



# COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE FISURAS SUJETAS A UN ESTADO BIAxIAL DE ESFUERZOS EN PLACAS DE ALUMINIO 3003

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA  
PRESENTA

ING. AGUSTÍN ÁNGELES LEYVA

DIRECTOR:  
DR. LUÍS MANUEL PALACIOS PINEDA

SINODALES:  
DR. IGNACIO RAMÍREZ VARGAS  
DR. MARIO EMIGDIO RODRÍGUEZ CASTILLO

Pachuca de Soto, Hgo. Septiembre 2023  
144 páginas



Carretera México – Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.  
Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399  
e-mail: [depi@pachuca.tecnm.mx](mailto:depi@pachuca.tecnm.mx) | [tecnm.mx](http://tecnm.mx)





Pachuca, Hidalgo, 13/Septiembre/2023  
OFICIO No. DEPI-00199-23

**C. ING. AGUSTÍN ÁNGELES LEYVA  
PRESENTE**

La que suscribe, jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica para examinar su Tesis:

Comportamiento mecánico de fisuras sujetas a un  
estado biaxial de esfuerzos en placas de Aluminio  
3003

se han reunido, y después de intercambiar opiniones manifiestan su aprobación de la Tesis, en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y, en consecuencia, se autoriza su impresión.

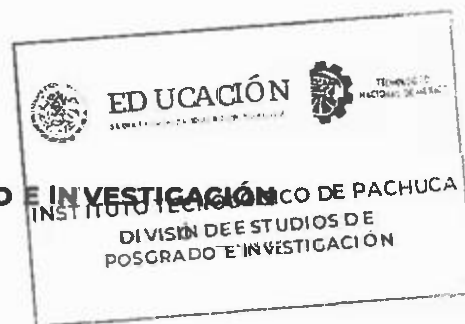
Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica®  
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia" ®*

**M. A. C. ELODIA CLAUDIA GUERRERO ORTIZ  
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

C.p. Archivo  
ECGO/LMPP



## Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica ACTA

Siendo las 13:00 horas del 17 de febrero de 2023, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: *Comportamiento mecánico de fisuras sujetas a un estado biaxial de esfuerzos en placas de Aluminio 3003*, con el siguiente contenido:



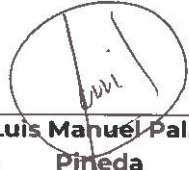






Capítulo I Introducción, Estado del arte, Marco teórico y Metodología  
Capítulo II Caracterización uniaxial del material  
Capítulo III Dispositivo de pruebas biaxiales  
Capítulo IV Geometría y preparación de la probeta  
Capítulo V Simulación numérica  
Capítulo VI Pruebas experimentales  
Conclusiones

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. Agustín Ángeles Leyva obtenga el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Luis Manuel Palacios Pineda.

### ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica

"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"

 Dr. Ignacio Ramírez Vargas	 Dr. Juan Serrano Arellano	 Dr. Luis Manuel Palacios Pineda
 Dra. Erika Osiris Ayala Dávila	 Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas	 Dra. Marisa Moreno Ríos
 Dr. Armando Irvin Martínez Pérez	 Dr. Francisco Noe Demesa López	 Dr. Hugo Francisco Abundis Fong



## Dedicatorias

Estoy convencido que el amor es un concepto con mucho poder que permite lograr lo impensable, por eso dedico todo el esfuerzo, entrega y dedicación realizada en este trabajo a todos aquellos que me han dado su apoyo, interés, compañía y cariño, este es un breve espacio donde puedo expresar mi completa admiración, gratitud y amor a todos ellos.

Comenzando con mis padres quienes han sido determinantes en mi formación, quienes me entregaron valores, motivos y todo su amor, la mejor herencia posible, a mi hermano que durante toda la vida ha sido una figura importante a quien seguir, a toda mi familia, quienes cuando lo lean sabrán que tengo tanto que agradecerles ya que siempre han estado ahí, siempre pendientes, escuchándome, aconsejándome y cuidándome.

También lo dedico a todos aquellos profesores, catedráticos, quienes independientemente de mi admiración intelectual que les pueda ofrecer, les otorgo mi gratitud, ya que han sido un ejemplo de calidez y calidad humana, ellos, a quienes en cada una de mis etapas educativas de formación he tenido la bendición de encontrar, les reconozco el gran trabajo que han realizado.

Los amigos que he encontrado a lo largo de mis vivencias, pocos, pero siempre tan importantes, siendo muchas veces un aliciente para no desistir, una excusa para continuar.

Dedico parte de esta tinta marcada en el papel a mi recién nacida sobrina, quien se ha convertido en uno de los principales motivos para superarnos en todo momento.

Dedico un pedazo de esta muestra de esfuerzo e interés a mis pequeños Dingo y Roy que, aunque no leerán esto, han sido inspiración a mis ganas de seguir adelante.

También dedico este logro y los futuros por realizar a la memoria de quienes me brindaron su apoyo y amor en todo momento.



## **Agradecimientos**

Manifiesto mi agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, CONAHCyT, por el apoyo económico recibido el cual fue de gran importancia para la adecuada atención al estudio de posgrado realizado.

Agradezco al Consejo de Posgrado del Instituto Tecnológico de Pachuca por permitirme realizar mis estudios en esta casa de estudios de excelente calidad.

Agradezco y otorgo mi reconocimiento al Dr. Luis Manuel Palacios Pineda quien a lo largo de este periodo siempre ha estado al pendiente en la pulcritud y constancia del trabajo, apoyando, motivando y asesorando, previendo las herramientas y gestionando los recursos necesarios.

Agradezco a el Dr. Ignacio Ramírez Vargas y al Dr. Mario Emigdio Rodríguez Castillo por su apoyo, disposición e interés, así también extendiendo mi agradecimiento al tan capaz cuerpo docente del departamento de posgrado, sus cátedras y enseñanzas fueron fundamentales para el desarrollo integral en este grado.

Agradezco al apoyo siempre recibido y brindado por la Ing. Ana María García Mercado y el Mtro. Alberto Hernández Morales para el uso del área de laboratorio de Mecánica.

Agradezco al Tecnológico de Monterrey Campus Monterrey, por el apoyo en el uso de sus instalaciones para la realización pruebas.

Agradezco a los compañeros quienes me apoyaron en el montaje del equipo para la realización de las pruebas y grabación de las mismas.

