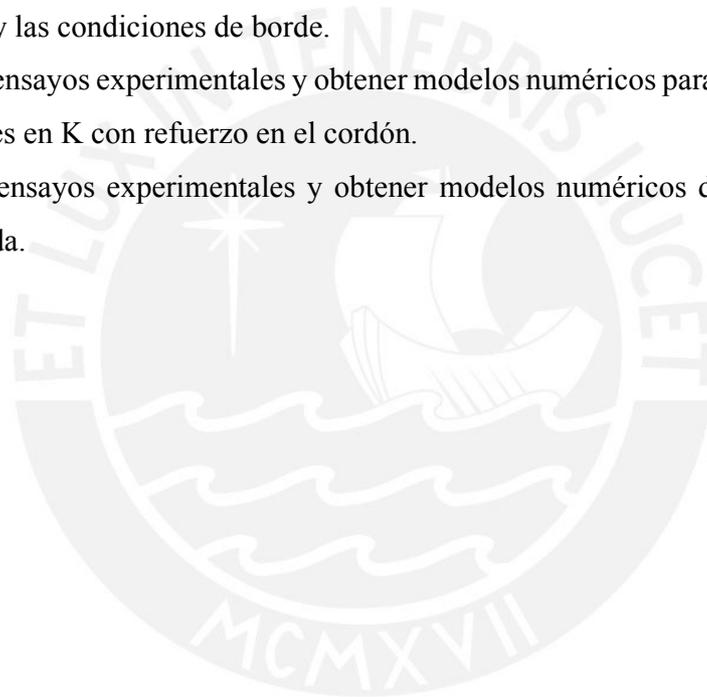
El material ASTM A500 Gr. C no presenta fallos en ninguna configuración de unión con la carga máxima de 350 kN presentando como deformación máxima 1.06 mm para la

configuración más crítica no superando el límite de servicio ni el límite último indicado en el presente trabajo.

Se verificó que el espaciamiento máximo seguro es el 40% del límite superior para el material ASTM A500 Gr. B, además que el espaciamiento mínimo de 25.4 mm el que presenta mayor resistencia.

#### Trabajos futuros

- Realizar ensayos experimentales de las uniones propuestas en el presente trabajo de investigación comparando los resultados.
- Realizar un estudio paramétrico variando la sección de los elementos de la unión, el material y las condiciones de borde.
- Realizar ensayos experimentales y obtener modelos numéricos para obtener repuestas de uniones en K con refuerzo en el cordón.
- Realizar ensayos experimentales y obtener modelos numéricos de la unión tipo K empernada.



## BIBLIOGRAFÍA

- AISC 360, 2016. Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois.
- CIDECT, 2009. DESIGN GUIDE 3 for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading.
- Davies, G. (1998). Static Behaviour of Welded Rectangular Hollow Section Connections. In: Jármai, K., Farkas, J. (eds) Mechanics and Design of Tubular Structures. International Centre for Mechanical Sciences, vol 394. Springer, Vienna.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2514-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2514-4_1).
- Davies, G., & Roper, C. (1975). Gap Joints with Tubular Members-A Yield Line Approach. Building Science, 10(3), 199-205. [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(75\)90019-5](https://doi.org/10.1016/0007-3628(75)90019-5).
- Norma E.090, 2020. Estructuras Metalicas, Reglamento Naciona de Edificaciones. Lima, Peru.
- EN 1993-1-8, (2005). Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-8: Uniones. Comision Europea de normalización CEN, Bruselas.
- Gardiner, J. (2017, 25 julio). Using Symmetry To Reduce FEA Runtime. XCEED Engineering. <https://www.xceed-eng.com/reducing-fea-runtime-with-symmetry/ICT>.
- Guía de Diseño para estructuras en celosía resueltas con perfiles tubulares de acero, 2007. Instituto para la Construcción Tubular, España.
- Jiki, P. N. (2013). Location Results for Brace Spacing in Gap Tubular “K” Joints Using FEM. Modern Mechanical Engineering. <https://doi.org/10.4236/mme.2013.31007>
- Kosteski, N., Packer, J. A., & Puthli, R. (2003). A finite element method based yield load determination procedure for hollow structural section connections. Journal of

Constructional Steel Research, 59(4), 453-471. [https://doi.org/10.1016/s0143-974x\(02\)00066-4](https://doi.org/10.1016/s0143-974x(02)00066-4)

Lee, M., & Wilmshurst, S. (1995). Numerical modelling of CHS Joints with mutiplanar double-K configuration. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 32, Issue 3, 1995. Pages 281-301.

Lie, S., & Yang, Z. (2009). Fracture assessment of damaged square hollow section (SHS) K-joint using BS7910:2005. *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 76, Issue 9, 2009. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(95\)93899-F](https://doi.org/10.1016/0143-974X(95)93899-F).

Lu, L.H., de Winkel, G., Yu, Y., & Wardenier, J. (2021). Deformation limit for the ultimate strength of hollow section joints. *Tubular Structures VI*.

Manual 14<sup>th</sup> ed., 2013. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois.

Mayor, I. M. S. (2010). Análise teórico-experimental de ligações tipo “K” e “KT” compostas por perfis tubulares de seção retangular e circular. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Mayor, I.S., Nunes, G.V., Freitas, A.M., Requena, J.A., & Araújo, A.D. (2013). Theoretical and experimental analysis of RHS/CHS K gap joints. *Rem-revista Escola De Minas*, 66, 295-300.

McCORMAC, J. (2016). *Diseño de estructuras de acero - 5a ed.* Alfaomega Grupo Editor.

Mendes, F. C. (2008). Análise teórica-experimental de ligações tipo “t”, “k” e “kt” com perfis metálicos tubulares. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Norma E.090, 2020. *Estructuras Metalicas, Reglamento Naciona de Edificaciones*. Lima, Peru.

- Nobre, D. S., De Lima, L. R., Da S Vellasco, P., Costa-Neves, L., & Da Silva, A. L. L. (2015). Evaluation of CHS tubular KK joints. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12(11), 2143-2158. <https://doi.org/10.1590/1679-78251789>
- Ochoa, A. (2013). Análisis y diseño de nudos en estructuras tubulares según el Eurocódigo 3. Universidad Politecnica de Cartagena.
- Mendanha, F. O. (2006). Análise de ligações de perfis tubulares em aço do tipo k e kt. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Packer, J., Sherman, D., & Lecce, M. (2010). *Steel Design Guide 24: Hollow Structural Section Connections*. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois.
- Pajarón Santos, P. (2014). Análisis por elementos finitos de nudos en T de estructuras tubulares con perfiles RHS y SHS. Universidad Politecnica de Cartagena.
- Wardenier, J., Packer, J.A., Zhao, X.L., & Vegte, G.J. (2010). *Hollow sections in structural applications*. CIDECT, Geneva, Switzerland.
- Zapata, L. (1997). *Diseño estructural en acero*. Lima, Peru.
- Zhao, X. L. (2000). Deformation limit and ultimate strength of welded T-joints in cold-formed RHS sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 53(2), 149-165. [https://doi.org/10.1016/s0143-974x\(99\)00063-2](https://doi.org/10.1016/s0143-974x(99)00063-2)

## ANEXOS

### Anexo A: Norma E090 Estructuras metálicas y Guía de diseño N°24 del AISC.

Las Normativas Americana y Nacional presentan las mismas formulaciones en la evaluación de las uniones en K con espaciamiento (Figura A-).

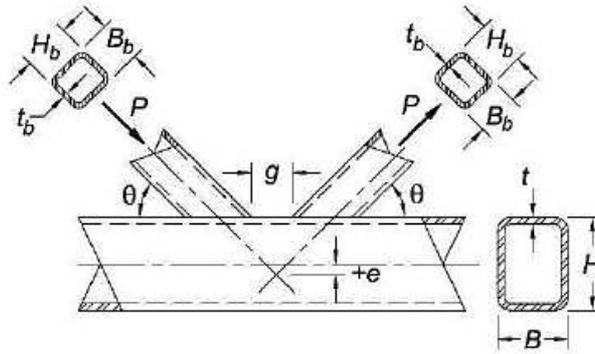


Figura A-1. Parámetros de unión en K con espaciamiento.  
Imagen obtenida de (E.090 Estructuras Metálicas, 2016)

Resistencia axial de diseño de la unión:

- Estado límite: Plastificación de la pared del cordón, para todos los valores de  $\beta$ .

$$P_n \sin \theta = F_y t^2 (9.8 \beta_{\text{eff}} \gamma^{0.5}) Q_f \quad (\text{A-1})$$

$$\phi = 0.9 \text{ (LRFD)}$$

- Estado límite: Fluencia en corte (Punzonamiento), cuando:  $B_b < B - 2t$ .

No verificar para diagonales cuadradas.

$$P_n \sin \theta = 0.6 F_y t B (2 \eta + \beta + \beta_{\text{cop}}) \quad (\text{A-2})$$

$$\phi = 0.95 \text{ (LRFD)}$$

- Estado límite: Corte de las paredes laterales del cordón, en la región del espaciamiento.

$$P_n \sin \theta = 0.6 F_y 2h t C_v \quad (\text{A-3})$$

Donde  $C_v$  es:

$$\text{Cuando: } h/t \leq 1.1 \sqrt{5 E / F_y}$$

$$C_v = 1 \quad (\text{A-4})$$

Cuando:  $1.1 \sqrt{5 E / F_y} < h / t \leq 1.37 \sqrt{5 E / F_y}$

$$C_v = \frac{1.1 \sqrt{5 E / F_y}}{h / t} \quad (\text{A-5})$$

Cuando:  $h / t > 1.37 \sqrt{5 E / F_y}$

$$C_v = \frac{7.55 E}{(h / t)^2 F_y} \quad (\text{A-6})$$

No verificar para cordones de sección cuadrada.

- Estado límite: Fluencia local de las diagonales debido a distribución desigual de las cargas.

No verificar para diagonales cuadradas o si  $B / t \geq 15$ .

$$P_n = F_{yb} t_b (2H_b + B_b + b_{coi} - 4t_b) \quad (\text{A-7})$$

$$\phi = 0.95 \text{ (LRFD)}$$

Donde

$$b_{coi} = \frac{10}{B} \left( \frac{F_y t}{F_{yb} t_b} \right) B_b \leq B_b \quad (\text{A-8})$$

Funciones:

$$Q_f = 1 \text{ para el cordón (superficie de conexión) en tracción} \quad (\text{A-9})$$

$$Q_f = 1.3 - 0.4 \frac{U}{\beta_{eff}} \leq 1 \text{ para la brida (superficie de conexión) en compresión,} \quad (\text{A-10})$$

para conexiones en K con espaciamiento

$$U = \left| \frac{P_u}{F_c A_g} + \frac{M_u}{F_c S} \right| \quad (\text{A-11})$$

donde  $P_u$  y  $M_u$  se determinan en el lado de la junta que tiene el mayor esfuerzo de compresión.  $P_u$  y  $M_u$  son las resistencias requeridas en el HSS

$$\beta_{eff} = [(B_b + H_b)_{compresión} + (B_b + H_b)_{tracción}] / 4B \quad (\text{A-12})$$

$$\beta_{cop} = \frac{5\beta}{\gamma} \leq \beta \quad (\text{A-13})$$

## **Anexo B: Guía de Diseño N°3 del CIDECT y el EUROCÓDIGO 3 Parte 1-8 uniones**

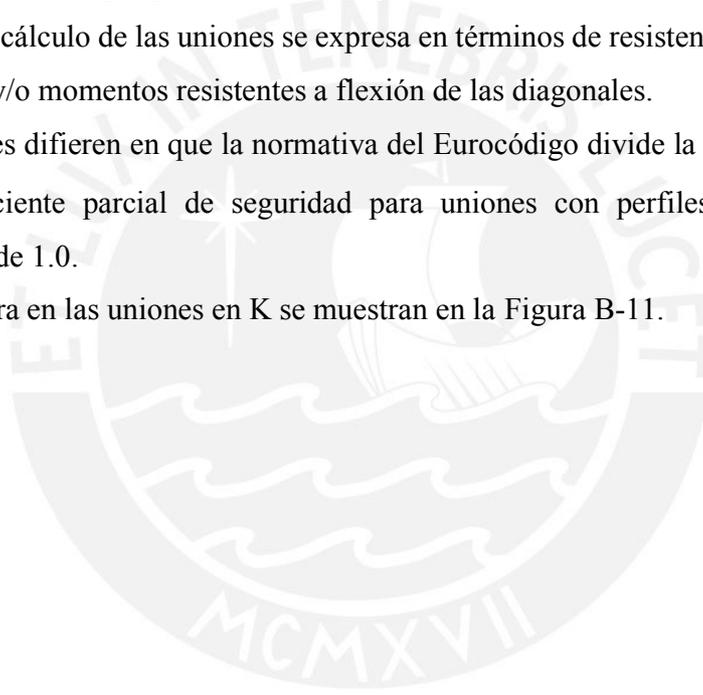
La Guía de Diseño N° 3 del CIDECT: Guía de diseño para nudos de perfiles tubulares rectangulares (RHS) bajo cargas predominantemente estáticas, en el capítulo 3 establece que los cálculos de las uniones se dan en términos de resistencia en los estados límite. Eso significa que el efecto de las cargas de cálculo, no debería sobrepasar la resistencia de cálculo de la unión.

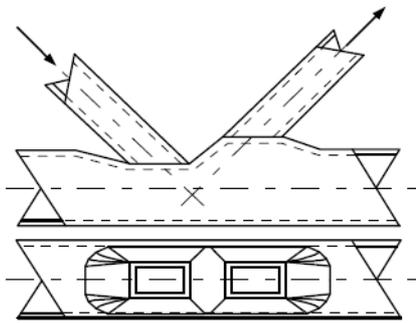
El Eurocódigo 3 Parte 1-8 uniones en el capítulo 7, Uniones de perfiles huecos, proporciona detalles para determinar la resistencia de cálculo de uniones planas y espaciales en estructuras en armadura constituidas por perfiles huecos bajo sollicitaciones estáticas.

La resistencia de cálculo de las uniones se expresa en términos de resistencia de cálculo ante esfuerzos axiales y/o momentos resistentes a flexión de las diagonales.