## Índice general

<b>Índice de figuras .....</b>	<b>VI</b>
<b>Índice de tablas .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>XIV</b>
<b>Capítulo I Introducción, Estado del arte, Marco teórico y Metodología .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	1
1.2 Estado del arte.....	2
1.3 Marco teórico .....	4
1.3.1 Mecánica de la fractura .....	4
1.3.2 Modos de grieta .....	4
1.3.3 Factor de intensidad .....	5
1.3.4 Ecuaciones de los esfuerzos para cada uno de los modos .....	6
1.3.5 Tenacidad a la fractura de deformación plana .....	7
1.3.6 Método de elemento finito.....	7
1.3.7 Geometrías del elemento .....	8
1.3.8 Generación de la malla .....	8
1.3.9 Condiciones de frontera.....	9
1.3.10 Correlación de imágenes digitales .....	9
1.3.11 Procesamiento de correlación de imágenes digitales .....	9
1.4 Metodología .....	11
1.4.1 Generalidades de la metodología.....	11
1.4.2 Metodología para el diseño de la probeta.....	11
1.4.3 Metodología experimental .....	13
<b>Capítulo II Caracterización uniaxial del material.....</b>	<b>14</b>
2.1 Preparación de las probetas para las pruebas uniaxiales.....	14
2.1.1 Proceso de manufactura .....	14
2.1.2 Proceso de limpieza .....	14
2.1.3 Proceso de pintura.....	15
2.2 Caracterización del aluminio 3003.....	15
2.2.1 Pruebas uniaxiales .....	15

2.2.2 Procesamiento en GOM correlate .....	15
2.2.3 Nomenclatura de las probetas uniaxiales.....	21
2.2.4 Creación de graficas esfuerzo-deformación .....	21
2.2.5 Refinamiento de graficas esfuerzo deformación.....	24
2.2.6 Obtención de propiedades mecánicas.....	24
2.2.7 Elección de curva esfuerzo deformación característica.....	26
<b>Capitulo III Dispositivo de pruebas biaxiales.....</b>	<b>29</b>
3.1 Carga máxima soportada por el dispositivo biaxial de esfuerzos.....	29
3.2 Diseño del acoplamiento del dispositivo biaxial - máquina universal .....	31
3.2.1 Esquema entre sistemas a acoplar .....	31
3.2.2 Condiciones de frontera y diseño .....	32
3.2.3 Fabricación de elementos de acoplamiento entre el dispositivo de ensayos biaxiales y la maquina universal de pruebas.....	37
<b>Capitulo IV Geometría y preparación de la probeta.....</b>	<b>38</b>
4.1 Elección geométrica de la probeta considerando aluminio 6061-T6 .....	38
4.1.1 Aluminio 6061-T6.....	38
4.1.2 Propuestas geométricas.....	39
4.1.3 Análisis elástico y plástico.....	40
4.1.4 Análisis de deformación plástica sin fisura en la geometría seleccionada .....	41
4.1.5 Creación de geometría cruciforme con comentarios usando el comando CINT .....	42
4.1.6 Análisis de fuerza aplicable a probeta con fisura central a 45° .....	50
4.1.7 Distribución del material en una plancha de lámina con medidas de 3' x 8' .....	57
4.1.8 Manufactura de las probetas.....	58
4.1.9 Moteado de probetas biaxiales .....	59
<b>Capitulo V Simulación numérica.....</b>	<b>63</b>
5.1 Análisis de probeta sin fisura.....	63
5.2 Evolución de la deformación plástica por simulación numérica .....	68
<b>Capítulo VI Pruebas experimentales.....</b>	<b>74</b>
6.1 Caracterización geométrica de las probetas.....	74
6.2 Procedimiento para la ejecución y documentación de las pruebas biaxiales .....	76

6.3 Procedimiento para la segmentación de los videos en imágenes usando VLC y preparación de imágenes para procesarlas en GOM correlate.....	78
6.4 Procesamiento de pruebas biaxiales a través de GOM correlate .....	80
6.5 Análisis de probetas biaxiales que no fueron concluyentes al fallo inducido por intensificador de esfuerzo.....	83
6.6 Evolución de la deformación plástica por pruebas experimentales.....	85
<b>Conclusiones .....</b>	<b>94</b>
Discusión .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>Referencias.....</b>	<b>95</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>98</b>
Anexo A: Datos técnicos de elementos que constituyen la fabricación del dispositivo pruebas biaxiales .....	98
Anexo B: Dibujos de detalle de sistema de acoplamiento entre Dispositivo de pruebas biaxiales y maquina universal de ensayos.....	100
Anexo C: Dibujos de detalle de probeta de geometría seleccionada para pruebas experimentales uniaxiales .....	109
Anexo D: Dibujos de detalle de probeta de geometría seleccionada para pruebas experimentales.....	110
Anexo E: Datos técnicos en factura de material .....	111
Anexo F: Procedimiento para la creación geométrica en APDL (Por sus siglas en ingles “ANSYS PARAMETRIC DESIGN LANGUAGE”).....	112
Anexo G: Código en APDL para la simulación de probeta biaxial elegida para pruebas experimentales.....	115
Anexo H: Código en MATLAB para el suavizado de curvas experimentales .....	124

## Índice de figuras

Figura 1. Modos de propagación de grieta [1]. .....	4
Figura 2. Fisura de longitud. $2 * a$ en una placa infinita .....	5
Figura 3. Fisura de longitud. $2 * a$ en una placa infinita .....	6
Figura 4. Modelo de elemento finito cerca del frente de la grieta [18]. .....	7
Figura 5. Matriz de referencia [28]. .....	10
Figura 6. Matriz deformada [28] .....	10
Figura 7. Proceso para la obtención geométrica de la probeta. ....	11
Figura 8. Proceso para la obtención geométrica de la probeta. ....	11
Figura 9. Metodología para la realización de pruebas experimentales .....	13
Figura 10. Simbología de medidas de probeta uniaxial ASTM E8M .....	14
Figura 11. Nomenclatura y secuencial de las imágenes a procesar.....	16
Figura 12. Ventana emergente para importación de archivos .....	16
Figura 13. Definición de escala .....	17
Figura 14. Ajuste de parámetros a la creación de componente de superficie.....	18
Figura 15. Creación de sistemas de coordenadas .....	18
Figura 16. Parámetros a obtener .....	19
Figura 17. Etiqueta de desviación.....	20
Figura 18. Grafica deformación / fotograma .....	20
Figura 19. Graficas de pruebas uniaxiales.....	22
Figura 20. Graficas de pruebas uniaxiales suavizadas. ....	23
Figura 21. Comparación de grafica suavizada y sin suavizar.....	23
Figura 22. Selección de graficas a promediar.....	24
Figura 23. Grafica esfuerzo-deformación de prueba UAD2P10 .....	24
Figura 24. Obtención de la ecuación de la pendiente .....	25

Figura 25. Esfuerzo de cedencia al 0.2% de deformación.....	25
Figura 26. Esfuerzo máximo y esfuerzo último. ....	26
Figura 27. Curvas esfuerzo-deformación de pruebas seleccionadas. ....	27
Figura 28. Curvas esfuerzo-deformación de prueba UAD2P10.....	28
Figura 29. Curva del límite de cedencia al esfuerzo último. ....	28
Figura 30. Esquema simplificado del dispositivo biaxial.....	29
Figura 31. Esfuerzos presentes en sección crítica del perfil.....	30
Figura 32. Esquema de maquina universal y dispositivo biaxial de esfuerzos ....	31
Figura 33. Discretización del acoplamiento para zona inferior.....	32
Figura 34. Condiciones de frontera del acoplamiento para zona inferior. ....	33
Figura 35. Esfuerzos bajo carga de 2700 N. a) Perno de maquina universal, b) Tornillo de ¾” A325, c) Placa acoplamiento 1, d) Placa acoplamiento 2 .....	33
Figura 36. Esfuerzos bajo carga de 2700 N. en sistema de acoplamiento para dispositivo biaxial de esfuerzos a celda de carga.....	34
Figura 37. Esfuerzos bajo carga de 2700 N. en sistema de acoplamiento para dispositivo celda de carga a máquina de ensayos universal.....	34
Figura 38. Esfuerzos bajo carga de 2700 N. en sistema de acoplamiento directo entre maquina y dispositivo. a) Eslabón, b) Tornillo estructural .....	35
Figura 39. Esfuerzos bajo carga de 2700 N. en sistema de acoplamiento entre dispositivo de esfuerzos biaxial y celda de carga. a) Acoplamiento completo, b) Bastidor del acoplamiento ....	36
Figura 40. Esfuerzos bajo carga de 2700 N. en sistema de acoplamiento entre celda de carga y máquina universal.....	36
Figura 41. Esquema del dispositivo biaxial acoplado a la maquina universal. ....	37
Figura 42. Esfuerzo-Deformación (reales) de aluminio 6061-T6. ....	38
Figura 43. Geometría cruciforme. a) Probeta con reducción en zona de los brazos de la probeta,39	
Figura 44. Distribución de esfuerzos. a) Fuerza aplicada de 960 N en configuración “A”, .....	40

Figura 45. Evolución de la deformación plástica en probeta cruciforme.....	41
Figura 46. Nodos perimetrales de geometría.....	42
Figura 47. Líneas de perímetro exterior .....	44
Figura 48. Líneas intermedias de la geometría.....	45
Figura 49. Nodos de la grieta.....	45
Figura 50. Líneas centrales y líneas de grieta.....	46
Figura 51. Áreas de discretización .....	46
Figura 52. Geometría mallada .....	47
Figura 53. Condiciones de frontera .....	48
Figura 54. Representación de la grieta .....	49
Figura 55. Distribución de esfuerzos en probeta cruciforme, caso 1. ....	50
Figura 56. Distribución de esfuerzos en probeta cruciforme, caso 2. ....	50
Figura 57. Distribución de esfuerzos en probeta cruciforme, caso 3. ....	51
Figura 58. Distribución de esfuerzos en probeta cruciforme, caso 4. ....	51
Figura 59. Distribución de esfuerzos en probeta cruciforme, caso 5. ....	52
Figura 60. Distribución de esfuerzos en probeta cruciforme, caso 6. ....	52
Figura 61. Distribución de esfuerzos en probeta cruciforme, caso 7. ....	53
Figura 62. Gráfico de las curvas de valor de intensificador de esfuerzo al variar el radio del perímetro de la probeta.....	53
Figura 63. Comparación de procesos para Intensificador de esfuerzo (modo I) en grietas con longitud inicial de 5 mm.....	54
Figura 64. Comparación de procesos para Intensificador de esfuerzo (modo II) en grietas con longitud inicial de 5 mm.....	54
Figura 65. Intensificador de esfuerzo (modo I) en grietas orientadas con $\alpha=45^\circ$ & $\alpha=22.5^\circ$ .....	55
Figura 66. Intensificador de esfuerzo (modo II) en grieta orientada a) $\alpha=45^\circ$ , b) $\alpha=22.5^\circ$ .....	55
Figura 67. Intensificador de esfuerzo (modo I) en grieta con diferentes longitudes iniciales.....	56



Figura 68. Intensificador de esfuerzo (modo II) en grieta con diferentes longitudes iniciales .....	56
Figura 69. Distribución de probetas en lámina de 914 mm por 2 440 mm. ....	58
Figura 70 Ensayo de corte para evaluar la muesca (fisura).....	58
Figura 71. Importación del CAD a máquina CNC .....	58
Figura 72. Probeta con fisura a 20° .....	59
Figura 73. Probeta con fisura a 20° limada y lijada .....	60
Figura 74. Probeta con fisura a 20° con extremos protegidos .....	60
Figura 75. Probeta con fisura a 20° con base de esmalte negro mate .....	61
Figura 76. Probeta con fisura a 20° con moteado en color blanco mate .....	61
Figura 77. Probeta con fisura a 20° marcada con nomenclatura correspondiente.....	62
Figura 78. Esquema de condiciones de frontera.....	64
Figura 79. Esquema de condiciones de frontera.....	64
Figura 80. Relación de fuerzas en dispositivo biaxial. ....	65
Figura 81. Esquema de condiciones de frontera en rango plástico .....	65
Figura 82. Esfuerzos equivalentes en probeta analizada en rango plástico.....	66
Figura 83. Transición de la deformación elástica en plástica.....	66
Figura 84. Comportamiento del intensificador de esfuerzo modo II.....	67
Figura 85. Comportamiento del intensificador de esfuerzo modo I.....	67
Figura 86. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 0°, en la fuerza; a) 89 kg, b) 127 kg, c) 141 kg, d) 153 kg, e) 164 kg, f) 183 kg, g) 230 kg, h) 238 kg, i) 245 kg. ....	68
Figura 87. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 10°, en la fuerza; a) 91 kg, b) 128 kg, c) 141 kg, d) 161 kg, e) 168 kg, f) 186 kg, g) 228 kg, h) 239 kg, i) 243 kg. ....	69