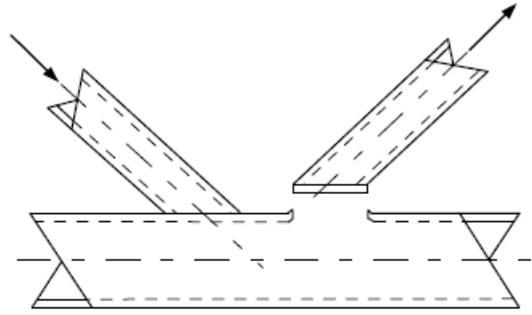
Las formulaciones difieren en que la normativa del Eurocódigo divide la fórmula entre  $\gamma_{M5}$  que es el coeficiente parcial de seguridad para uniones con perfiles huecos el valor recomendado es de 1.0.

Los tipos de rotura en las uniones en K se muestran en la Figura B-11.

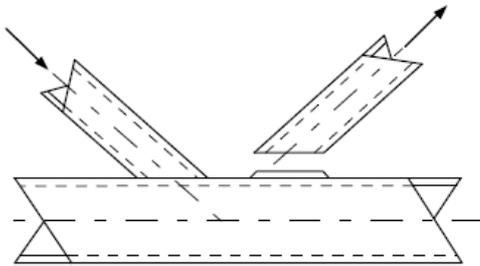




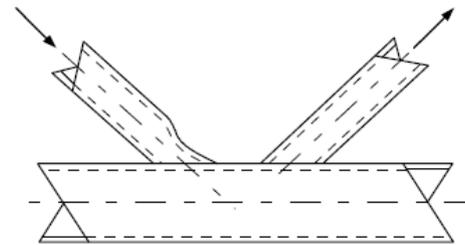
Rotura a flexión de la cara de la brida



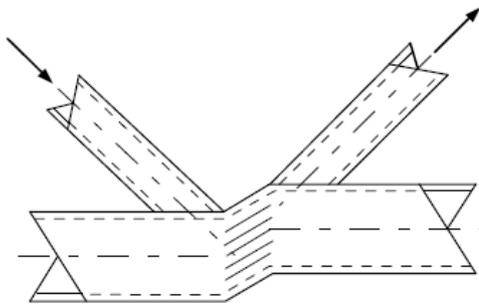
Rotura por punzonamiento de la cara de la brida



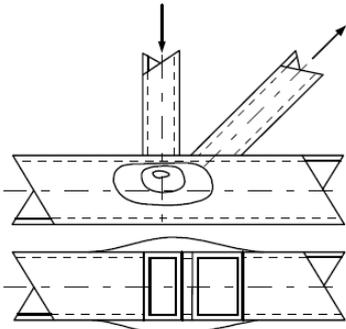
Rotura por tracción en la diagonal



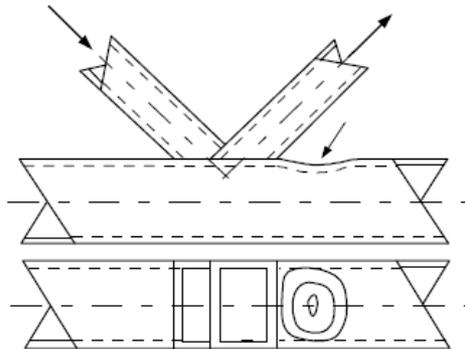
Pandeo local de la diagonal



Rotura total del cordón por esfuerzo cortante



Pandeo local de las paredes del cordón



Pandeo local de la cara del cordón

Figura B-1. Tipos de rotura para uniones de armadura de RHS de tipo K.  
Imagen obtenida de (CIDECT, 2009).

Fluencia de la cara del cordón

$$N_i^* = 8.9 \frac{f_{y0} t_0^2}{\text{sen } \theta_i} \left[ \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4 b_0} \right] \gamma^{0.5} f(n) \quad (\text{B-14})$$

Esfuerzo cortante del cordón

$$N_i^* = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \text{sen } \theta_i} \quad (\text{B-215})$$

$$N_0^* (\text{gap}) \leq (A_0 - A_v) f_{y0} + A_v f_{y0} (1 - (V/V_p)^2)^{0.5} \quad (\text{B-3})$$

Rotura de la diagonal

$$N_i^* = f_{yi} t_i (2h_i - 4t_i + b_i + b_e) \quad (\text{B-4})$$

Base: punzonamiento para  $\beta \leq 1 - 1/\gamma$

$$N_i^* = \frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \text{sen } \theta_i} \left[ \frac{2h_i}{\text{sen } \theta_i} + b_i + b_{ep} \right] \quad (\text{B-5})$$

Funciones:

$$f(n) = 1.0 \text{ para } n \geq 0 \text{ (tensión)} \quad (\text{B-6})$$

$$f(n) = 1.3 + \frac{0.4}{\beta} n \text{ para } n < 0 \text{ (compresión)} \quad (\text{B-7})$$

Siendo:

$$A_v = (2 h_0 + \alpha b_0) t_0 \quad (\text{B-8})$$

Para una diagonal de sección cuadrada o rectangular:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}} \quad (\text{B-9})$$

$$b_e = \frac{10 f_{y0} t_0}{b_0 / t_0 f_{yi} t_i} b_i \quad (\text{B-10})$$

pero  $b_e \leq b_i$

$$b_{ep} = \frac{10}{b_0 / t_0} b_i \quad (\text{B-1116})$$

pero  $b_{ep} \leq b_i$

## Anexo C: Cálculo analítico de elementos estructurales

Área construida para procesos industriales en una planta de alimentos de dimensiones 30 m de luz por 15 m de vano a una altura de 6 m con construcción en concreto, la cobertura es del tipo TCA-PUR de paneles metálicos aislantes con las siguientes características:

TCA-PUR 804

Espesor: 35 mm

Peso del panel: 8.64 kgf/m<sup>2</sup>

Para efectos prácticos se toma la carga de 10 kgf/m<sup>2</sup>.

La iluminación es del tipo led se asume una carga de 10kgf/m<sup>2</sup> considerando cableado y canaletas.

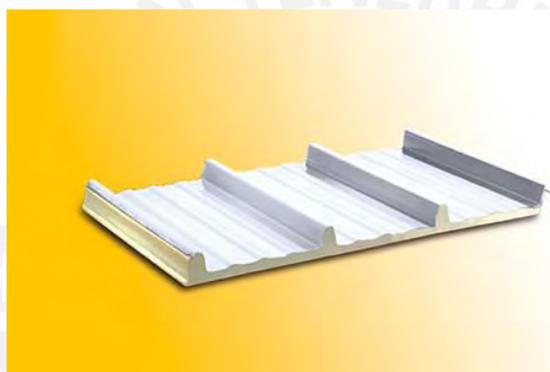


Figura C-1. Thrmotecho TCA PUR.

Imagen obtenida de <https://precor.pe/es/producto/thrmotecho-tca-pur>.

La carga muerta considera el peso de los elementos fijos a la estructura que son el panel aislante y la iluminación, sumado a ello el peso propio de los perfiles metálicos, estos son calculados y tenemos como resultado luego de varias iteraciones.

Tabla C-1. Perfiles metálicos de la nave industrial

Descripción	Perfil	Peso propio (kgf) / unidad
Largueros	Z 600x100x50x3 mm	311
Distanciadores	Barra lisa $\phi 1/2''$	3
Brida superior	Tubo cuadrado 5''x5/16''	800
Brida inferior	Tubo cuadrado 5''x1/4''	640
Diagonales	Tubo cuadrado 3''x1/4''	31

Se define el ancho tributario para la asignación de cargas a la armadura como muestra la Figura C-2.

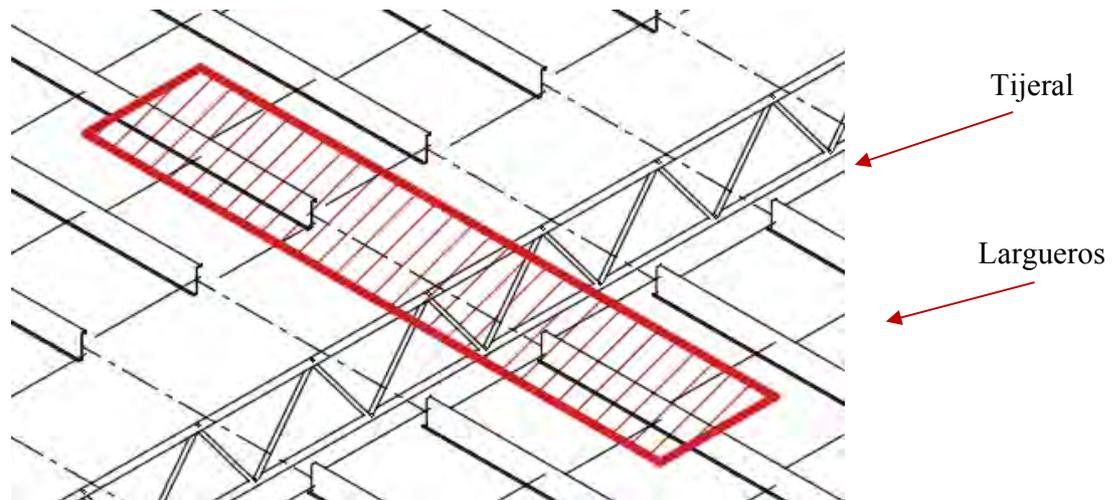


Figura C-2. Área tributaria de un nodo de la armadura. Fuente propia.

Para el ancho tributario de la armadura de área  $3 \times 15 \text{ m}^2$  el peso propio es de 210.6 kgf, y del larguero de 311 kgf csumando en total con la carga por el panel y la iluminación 1421.6 kgf. La carga viva es la carga mínima requerida para los trabajos de instalación y mantenimiento para la norma peruana E.020 Cargas el valor es de  $30 \text{ kgf/m}^2$ , para el ancho tributario asignado en la armadura tenemos un valor de 1350 kgf.

No se considera carga por lluvias y viento por ser una estructura dentro de otra estructura, la carga de sismo tampoco es considerada por el tipo de estructura metálica esbelta.

La norma LRFD da una combinatoria de cargas para el sistema de cargas gravitacionales carga muerta y carga viva, siendo la combinación más crítica de  $1.2D+1.6L$ , teniendo un valor de 3866 kgf.

Para los nodos de los extremos la carga es la mitad de 1933 kgf (Figura C-3).

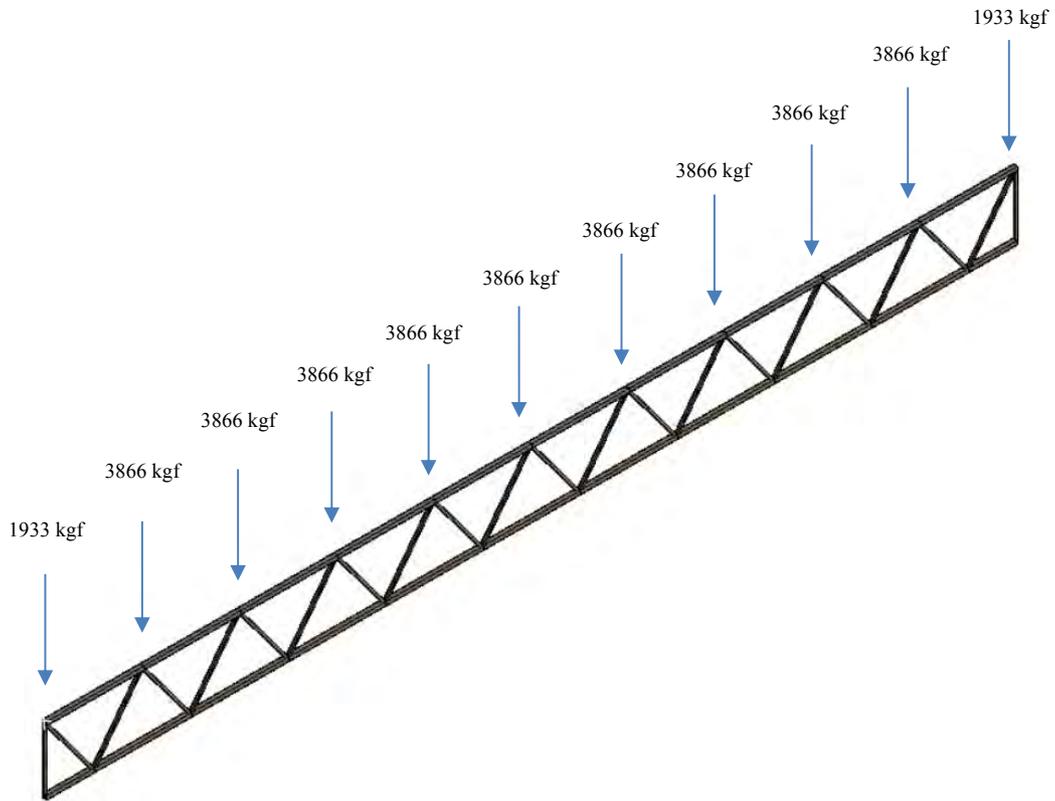


Figura C-3. Acciones externas sobre la estructura.  
Fuente propia.

Las fuerzas internas se obtendrán realizando el cálculo en el programa Ansys 2019 R3.

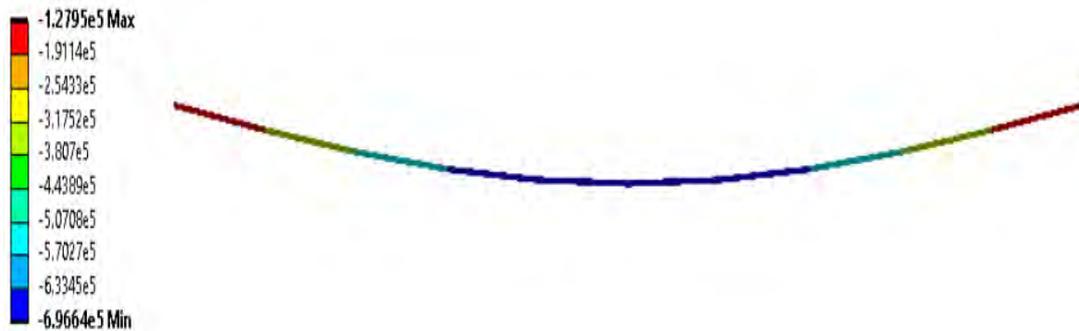


Figura C-4. Fuerzas axiales internas sobre la brida superior (Valor Máx.: 156.61 kips).  
Fuente propia.

Se usaron los perfiles indicados en el Manual del AISC 15th para el diseño se usó la sección tubular cuadrada 5"x5"x5/16" con un material ASTM A500 Gr. B que tiene un  $f_y = 46$  ksi.