Figura 88. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 5°, en la fuerza; a) 89 kg, b) 130 kg, c) 144 kg, d) 154 kg, e) 167 kg, f) 183 kg, g) 224 kg, h) 239 kg, i) 244 kg .....	69
Figura 89. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 20°, en la fuerza; a) 99 kg, b) 126 kg, c) 144 kg, d) 159 kg, e) 169 kg, f) 184 kg, g) 228 kg, h) 237 kg, i) 240 kg. ....	70
Figura 90. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 15°, en la fuerza; a) 86 kg, b) 126 kg, c) 144 kg, d) 152 kg, e) 169 kg, f) 184 kg, g) 227 kg, h) 238 kg, i) 242 kg. ....	70
Figura 91. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 30°, en la fuerza; a) 99 kg, b) 126 kg, c) 142 kg, d) 157 kg, e) 162 kg, f) 183 kg, g) 230 kg, h) 236 kg, i) 238 kg. ....	71
Figura 92. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 25°, en la fuerza; a) 90 kg, b) 125 kg, c) 142 kg, d) 159 kg, e) 170 kg, f) 190 kg, g) 231 kg, h) 238 kg, i) 239 kg. ....	71
Figura 93. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 40°, en la fuerza; a) 81 kg, b) 125 kg, c) 145 kg, d) 156 kg, e) 178 kg, f) 189 kg, g) 229 kg, h) 233 kg, i) 235 kg. ....	72
Figura 94. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 35°, en la fuerza; a) 81 kg, b) 127 kg, c) 147 kg, d) 159 kg, e) 166 kg, f) 199 kg, g) 223 kg, h) 233 kg, i) 237 kg. ....	72
Figura 95. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 45°, en la fuerza; a) 85 kg, b) 125 kg, c) 144 kg, d) 153 kg, e) 171 kg, f) 181 kg, g) 218 kg, h) 230 kg, i) 233 kg. ....	73
Figura 96. Grafica de fuerza máxima aplicada para las diferentes orientaciones de las fisuras. ..	73
Figura 97. Calibración de la cámara.....	74
Figura 98. Medición en microscopio.....	74
Figura 99. Medición en microscopio.....	74
Figura 100. Esquema y distribución de puntos a medir .....	75

Figura 101. Medidas en los puntos indicados de la prueba 5E de las probetas de aluminio.....	76
Figura 102. Ventana de opciones de preferencias simples.....	79
Figura 103. Ventana de opciones de preferencias avanzadas.....	79
Figura 104. Inicio de prueba biaxial.....	81
Figura 105. Prueba biaxial analizada en GOM correlate.....	81
Figura 106. Prueba biaxial analizada en GOM correlate con acercamiento digital, evolución de la deformación durante la prueba. ....	82
Figura 107. Grafica correspondiente a la prueba biaxial de la probeta EL35AL03.....	83
Figura 108. Medición de probetas ensayadas.....	84
Figura 109. Calibración de cámara.....	84
Figura 110. Imagen microscópica de frente de grieta en probeta con falla en brazo.....	84
Figura 111. Relación de pruebas falladas en la fisura respecto a las pruebas ensayadas.....	85
Figura 112. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 15°, prueba EL15AL07, en la fuerza; a) 0 kg, b) 62 kg, c) 93 kg, d) 124 kg, e) 155 kg, f) 186 kg, g) 217 kg, h) 230 kg, i) 238 kg. ....	86
Figura 113. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 20°, prueba EL20AL04, en la fuerza; a) 0 kg, b) 62 kg, c) 93 kg, d) 124 kg, e) 155 kg, f) 186 kg, g) 217 kg, h) 230 kg, i) 241 kg. ....	87
Figura 114. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 25°, prueba EL25AL06, en la fuerza; a) 0 kg, b) 62 kg, c) 93 kg, d) 124 kg, e) 155 kg, f) 186 kg, g) 217 kg, h) 230 kg, i) 241 kg. ....	88
Figura 115. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 30°, prueba EL30AL06, en la fuerza; a) 0 kg, b) 62 kg, c) 93 kg, d) 124 kg, e) 155 kg, f) 186 kg, g) 217 kg, h) 230 kg, i) 240 kg. ....	89
Figura 116. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 35°, prueba EL35AL07, en la fuerza; a) 0 kg, b) 62 kg, c) 93 kg, d) 124 kg, e) 155 kg, f) 186 kg, g) 217 kg, h) 230 kg, i) 239 kg. ....	90

---

Figura 117. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 40°, prueba EL40AL06, en la fuerza; a) 0 kg, b) 62 kg, c) 93 kg, d) 124 kg, e) 155 kg, f) 186 kg, g) 217 kg, h) 230 kg, i) 238 kg. ....	91
Figura 118. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 20°, prueba EL45AL07, en la fuerza; a) 0 kg, b) 62 kg, c) 93 kg, d) 124 kg, e) 155 kg, f) 186 kg, g) 217 kg, h) 230 kg, i) 238 kg. ....	92
Figura 119. Comparación de fuerza máxima entre pruebas numéricas y experimentales. ....	93
Figura 120. Error relativo en la diferencia de fuerzas máximas entre pruebas numéricas y experimentales. ....	93

## Índice de tablas

Tabla 1 Geometrías de modelo de superficie [27].....	8
Tabla 2 Análisis de ventajas y desventajas [18]. .....	9
Tabla 3. Propiedades mecánicas de pruebas uniaxiales. ....	26
Tabla 4. Comparación de las curvas esfuerzo deformación de pruebas seleccionadas. ....	27
Tabla 5. Análisis de fuerza máxima permisible en probeta.....	41
Tabla 6. Cuantificación de probetas a ensayar. ....	57
Tabla 7. Propiedades mecánicas del aluminio 3003.....	63
Tabla 8. Caracterización de fisuras.....	75
Tabla 9. Datos de deformación y esfuerzo presentes en la evolución de la prueba biaxial .....	83

## Resumen

En este trabajo se obtiene, a través de la simulación numérica, la evolución de los intensificadores de esfuerzos en fisuras sujetas a una condición multiaxial de esfuerzos. Se ha determinado la geometría de la probeta que permite tener una fisura sujeta a una condición de carga equiaxial la cual alcanzara los valores críticos que permiten que la grieta crezca abruptamente. Así mismo, mediante la aplicación de la mecánica de la fractura lineal elástica se ha determinado la influencia del modo I en el crecimiento de la fisura. Por último, se ha podido observar que para la fisura ubicada a  $45^\circ$  se presenta el mayor valor del intensificador de esfuerzos del modo I, mientras que el modo II (deslizamiento) alcanza su mayor valor cerca de los  $22.5^\circ$ .

Palabras Clave: Simulación numérica, condición multiaxial, intensidad de esfuerzos

## Abstract

In this work, the evolution of the stress intensifiers in cracks oriented in different positions in to a multiaxial stress condition is obtained through numerical simulation. It has been determined the geometry of the specimen that allows to have a crack subject to an equiaxial load condition which will reach the critical values that allow the crack to grow abruptly, likewise and through the application of linear elastic fracture mechanics it has been was able to confirm that the influence of stress intensity mode I (opening) continues to dominate despite the biaxial state to which the crack is subject. Finally, it has been observed that for the crack located at  $45^\circ$ , the highest value of the mode I stress intensifier is presented, while mode II (slip) reaches its highest value near  $22.5^\circ$ .

Keywords: numerical simulation, multiaxial condition, stress intensifiers

## **Capítulo I Introducción, Estado del arte, Marco teórico y Metodología**

### **1.1 Introducción**

El concepto de diseño tolerante al daño, advierte la idea de que las grietas existen y pueden crecer durante el servicio. El enfoque se concentra en el crecimiento de la grieta hasta que este se vuelve crítico y la parte se retira del servicio [1,2].

El estudio del comportamiento de un material en una situación real de trabajo es de importancia central. Por esta razón, se busca reproducir en el laboratorio condiciones similares a las que se encuentran sujetos los componentes mecánicos. El estudio de fisuras sujetas a una condición biaxial de esfuerzos permite tener mejores elementos para evitar fallas catastróficas, lo que contribuye a la protección de la integridad personal y material.

El factor de intensidad de esfuerzos (SIF por sus siglas en inglés) es un parámetro importante para la vida estimada de un elemento con una grieta [3,4].

Expresar de manera gráfica y clara como; el tamaño inicial de grieta, así como su orientación, modifican el factor de intensidad de esfuerzos, permite entender que, bajo esfuerzos menores a los calculados, el sistema fallara.

Normalmente este tipo de ensayos se apoyan en el uso de herramientas computacionales que permiten tener un resultado acertado al calcular la influencia de los SIF [5-8], esto permite la variabilidad de condiciones iniciales, así como una vista preliminar a los inicios del estudio.

El método elegido para la realización de los ensayos computacionales en esta investigación es el Método de elemento Finito (MEF), el cual consiste en la discretización de un continuo de elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos, tal que las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo lo hacen también en los elementos.



## 1.2 Estado del arte

A continuación, se mencionan algunos de los trabajos más cercanamente notables a nuestro enfoque de interés en orden cronológico ascendente.

C. Calogero, *et al.* [9] Realizan una simulación numérica basada en el método de elemento de limite dual (aplicación de dos integrales de contorno diferentes) de un modelo sometido a cargas de fatiga con una fisura, el cual es comparado con la experimentación de un análisis bidimensional y tridimensional de un ensayo de fatiga, la propagación en el análisis en dos dimensiones se obtiene en un escenario daño generalizado (presencia de grietas por fatiga en múltiples puntos), para el estudio experimental se hace uso de galgas extensométricas, la simulación también incluye la propagación de las grietas a través del espesor.

R. Guzmán [10] Realiza un estudio numérico a partir de un software de Método de Elemento Finito (MEF) para determinar el valor de intensidad de esfuerzo sobre el frente de una grieta transversal ubicada en la superficie de una maquina rotatoria, variando la profundidad de la grieta respecto a la posición del frente.

M. Castillo, *et al.* [11] Mediante la simulación numérica presentan el comportamiento del campo de esfuerzos en los extremos de un agujero elíptico con variación de posiciones (horizontal y vertical) en una placa de Polimetilmetacrilato “Acrílico”, siendo sometida a un estado biaxial de esfuerzos.

A.A. Cruz-Cabrera, *et al.* [12] En este trabajo se introduce un método “robusto” para el procesamiento de correlación de imágenes y obtener la mayor cantidad de trayectorias que definan con mayor precisión el análisis de ensayos ingenieriles o científicos.

J.L. Cuevas [13] Estudia y expone la forma en la que los esfuerzos residuales (ER) generados en una región cercana del borde del orificio provocado en probetas de aluminio 6061-T6 influyen en el retraso del proceso de nucleación y crecimiento de la grieta en ensayos de fatiga aumentando en relación de entre 1.5 y 3 veces la vida de las probetas en comparativa de las que no presentan estos ER.

Del libro [14] dividido en capítulos por enfoques de artículos, tenemos que en el capítulo 8, F.Sur, *et al.* En su artículo “Speckle Image Rendering for DIC Performance Assessment” Proponen un algoritmo para la renderización de imágenes con un modelo geométrico clásico estocástico basado en la representación de moteado para la evaluación del rendimiento de la correlación de imágenes digitales.

J.E. Reséndiz [15] Mediante el uso del método experimental en un estado de esfuerzos uniaxial, mide el factor de intensidad de esfuerzos en placas de aluminio 6063 T5 que presentan una grieta transversal ubicada en posiciones; borde y centro a lo largo de la probeta, validando los resultados en un modelo matemático comparativo que usa el MEF.

E. M. Rodríguez, *et al.* [16] En su artículo, presenta el diseño de un dispositivo mecánico para la realización de pruebas biaxiales que tenga como complemento de análisis del ensayo el método de correlación de imágenes digitales, lo cual influye en la determinación del mismo, se imprime un modelo a escala (50%) para la realización de pruebas de funcionamiento y si aplica, realizar las mejoras al diseño.

D. Castillo [17] Muestra la evolución de los intensificadores de esfuerzos en una condición biaxial de esfuerzos en probetas cruciformes de un material polimérico, las cuales, presentan grietas en diferentes ángulos ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ , y  $45^\circ$ ), esto basado en la aplicación de un método experimental que usa una máquina de pruebas biaxiales en conjunto de la técnica de correlación de imágenes digitales o DIC (Digital Imagen Correlated) y en un método numérico que se apoya del MEF.

J.A. Moctezuma [18] En su trabajo, muestra la efectividad de la realización de pruebas biaxiales de un dispositivo para ensayos que genere esta condición de esfuerzos, teniendo de estos resultados la determinación de elección del diseño para la fabricación final de este dispositivo.

D.A. Viera [19] Compila literatura para la determinación de que sistemas básicos en común son necesarios agregados a las máquinas de ensayos, para la aplicación del método DIC para el estudio y obtención de resultados de estas pruebas.

## 1.3 Marco teórico

### 1.3.1 Mecánica de la fractura

La mecánica de la fractura es el estudio del comportamiento mecánico de los materiales agrietados, cuando los sólidos contienen defectos o grietas, las ecuaciones de campo no están completamente definidas por la teoría de la elasticidad ya que no considera el fenómeno de singularidad de tensión cerca de la punta de una grieta. La formación de grietas puede ser un complejo proceso de fractura, que depende en gran medida de la microestructura de un sólido cristalino o amorfo particular, una carga aplicada y un entorno [20,21]

El enfoque se concentra en el crecimiento de la grieta hasta que se vuelve crítico y la parte se retira del servicio. La herramienta de análisis es la mecánica de la fractura elástica lineal (MFEL) [1].