La sección se considera compacta y se diseñó como una viga a compresión simplemente apoyada en sus extremos, las propiedades del perfil se muestran en la Figura C-5.

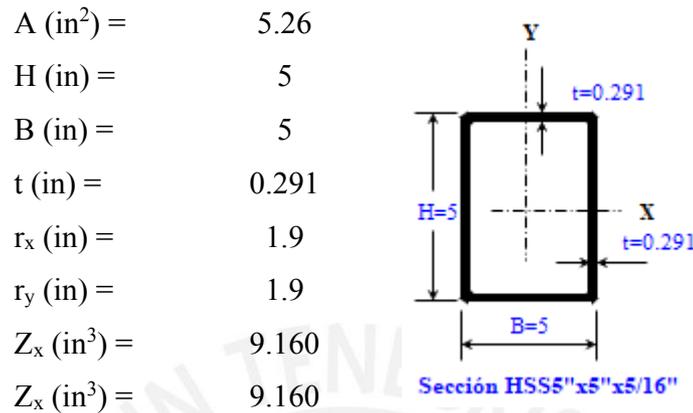


Figura C-5. Propiedades del perfil HSS5"x5"x5/16".  
Obtenido de (American Institute of Steel Construction, 2013)

La resistencia a la compresión  $\phi_c P_n = 167.91 \text{ kips} > 156.61 \text{ kips}$ , lo que avala el diseño y el perfil HSS5"x5"x5/16" es el seleccionado para la brida superior de la armadura.



Figura C-6. Fuerzas axiales internas sobre la brida inferior (Valor Máx.: 159.81 kips).  
Fuente propia.

El perfil seleccionado es el HSS4"x5"x1/4" con un material ASTM A500 Gr. B que tiene un  $f_y = 46 \text{ ksi}$ .

Se diseñó como una viga a tracción simplemente apoyada en sus extremos.

En la Figura C-6 se aprecia las tensiones internas sobre la brida inferior y las propiedades del perfil seleccionado en la Figura C-7.

A (in <sup>2</sup> ) =	4.30
H (in) =	5
B (in) =	5
t (in) =	0.233
r <sub>x</sub> (in) =	1.93
r <sub>y</sub> (in) =	1.93
Z <sub>x</sub> (in <sup>3</sup> ) =	7.61
Z <sub>y</sub> (in <sup>3</sup> ) =	7.61

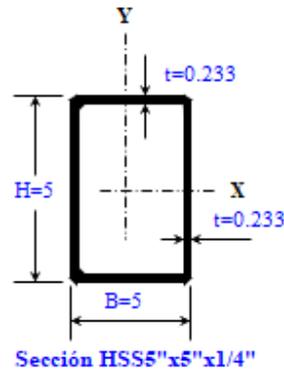


Figura C-7. Propiedades del perfil HSS5"x5"x1/4".  
Obtenido de (American Institute of Steel Construction, 2013)

La resistencia a la tracción  $\phi_t P_n = 178.02 \text{ kips} > 159.81 \text{ kips}$ , lo que avala el diseño y el perfil HSS5"x5"x1/4" es el seleccionado para la brida inferior de la armadura.

Las diagonales trabajan a tracción y compresión se analiza el más crítico de ambos para definir la sección del perfil, se asume un perfil tubular cuadrado de 3"x3"x1/4".

El material de las diagonales es ASTM A500 Gr. B con sus extremos simplemente apoyados, las Fuerzas axiales internas se muestran en la Figura C-.

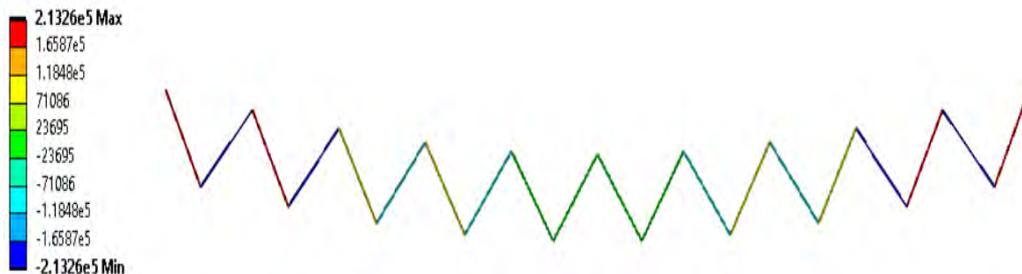


Figura C-8. Fuerzas axiales internas sobre las diagonales (Valor Máx.: ±47.94 kips).

Fuente propia.

Las propiedades del perfil se muestran en la Figura C-9.

A (in <sup>2</sup> ) =	2.44
H (in) =	3
B (in) =	3
t (in) =	0.233
r <sub>x</sub> (in) =	1.11
r <sub>y</sub> (in) =	1.11
Z <sub>x</sub> (in <sup>3</sup> ) =	2.48
Z <sub>y</sub> (in <sup>3</sup> ) =	2.48

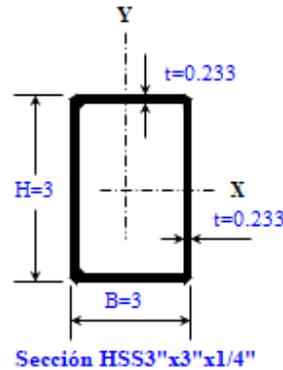


Figura C-9. Propiedades del perfil HSS3"x3"x1/4".  
Obtenido de (American Institute of Steel Construction, 2013)

Las secciones asumidas para las diagonales se consideran compactas por lo que la resistencia a la compresión  $\phi_c P_n = 59.54 \text{ kips} > 47.76 \text{ kips}$ , lo que avala el diseño y el perfil HSS3"x3"x1/4" es el seleccionado para las diagonales a compresión, y, la resistencia a la tracción  $\phi_t P_n = 101.02 \text{ kips} > 47.76 \text{ kips}$ , lo que avala el diseño y el perfil HSS3"x3"x1/4" es el seleccionado para las diagonales a tracción.

En la Figura C-10 se muestran las Fuerzas axiales en los montantes.



Figura C-10. Fuerzas axiales internas en montantes (Valor Max: 42.61 kips).  
Fuente propia.

Se utilizó el mismo perfil para los montantes laterales de la armadura las cuales trabajan a compresión y están simplemente apoyadas en sus extremos  $\phi_c P_n = 72.02 \text{ kips} > 47.76 \text{ kips}$ , lo que avala el diseño y el perfil HSS3"x3"x1/4" es el seleccionado.

Para el cálculo de las uniones verificamos que el más crítico es de la unión en K con espaciamiento de la brida superior cercana a los extremos de la armadura donde se desarrolla mayores tensiones internas.

Tabla C-2. Tabla de valores calculados para la unión

UNIÓN EN K CON ESPACIAMIENTO

Restricción	Valor obtenido	Valor de referencia	Resultado
$b_1/b_0 - (0.1 + 0.001b_0/t_0) // (b_1=b_2)$	0.33	$\geq 0$	Cumple
$b_0/t_0$	17.19	$\leq 35$	Cumple
$(E/f_{y1})^{0.8} - b_1/t_1 // (t_1 = t_2)$	159.59	$\geq 0$	Cumple
$b_1/t_1 = b_2/t_2 = h_1/t_1 = h_2/t_2$	12.87	$\leq 35$	Cumple
$h_0/t_0$	17.19	$\leq 35$	Cumple
$h_0/b_0$	1.00	$\geq 0.5$	Cumple
$h_0/b_0$	1.00	$\leq 2$	Cumple
$h_1/b_1 = h_2/b_2$	1.00	$\geq 0.5$	Cumple
$h_1/b_1 = h_2/b_2$	1.00	$\leq 2$	Cumple
$\beta$	0.60	$\geq 0.35$	Cumple
$1 - 1/g - \beta$	0.28	$\geq 0$	Cumple

Restricción	Valor obtenido	Valor de referencia	Resultado
$b_0/t_0$	17.19	$\geq 15$	Cumple
$(b_1+b_2)/2b_1 = (b_1+b_2)/2b_2$	1.00	$\geq 0.6$	Cumple
$(b_1+b_2)/2b_1 = (b_1+b_2)/2b_2$	1.00	$\leq 1.3$	Cumple
$\beta$	0.60	$\leq 1$	Cumple

Valor inferior (mm)	Valor superior (mm)	Verificación (mm)	Valor adoptado (mm)
$\geq b_0 0.5(1-\beta)$	$\leq b_0 1.5(1-\beta)$	$\geq t_1+t_2$	g
25.4	76.2	11.84	30.48

Esfuerzos axiales internos de cálculo de cada barra

Esfuerzo en cordón máx.	$N_{0,Ed} =$	-355.00	kN
Esfuerzo en cordón mín.	$N_{0,Ed} =$	-128.00	kN
Esfuerzo en diagonal 1	$N_{1,Ed} =$	-213.26	kN
Esfuerzo en diagonal 2	$N_{2,Ed} =$	165.87	kN

Verificación	Valor obtenido (kN)	Valor de referencia ( $\geq$ )	Resultado
$N_{1,Rd,1} = 8.9k_n f_{y0} t_0^{0.5} Y^{0.5} \beta / \text{sen } \theta_1$	342.5	-213.26	Cumple
$N_{2,Rd,1} = 8.9k_n f_{y0} t_0^{0.5} Y^{0.5} \beta / \text{sen } \theta_2$	342.5	165.87	Cumple

## Anexo D: Resultados graficos

En la Figura D-1 se muestran la deformación de la unión N45k-gap25,4.

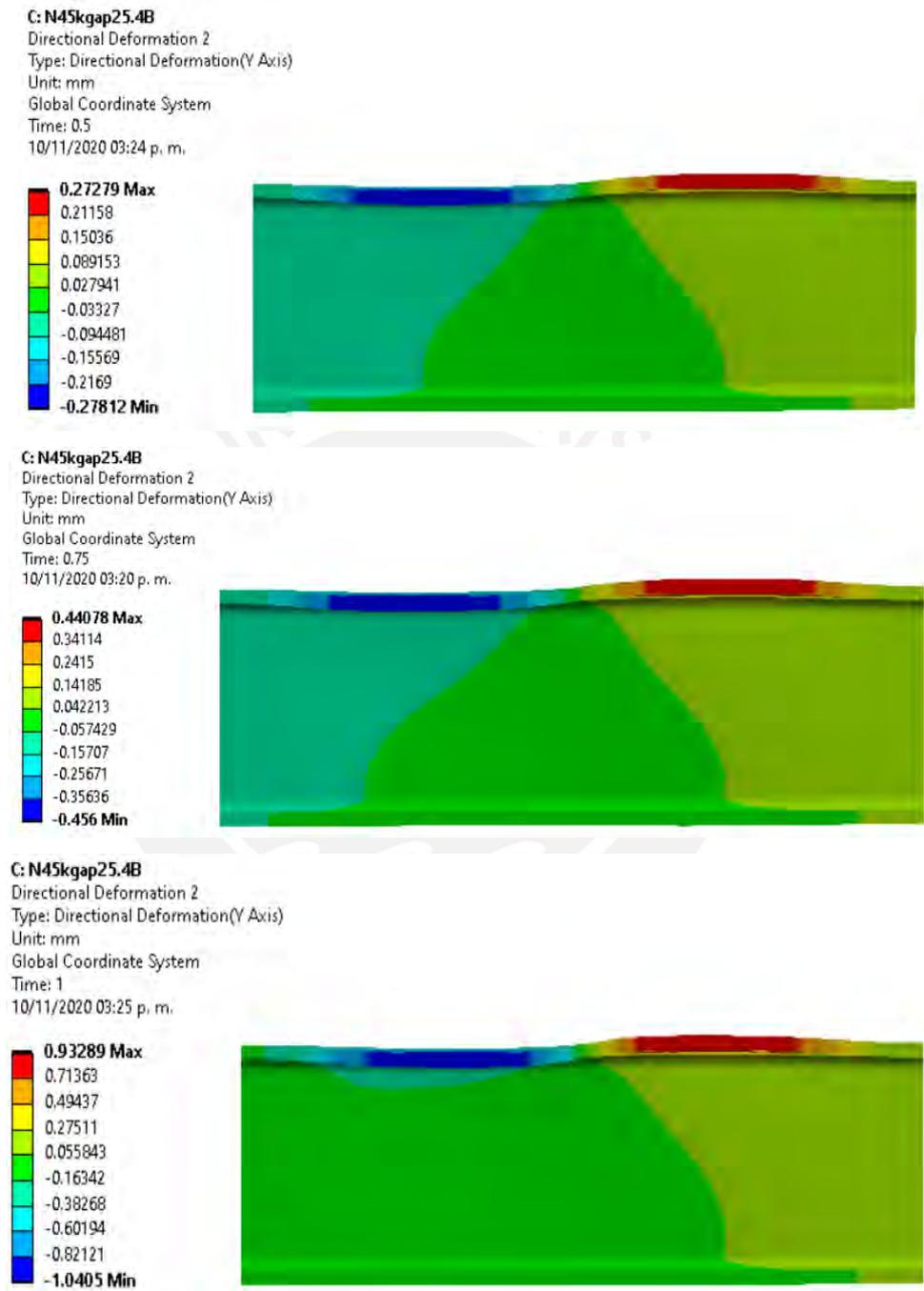


Figura D-1. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap25.4B.  
Fuente propia.

En la Figura D-2 se muestra la deformación de la brida con el material ASTM A500 Gr. C.

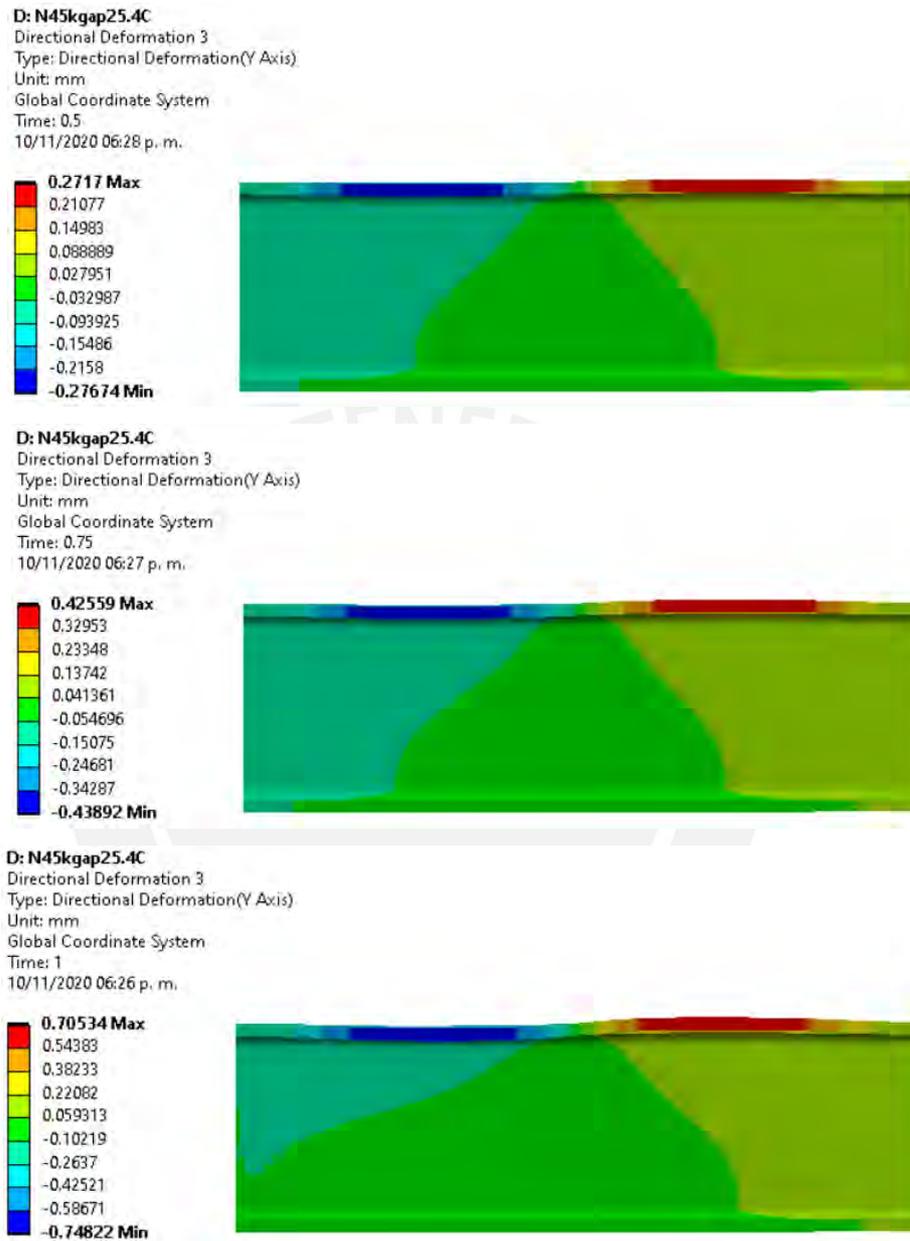


Figura D-2. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap25.4C.

Fuente propia.

En la Figura D-3Figura D-4 se muestra la deformación de la brida en la unión con el material ASTM A500 Gr. B y en la Figura D-4 del material ASTM A500 Gr. C.

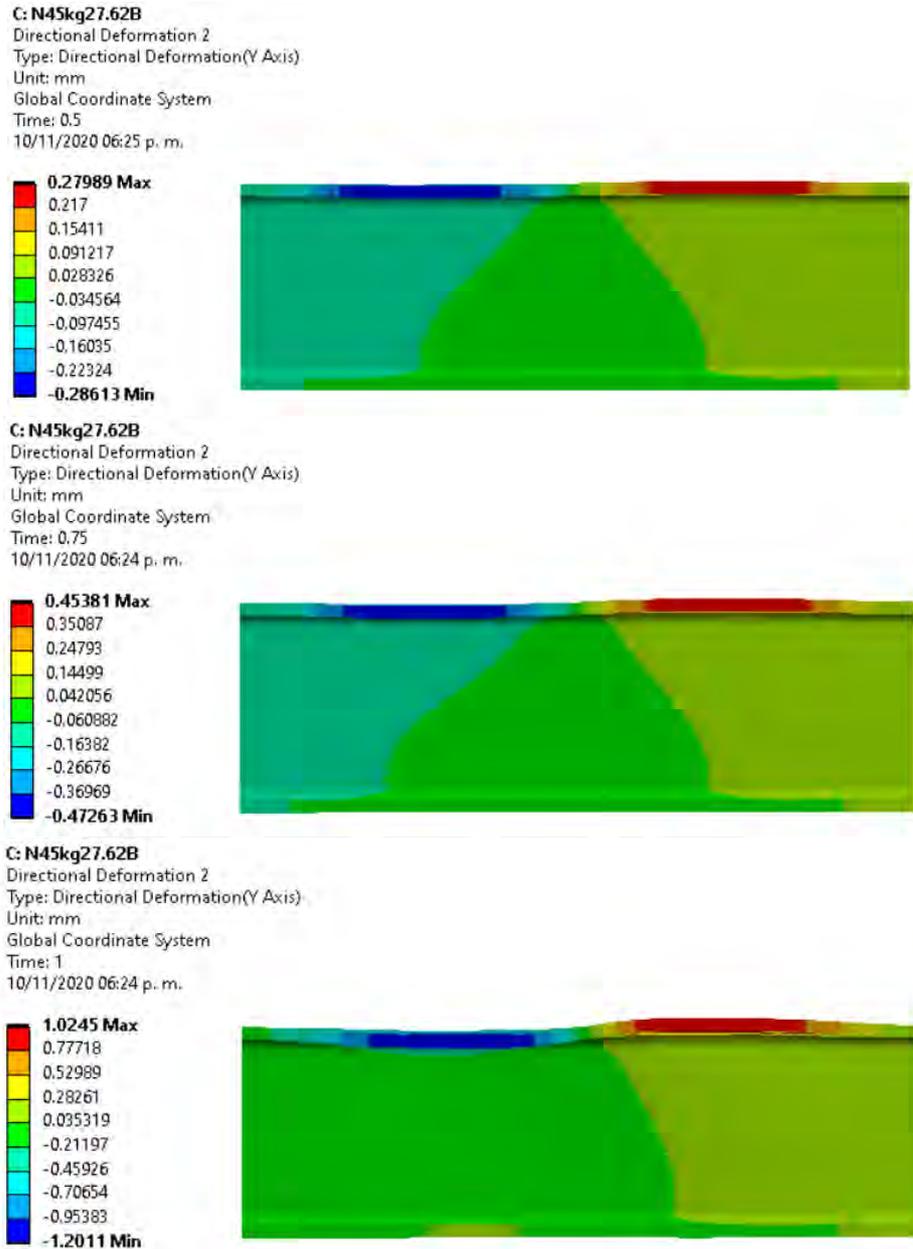


Figura D-3. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap27.62B.  
 Fuente propia.

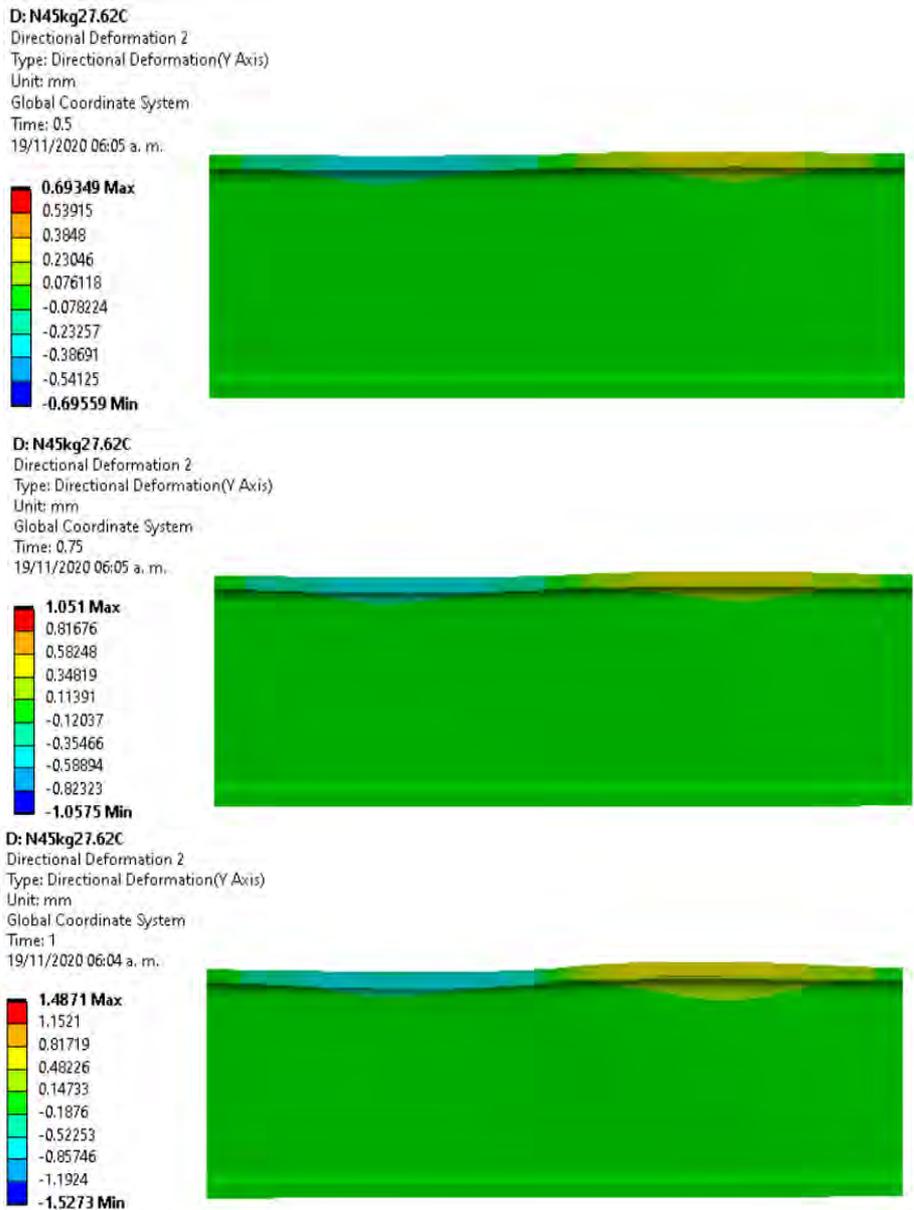


Figura D-4. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap27.62C.  
 Fuente propia.

En la Figura D-5Figura D-4 se muestra la deformación de la brida en la unión con el material ASTM A500 Gr. B y en la Figura D-6Figura D-4 del material ASTM A500 Gr. C.

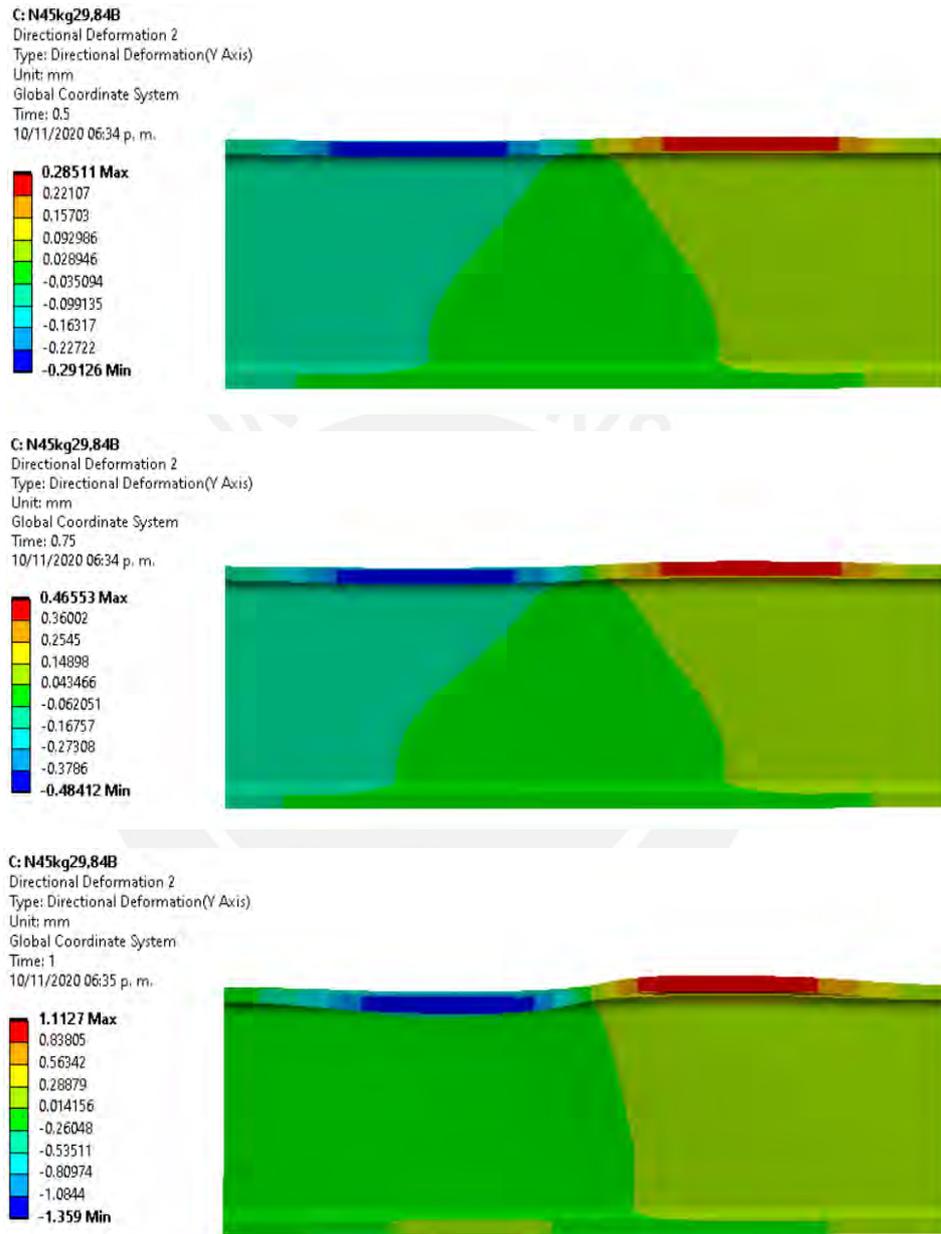


Figura D-5. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap29.84B.  
 Fuente propia.