### 1.3.2 Modos de grieta

Existen tres modos de la propagación de la grieta, [1] [22-25] como se muestra en la figura 1. También pueden existir combinaciones de estos modos.

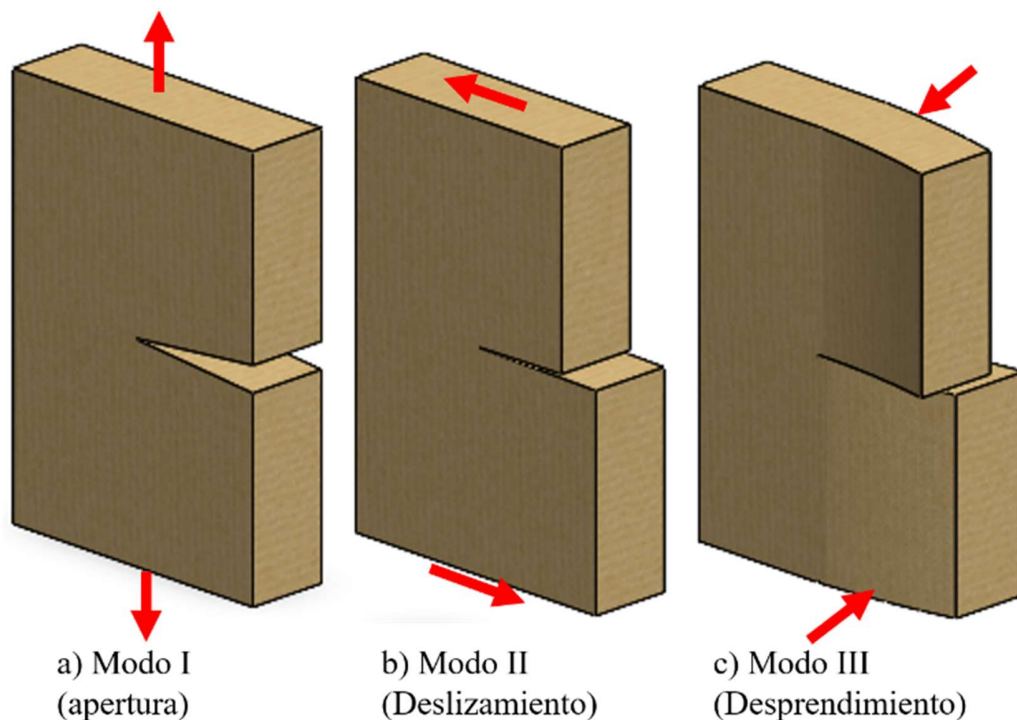


Figura 1. Modos de propagación de grieta [1].

### 1.3.3 Factor de intensidad

Este parámetro está en función de la geometría, el tamaño de la grieta y el tipo de carga, Para el modo I considerando una placa infinita con una grieta de longitud  $2 * a$ , se tiene que el factor de intensidad de esfuerzo esta dado por:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \dots (1)$$

Mientras que para el modo II en una placa infinita con una grieta de longitud  $2 * a$ , sujeta a un esfuerzo cortante plano  $\tau$ , tenemos que este factor esta dado por:

$$K_{II} = \tau\sqrt{\pi a} \dots (2)$$

La ecuación anterior es similar para el modo III, que considera una grieta de longitud  $2 * a$ , la cual ocupa valores de  $-a < x < a$  a lo largo del eje x en una placa infinita sujeta a un esfuerzo cortante infinito  $\tau$  fuera del plano. [1] [25,26]

$$K_{III} = \tau\sqrt{\pi a} \dots (3)$$

La descripción de una fisura de longitud  $2 * a$  en una placa infinita sometida a esfuerzos  $\sigma$  en el infinito se nota de una manera más clara en la figura 2. Mientras que su similar, pero para esfuerzos cortantes  $\tau$  se observa en la figura 3.

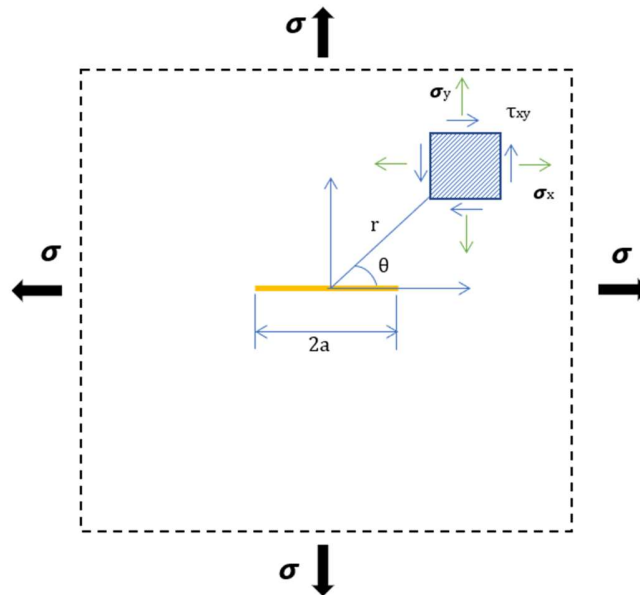


Figura 2. Fisura de longitud.  $2 * a$  en una placa infinita sujeta a un esfuerzo  $\sigma$  al infinito.

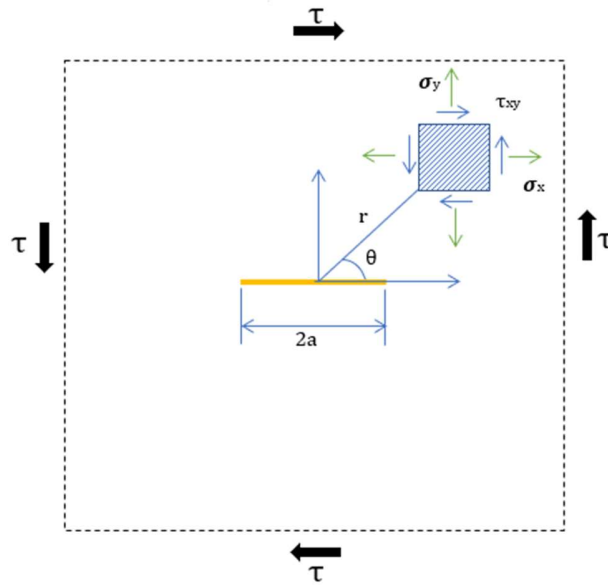


Figura 3. Fisura de longitud.  $2 * a$  en una placa infinita sujeta a un esfuerzo cortante  $\tau$  al infinito.