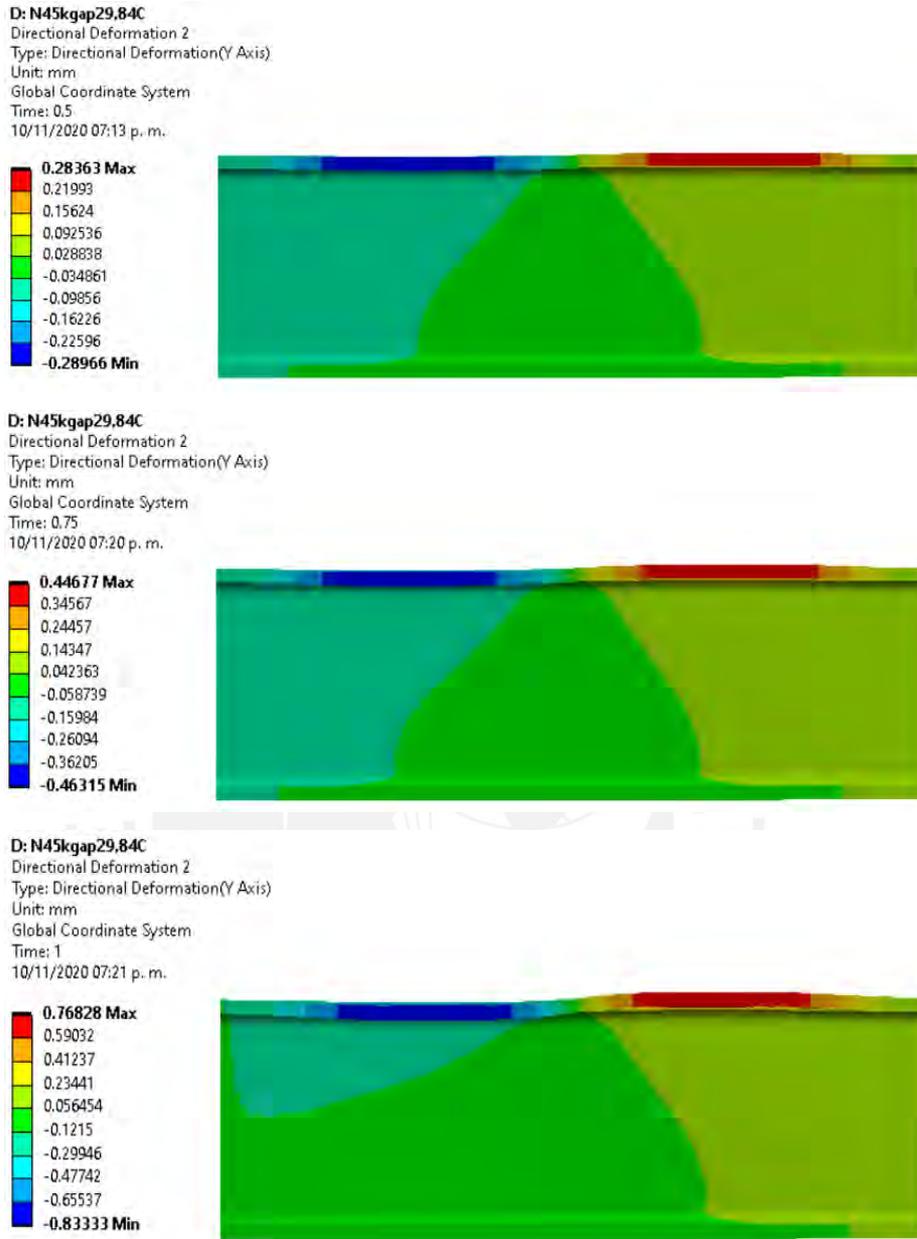


Figura D-6. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap29.84C.  
 Fuente propia.

En la Figura D-7Figura D-4Figura D-4 se muestra la deformación de la brida en la unión con el material ASTM A500 Gr. B y en la Figura D-8 del material ASTM A500 Gr. C.

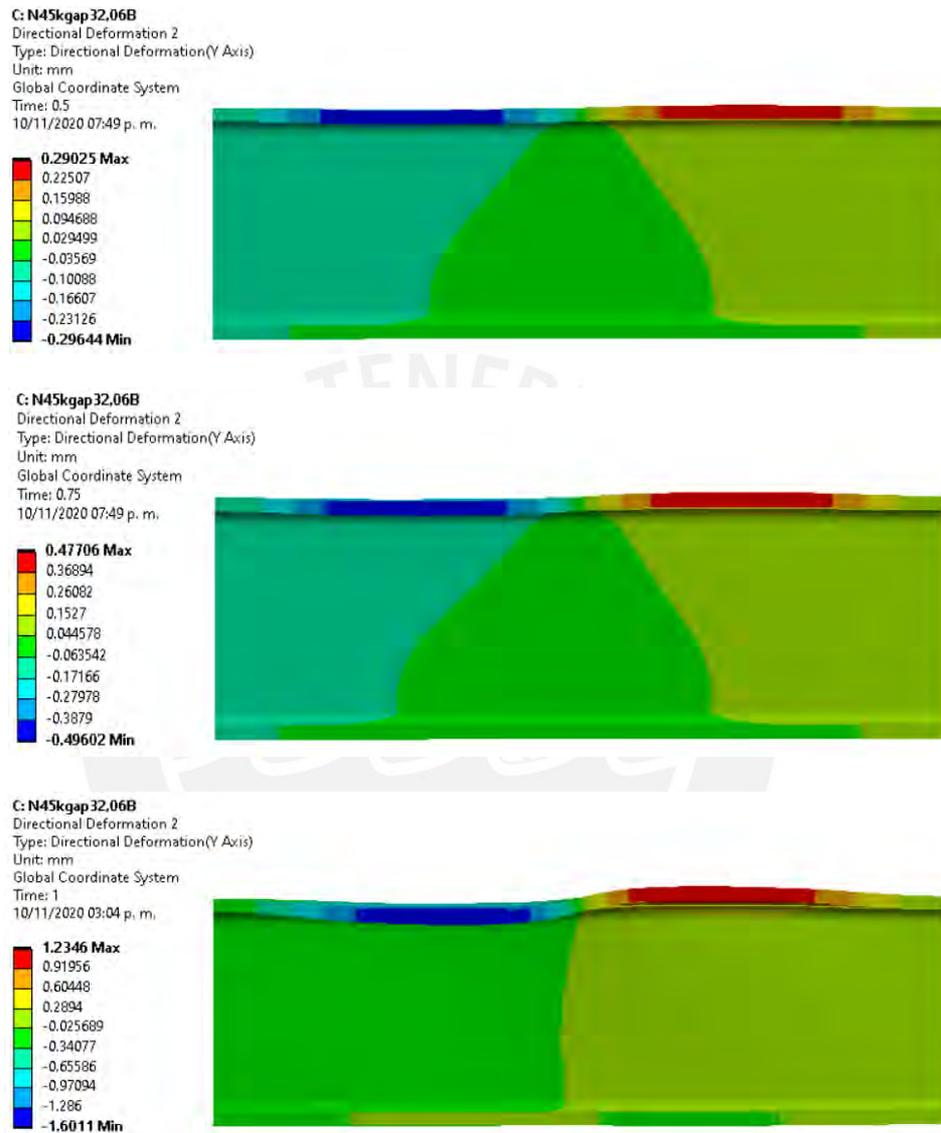
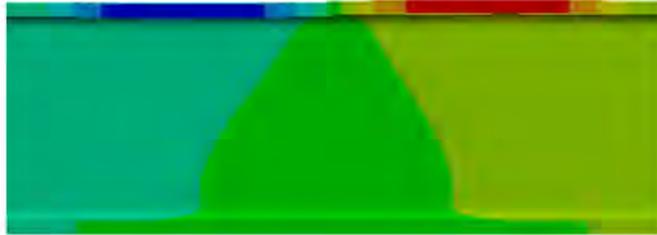
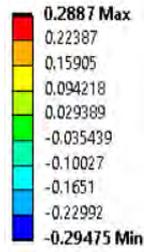
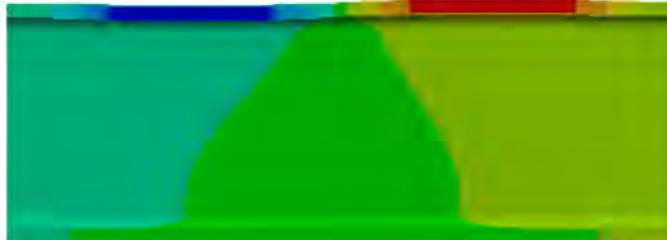
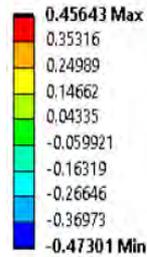


Figura D-7. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap32.06B.  
 Fuente propia.

**D: N45kgap32,06C**  
 Directional Deformation 2  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 0.5  
 10/11/2020 07:52 p. m.



**D: N45kgap32,06C**  
 Directional Deformation 2  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 0.75  
 10/11/2020 07:52 p. m.



**D: N45kgap32,06C**  
 Directional Deformation 2  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 1  
 10/11/2020 07:51 p. m.

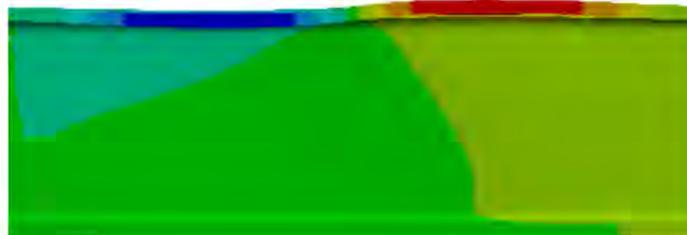
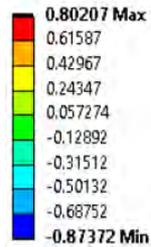


Figura D-8. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap32.06C.  
 Fuente propia.

En la Figura D-9, Figura D-4 y Figura D-4 se muestra la deformación de la brida en la unión con el material ASTM A500 Gr. B y en la Figura D-10 del material ASTM A500 Gr. C.

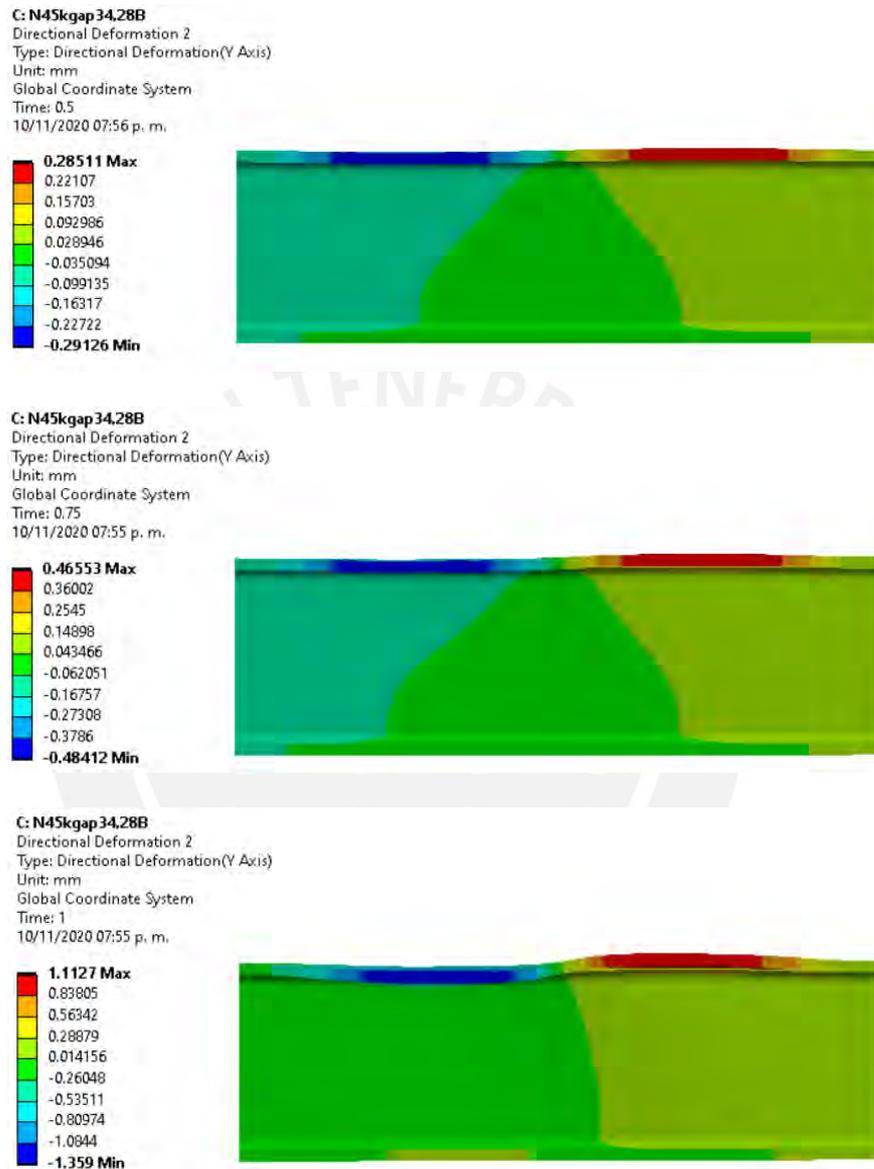


Figura D-9. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap34.28B.  
 Fuente propia.

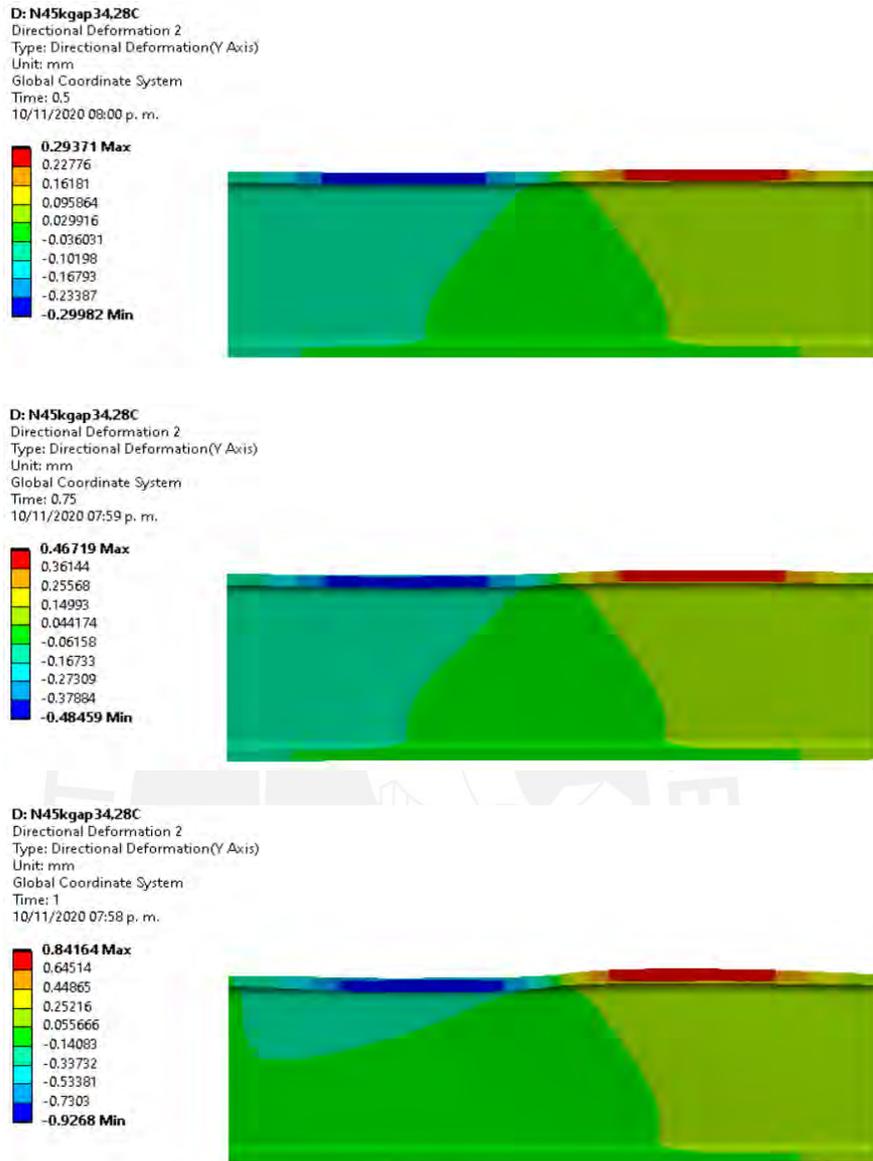


Figura D-10. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap34.28C.  
 Fuente propia.

En la Figura D-11, Figura D-4 y Figura D-4 se muestra la deformación de la brida en la unión con el material ASTM A500 Gr. B y en la Figura D-12 del material ASTM A500 Gr. C.

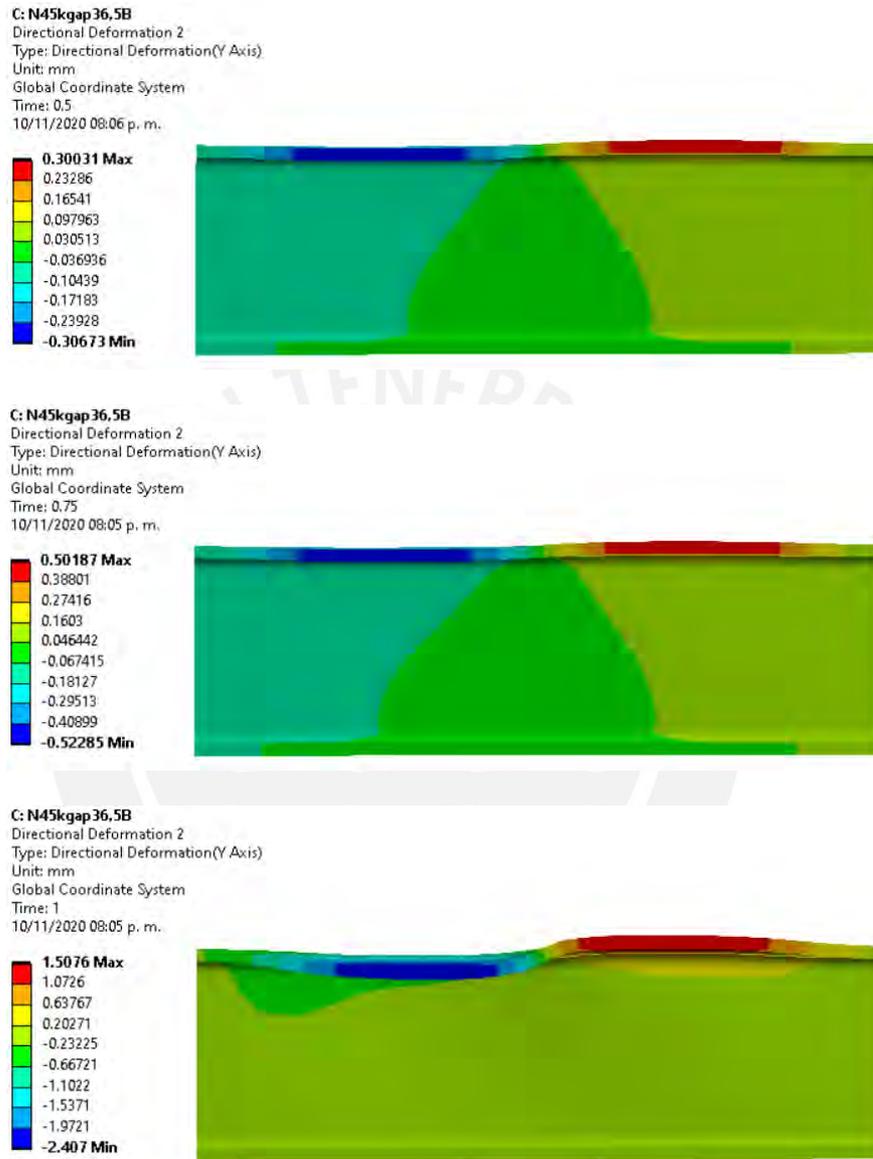


Figura D-11. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap36.5B.  
 Fuente propia.

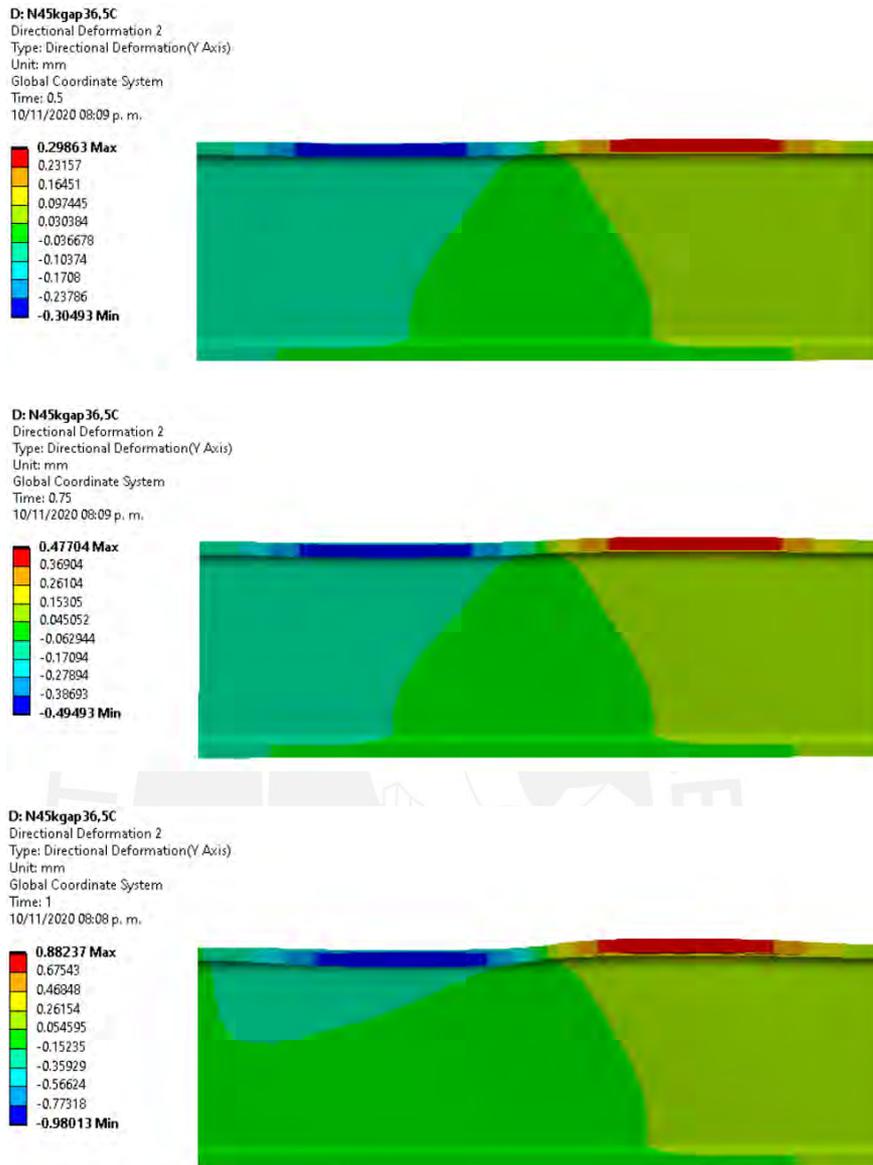


Figura D-12. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap36.5C.  
 Fuente propia.

En la Figura D-13 se muestra la deformación de la brida para el material ASTM A500 Gr. B y en la Figura D-14 la deformación de la brida para el material ASTM A500 Gr. C.

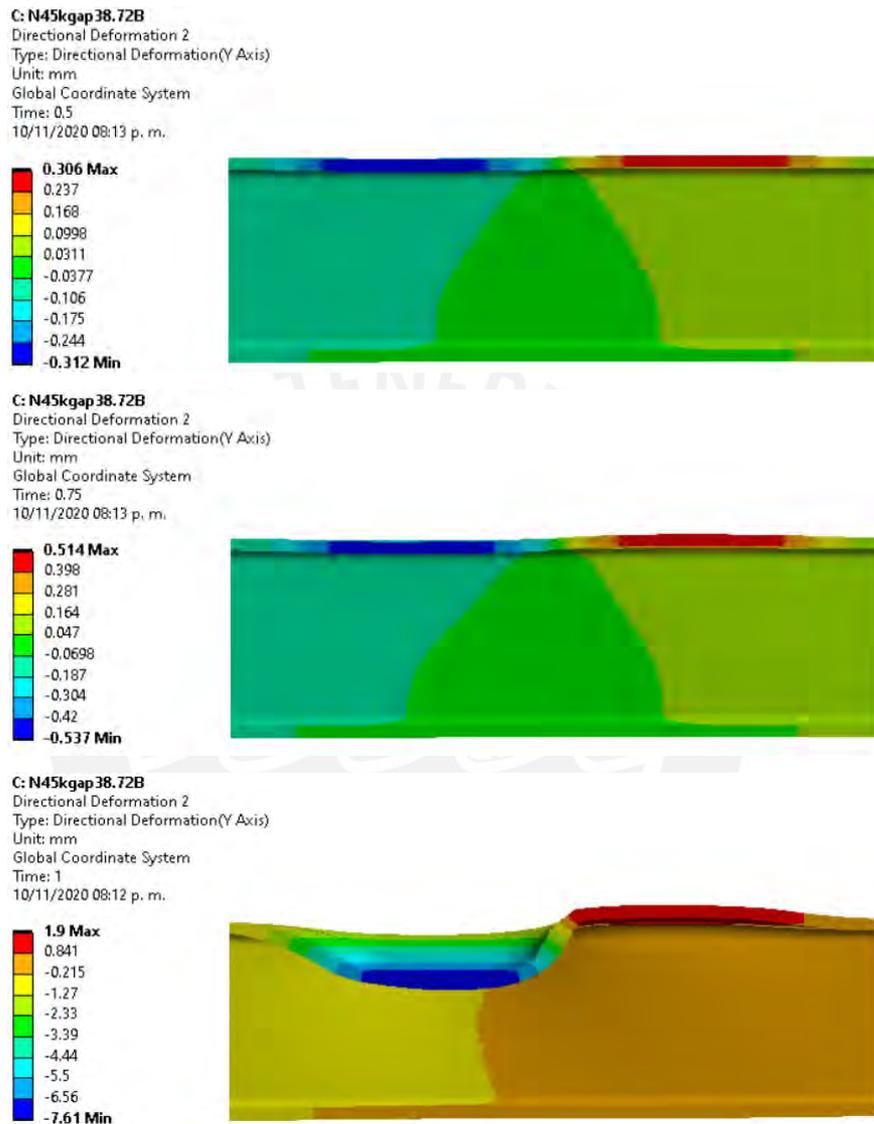


Figura D-13. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap38.72B.  
 Fuente propia.

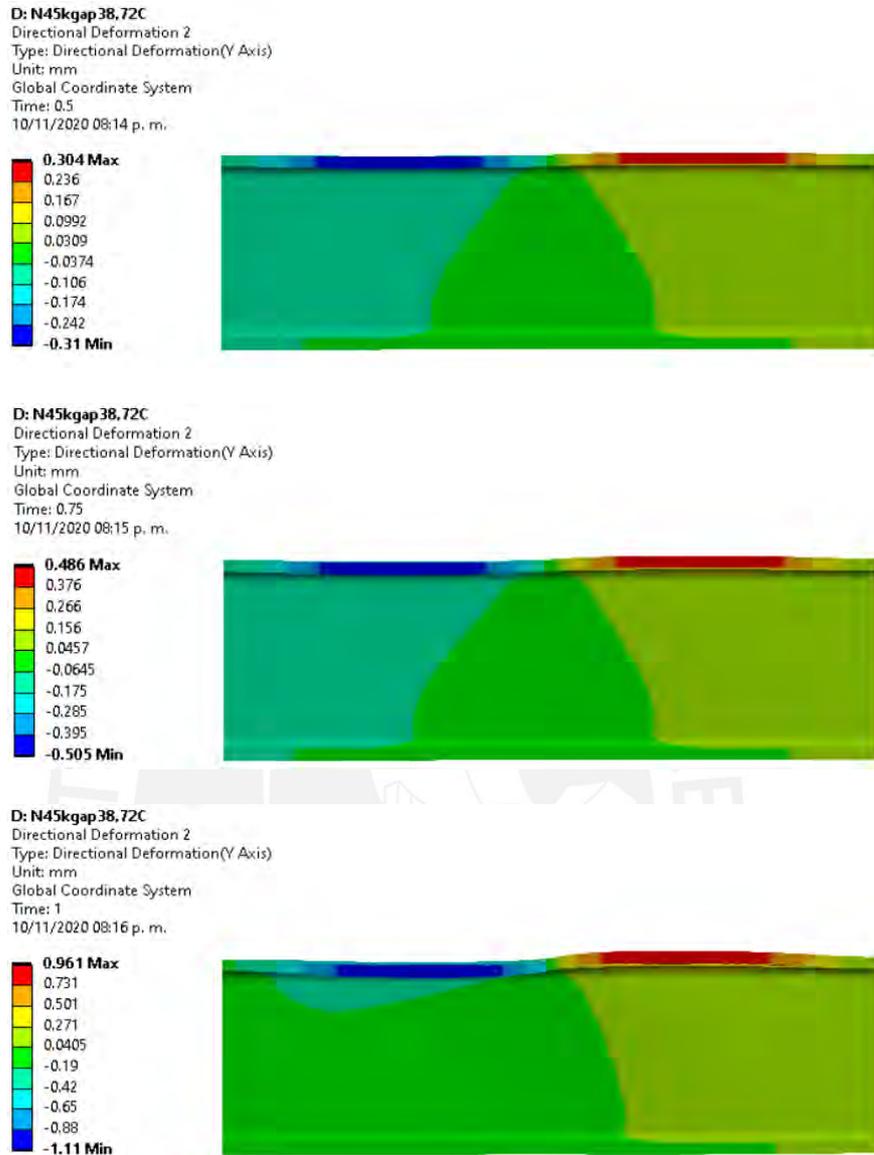


Figura D-14. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap38.72C.  
 Fuente propia.