### 1.3.4 Ecuaciones de los esfuerzos para cada uno de los modos

Modo I (apertura). La carga es aplicada perpendicularmente al plano de la grieta y sus superficies se separan. Este es el modo de carga más común ya que se requiere una carga mínima para propagar la grieta.

$$\sigma_x = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \dots (4)$$

$$\sigma_y = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \dots (5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{k_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left( \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \dots (6)$$

Modo II (deslizamiento o modo cortante). Las cargas se aplican perpendicularmente al borde de la grieta. las superficies de fractura se deslizan una sobre la otra, generalmente se encuentra en combinación del modo I.

$$\sigma_x = -\frac{k_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \dots (7)$$

$$\sigma_y = \frac{k_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left( \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \dots (8)$$

$$\tau_{xy} = \frac{k_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \dots (9)$$

Modo III (desgarramiento). Las cargas se aplican paralelamente al borde de la grieta y las superficies de fractura se deslizan una sobre la otra y paralelas, este puede ser un problema de cortante puro involucrando una muesca en una barra de torsión.

$$\tau_{xz} = \frac{k_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \dots (10)$$

$$\tau_{yz} = \frac{k_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{cos} \frac{\theta}{2} \dots (11)$$

### 1.3.5 Tenacidad a la fractura de deformación plana

Cuando la magnitud del factor de intensidad del esfuerzo alcanza un valor crítico  $K_C$  se inicia la propagación de la grieta [1] [22,23] [26,27]

### 1.3.6 Método de elemento finito

El método consiste en la discretización de un continuo de elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos, tal que las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo lo hacen también en los elementos. Para obtener soluciones satisfactorias el tema con la discretización del cuerpo geométrico es relevante como se muestra en la figura 4.

La propagación de grietas es un excelente ejemplo en el que el uso de MEF requiere una gran cantidad de repeticiones del modelo de elementos finitos para representar rutas arbitrarias y complejas [18]

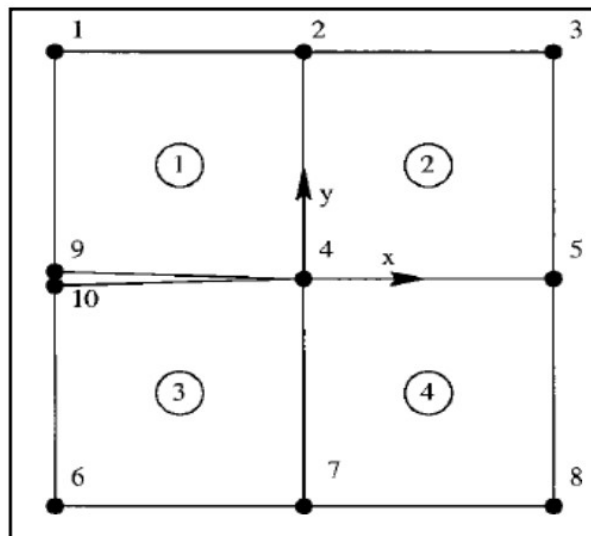


Figura 4. Modelo de elemento finito cerca del frente de la grieta [18].

### 1.3.7 Geometrías del elemento

Los elementos pueden ubicarse como: elementos de línea, superficie, sólidos y de propósito específico. La tabla 1. proporciona algunos de los ejemplos disponibles para el análisis de elemento finito de problemas estructurales en dos dimensiones.


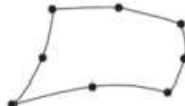


Tipo de elemento	Forma	Numero de nodos	Aplicación
Cuadrilátero de 4 nodos		4	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel a cortante, placa plana delgada en flexión
Cuadrilátero de 8 nodos		8	Esfuerzo o deformación plana, placa plana o cascarón en flexión
Superficie Triangular de 3 nodos		3	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel a cortante, placa plana delgada en flexión.
Triangular de 6 nodos		6	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, placa plana o cascarón en flexión.

Tabla 1 Geometrías de modelo de superficie [27]

### 1.3.8 Generación de la malla

La red de nodos y elementos que abarcan una región se nombra malla, su densidad se incrementa a medida que más elementos se colocan dentro de la región dada, el refinamiento de la misma ocurre cuando se modifica el tamaño de los elementos para converger en un resultado más preciso, este incremento de densidad se realiza en zonas de alto gradiente de esfuerzo. La convergencia del resultado se puede observar, cuando la cantidad de aumento de densidad en la malla no representa una variación tan grande en resultados.



### 1.3.9 Condiciones de frontera

La elección correcta en las condiciones al momento de transportar un modelo real a una simulación es definitiva para evitar soluciones que pronostiquen esfuerzos y deflexiones diferentes a las reales. Las ecuaciones de restricción de punto múltiple se emplean con bastante frecuencia para modelar condiciones de frontera o conexiones rígidas entre miembros elásticos.

### 1.3.10 Correlación de imágenes digitales

Es una técnica sin contacto la cual permite a partir de una grabación, procesar el video en imágenes digitales para poder medir los campos de desplazamientos y los campos de deformación unitaria. En la tabla 2. Podemos ver algunas ventajas y desventajas presentadas en la técnica.

Ventajas	Desventajas
Montaje sencillo	Dependencia a la calidad de la imagen
Versátil	Tiempo de preparación del espécimen.
Bajos requerimientos computacionales	Capacidad de los cuadros por segundo
Análisis en tiempo real	Distorsión de resultados

Tabla 2 Análisis de ventajas y desventajas [18].

### 1.3.11 Procesamiento de correlación de imágenes digitales

Se calcula el movimiento en cada uno de los puntos de las imágenes, comparando la imagen en estudio con la imagen de referencia. Para el cálculo del movimiento la imagen es dividida de forma uniforme en distintos conjuntos, generalmente llamados pixeles. Cada pixel será procesado para calcular el valor medio de la escala de grises existentes en cada uno de ellos y se buscará la misma faceta en la imagen deformada como se muestra en la figura 5 y 6 respectivamente.

El proceso se basa primeramente en la realización de una cuadrícula con puntos de control en una imagen de referencia o no deformada, luego se compara con la imagen deformada y se establecen los desplazamientos producidos en los ejes X y Y para la DIC de dos dimensiones. A través de vectores de posición.