En la Figura D-15 se muestra la deformación de la brida para la unión con el material ASTM A500 Gr. B y en la Figura D-16 la deformación de la brida para el material ASTM A500 Gr. C.

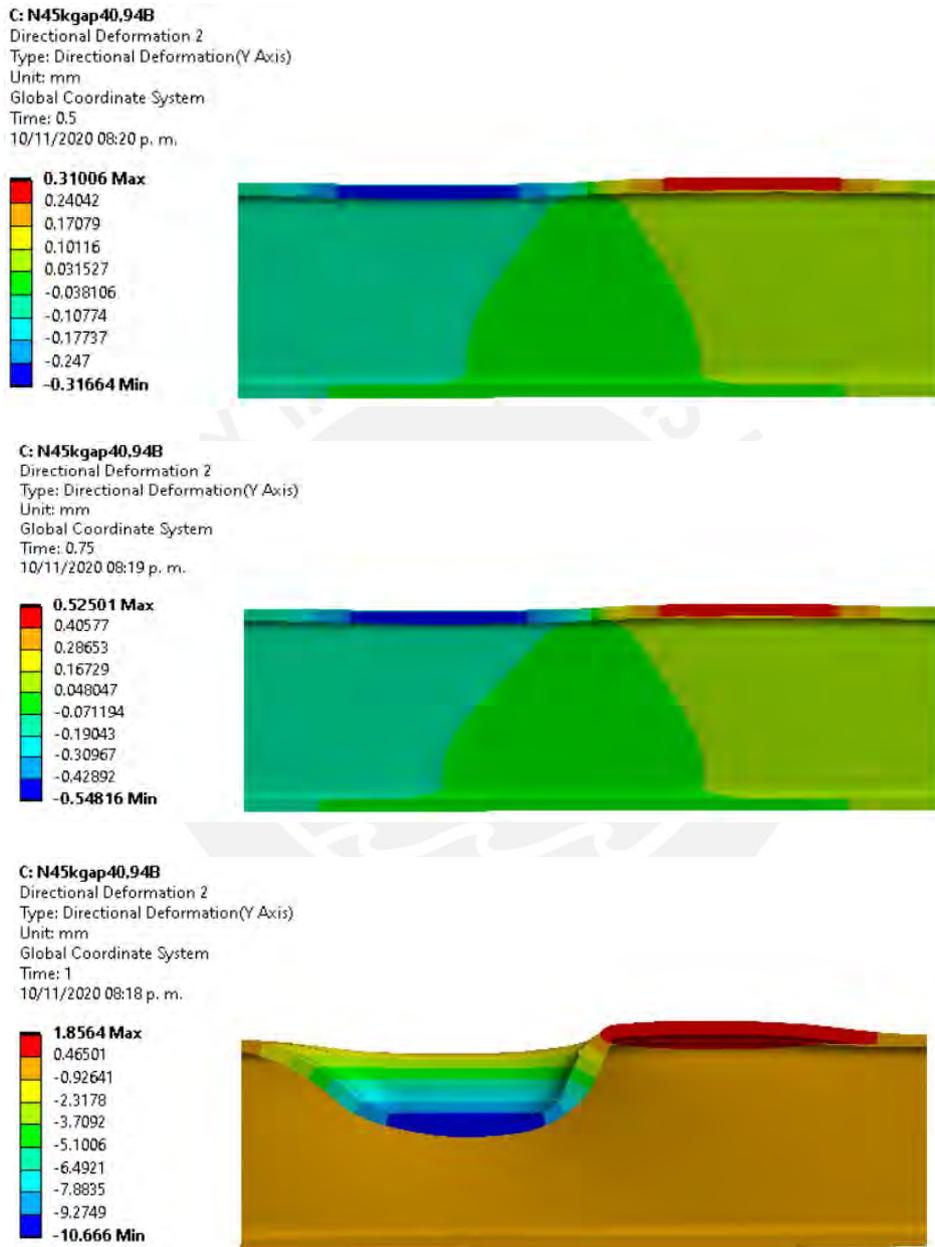
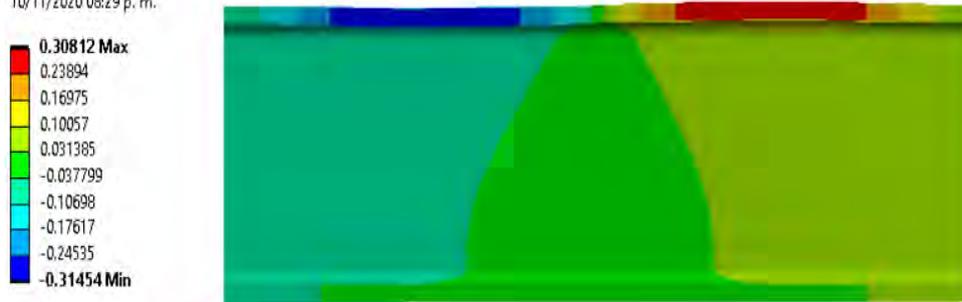
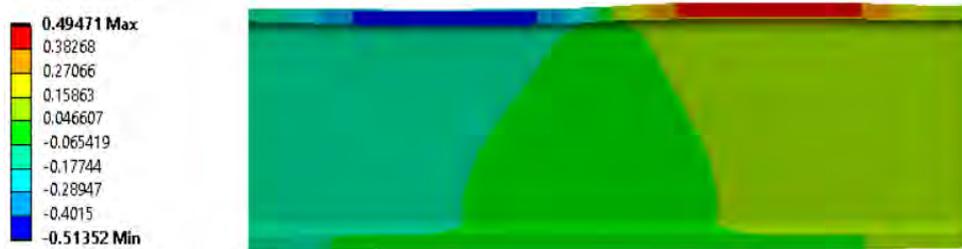


Figura D-15. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap40.94B.  
 Fuente propia.

**D: N45kgap40.94C**  
 Directional Deformation 2  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 0.5  
 10/11/2020 08:29 p. m.



**D: N45kgap40.94C**  
 Directional Deformation 2  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 0.75  
 10/11/2020 08:27 p. m.



**D: N45kgap40.94C**  
 Directional Deformation 2  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 1  
 10/11/2020 08:21 p. m.

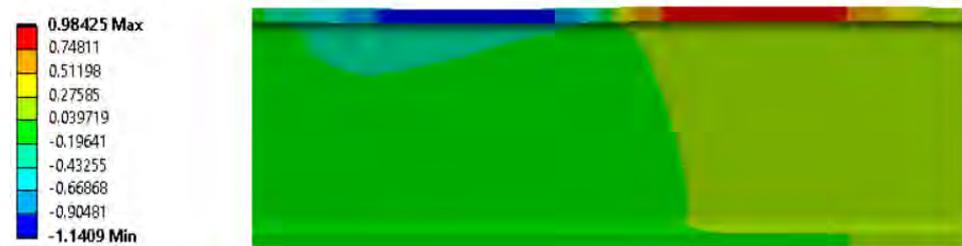


Figura D-16. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap40.94C.  
 Fuente propia.

En la Figura D-17 se muestra la deformación de la brida para la unión con el material ASTM A500 Gr. B y en la Figura D-18 la deformación de la brida para el material ASTM A500 Gr. C.

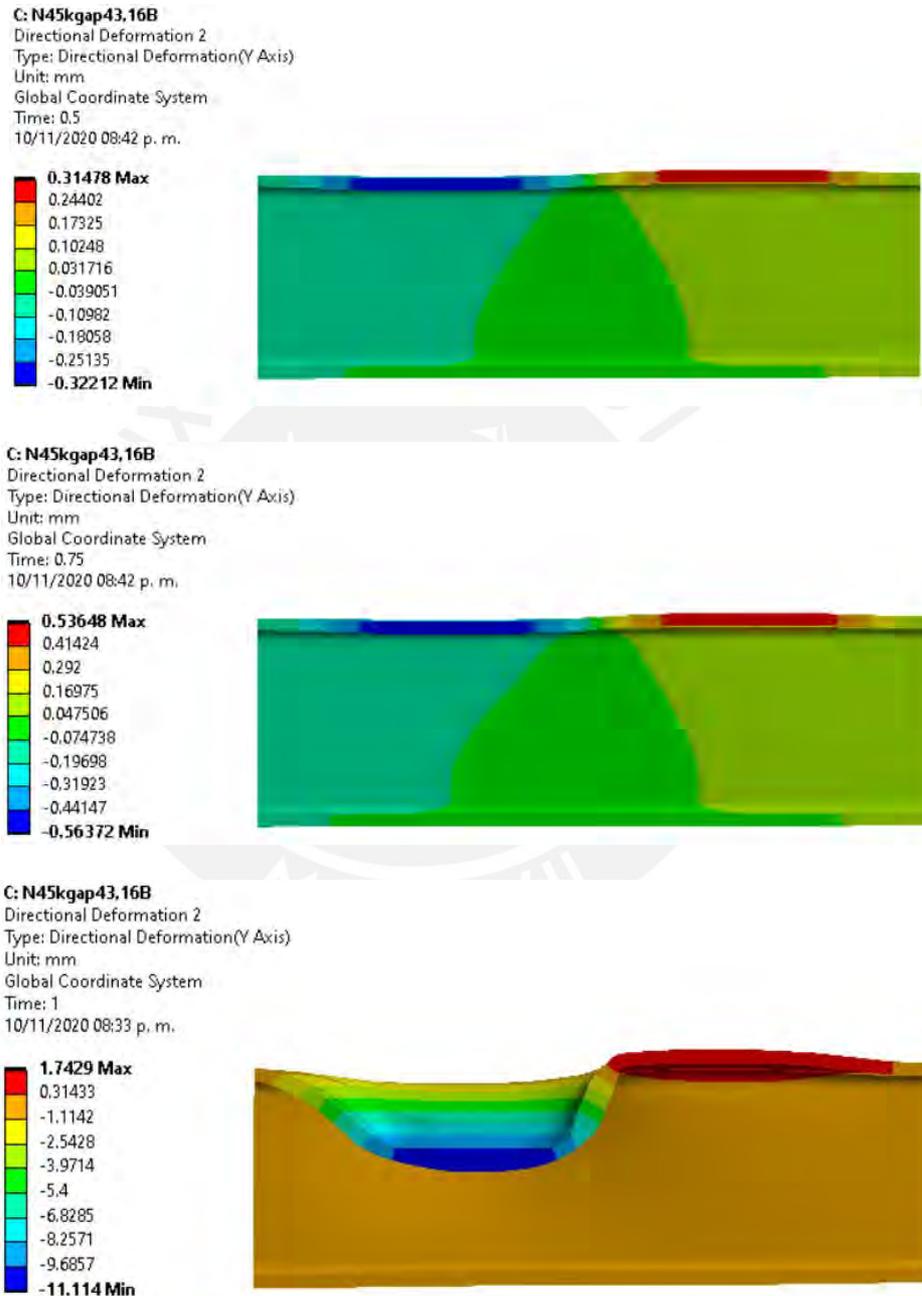
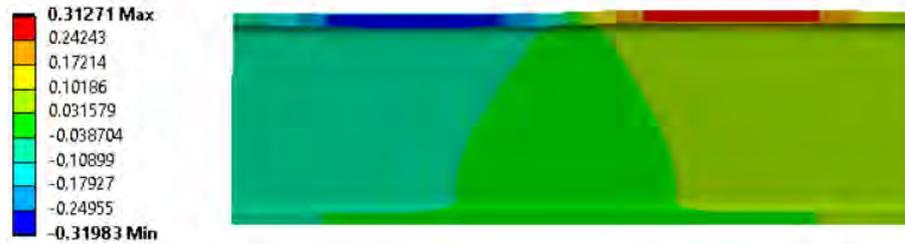
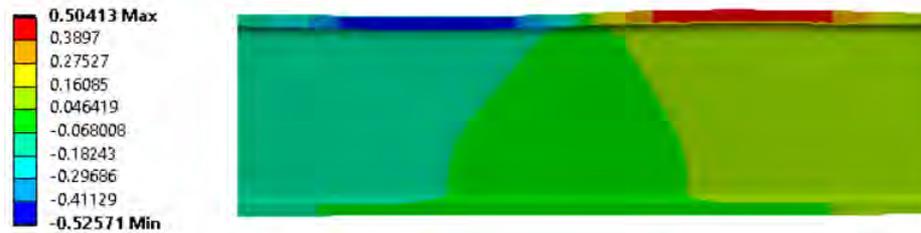


Figura D-17. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap43.16B.  
 Fuente propia.

**D: N45kgap43.16C**  
 Directional Deformation 2  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 0.5  
 10/11/2020 08:46 p. m.



**D: N45kgap43.16C**  
 Directional Deformation 2  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 0.75  
 10/11/2020 08:47 p. m.



**D: N45kgap43.16C**  
 Directional Deformation 2  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 1  
 10/11/2020 08:45 p. m.

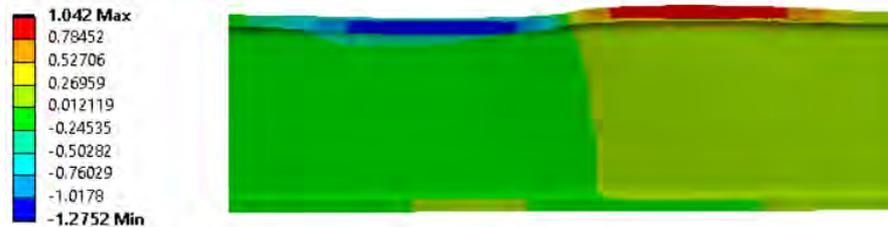


Figura D-18. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap43.16C.  
 Fuente propia.

En la Figura D-19 se muestra la deformación de la brida para la unión con el material ASTM A500 Gr. B y en la Figura D-20 la deformación de la brida para el material ASTM A500 Gr. C.

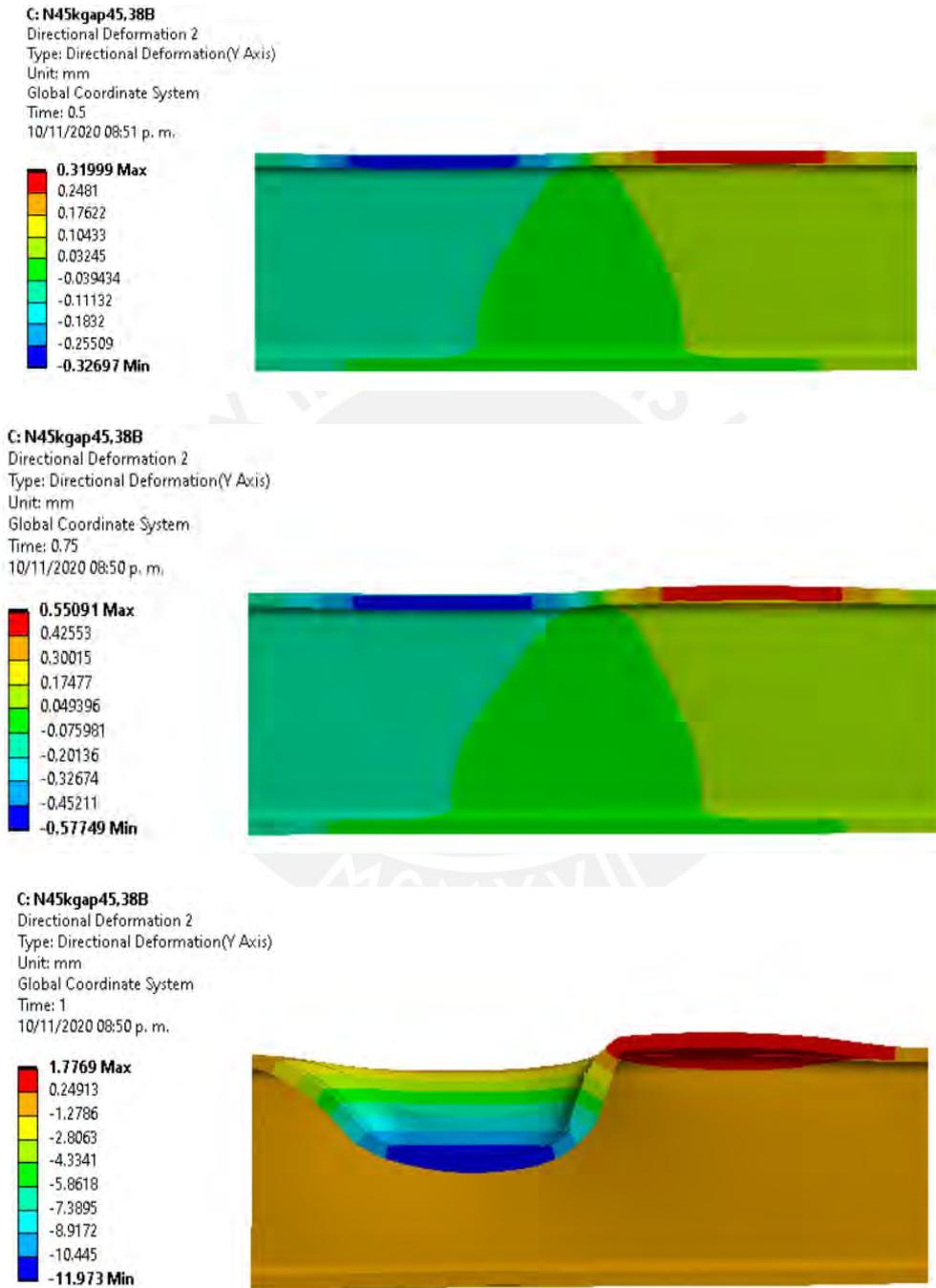
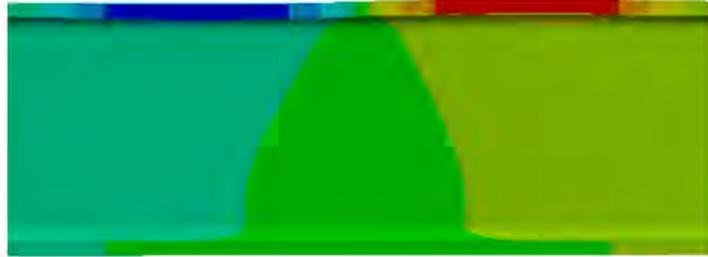
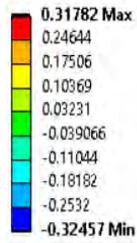
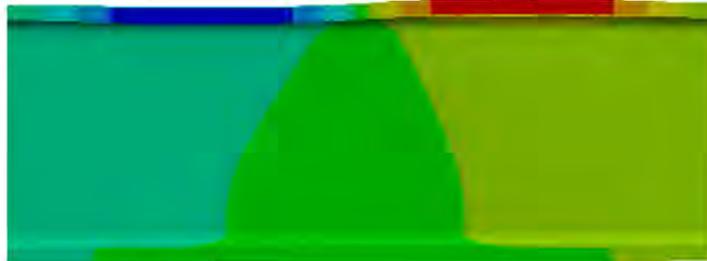
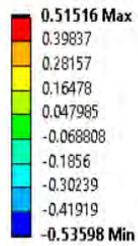


Figura D-19. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap45.38B.  
 Fuente propia.

**D: N45kgap45.38C**  
 Directional Deformation 2  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 0.5  
 10/11/2020 08:56 p. m.



**D: N45kgap45.38C**  
 Directional Deformation 2  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 0.75  
 10/11/2020 08:55 p. m.



**D: N45kgap45.38C**  
 Directional Deformation 2  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 1  
 10/11/2020 08:55 p. m.

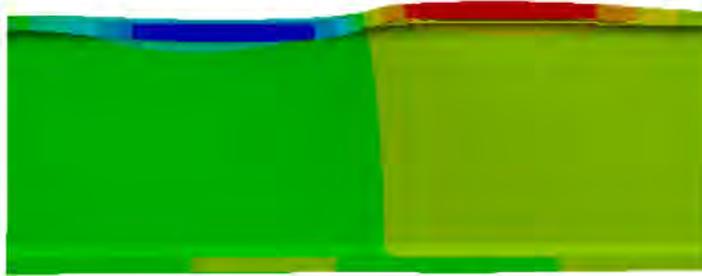
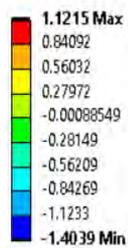


Figura D-20. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap45.38C.  
 Fuente propia.

En la Figura D-21 se muestra la deformación de la brida para la unión con el material ASTM A500 Gr. B y en la Figura D-22 la deformación de la brida para el material ASTM A500 Gr. C.

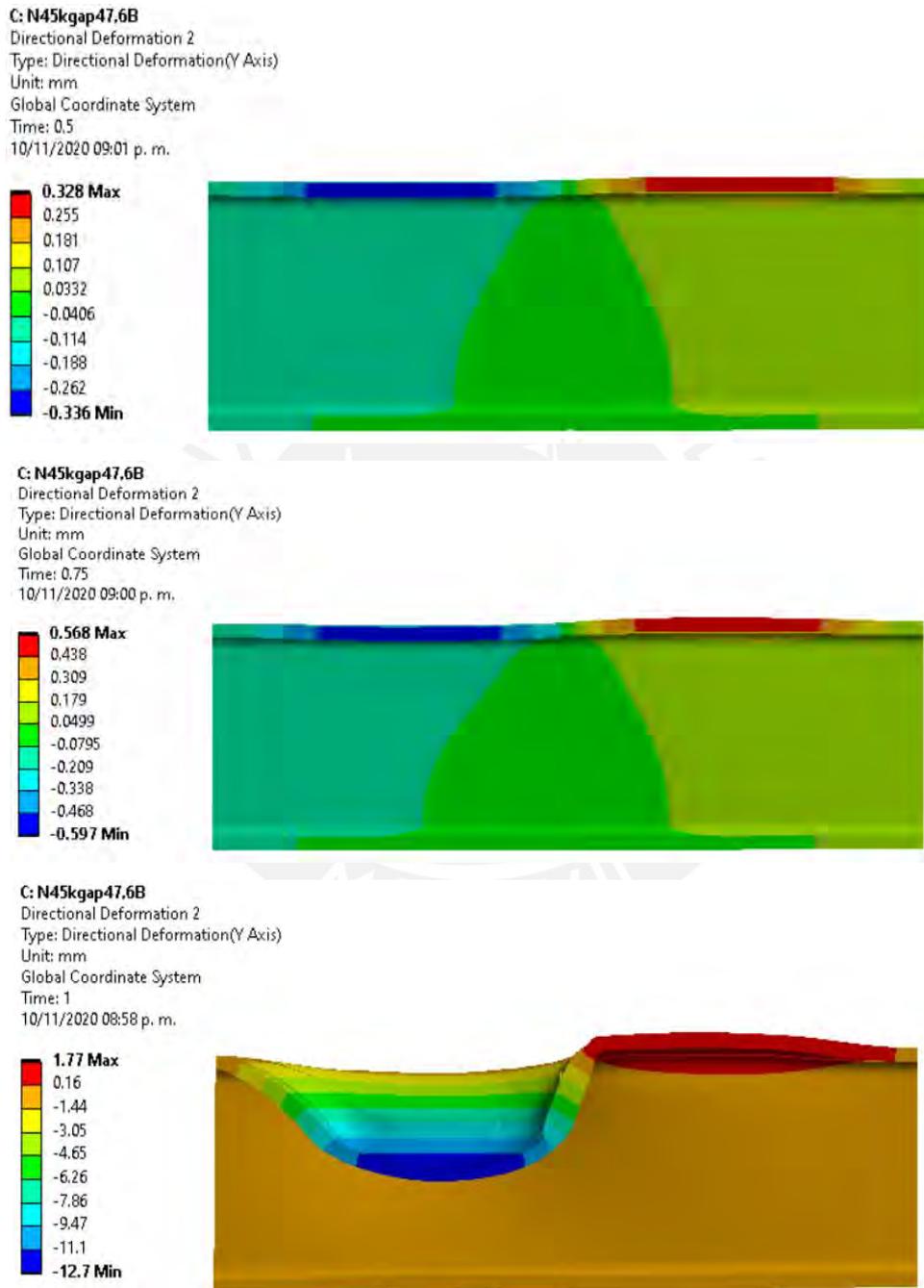
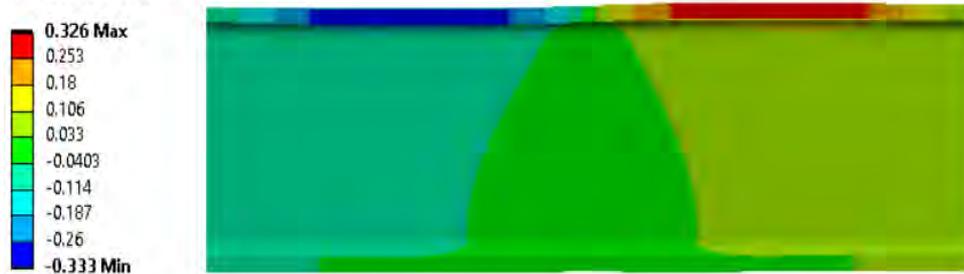
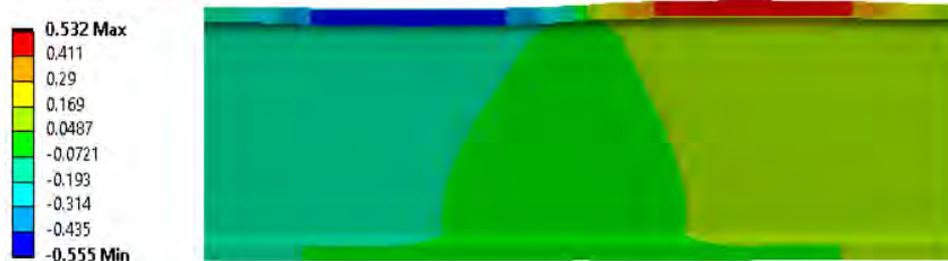


Figura D-21. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap47.6B.  
 Fuente propia.

**D: N45kgap47.6C**  
Directional Deformation 2  
Type: Directional Deformation(Y Axis)  
Unit: mm  
Global Coordinate System  
Time: 0.5  
10/11/2020 09:05 p. m.



**D: N45kgap47.6C**  
Directional Deformation 2  
Type: Directional Deformation(Y Axis)  
Unit: mm  
Global Coordinate System  
Time: 0.75  
10/11/2020 09:04 p. m.



**D: N45kgap47.6C**  
Directional Deformation 2  
Type: Directional Deformation(Y Axis)  
Unit: mm  
Global Coordinate System  
Time: 1  
10/11/2020 09:03 p. m.

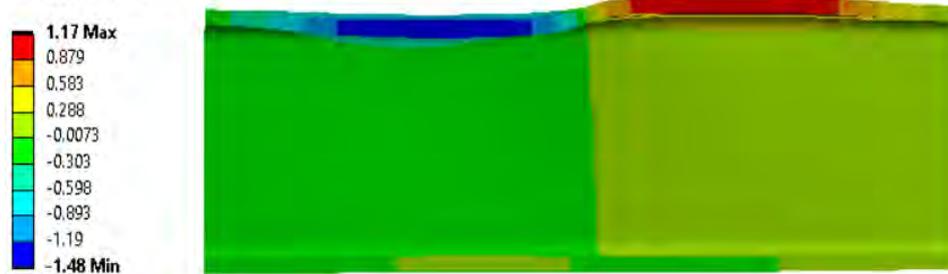


Figura D-22. Deformación del cordón sometido a cargas en los tiempos 0.5, 0.75 y 1 con escala x5 para unión N45kgap47.6C.  
Fuente propia.