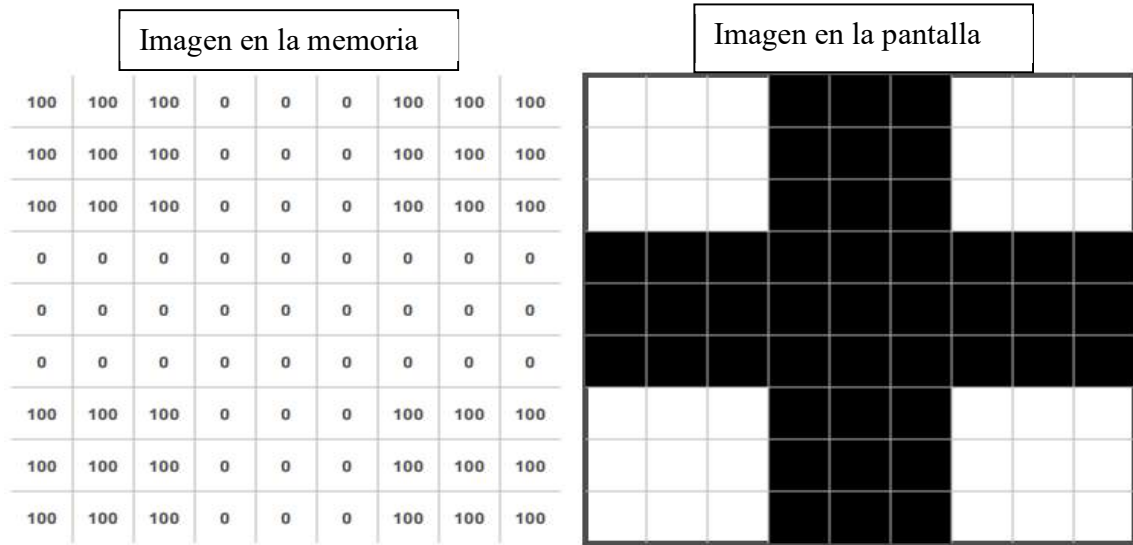


Figura 5. Matriz de referencia [28]



Figura 6. Matriz deformada [28]

Estos desplazamientos se pueden expresar en la siguiente ecuación.

$$C(x, y, u, v) = \sum_{i,j=n/2}^{n/2} [I(x + i, y + j) - I'(x + u + i, y + v + j)]^2 \dots (12)$$

Donde x,y son las coordenadas del pixel de referencia, u,v son el desplazamiento en la dirección X y Y respectivamente, n es el tamaño de pasos o cantidad de imágenes procesadas, I es la imagen antes del movimiento y I' la imagen después del movimiento.

## 1.4 Metodología

### 1.4.1 Generalidades de la metodología

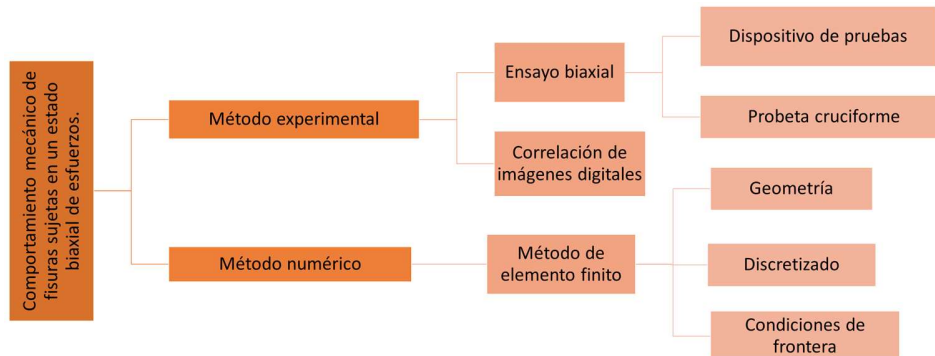


Figura 7. Proceso para la obtención geométrica

Se designa que se utilizarán los métodos experimental y numérico para investigación, por lo que se utilizarán de manera complementaria las herramientas tecnológicas y computacionales para la realización de estas pruebas, para el método experimental utilizaremos el dispositivo biaxial de pruebas, y se procesarán los videos de las pruebas en el programa GOM correlate, mientras que, para la aplicación del método numérico, haremos uso de Workbench y APDL.

### 1.4.2 Metodología para el diseño de la probeta

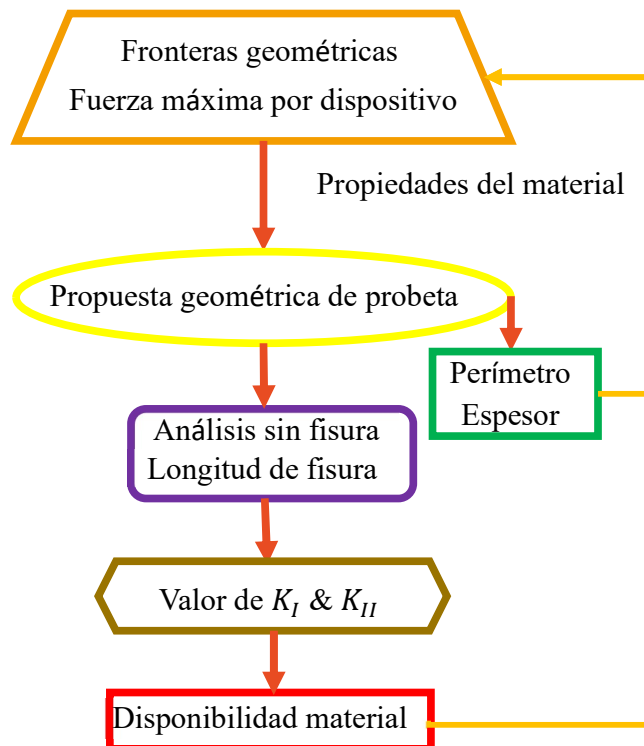


Figura 8. Proceso para la obtención geométrica de la probeta.

Para la obtención geométrica de la probeta se realizan los pasos mostrados en el esquema de la figura 8, los cuales consisten en:

1. Definir los parámetros máximos y mínimos debidos a las herramientas experimentales a utilizar, esto se basa en dos factores importantes.
  - a. Espacio geométrico: La disposición geométrica permitida en la probeta viene restringida primeramente en una longitud de punta a punta de 150 mm, mientras que el ancho máximo de los brazos de la probeta no puede superar los 19 mm.
  - b. Esfuerzos de las máquinas y herramientas: La máquina universal de ensayos dispuesta en el Tecnológico Nacional de México, Campus Pachuca, provee la capacidad de cargas hasta de 32 Toneladas, así como sus herramientas, mientras que el dispositivo biaxial de esfuerzos soporta una carga no mayor a los 400 Kg.
2. Se genera la propuesta geométrica de la probeta, la cual debe partir de la restricción geométrica del dispositivo, el espesor resalta como punto principal a elegir, así como las características geométricas en relación al ancho máximo de los brazos.
3. Se realizan los análisis numéricos, teniendo una codependencia entre las características evaluadas:
  - a. Primero el análisis de la probeta propuesta sin fisura alguna, para determinar la carga máxima aplicable antes que la probeta inicie su deformación plástica, así como su esfuerzo ultimo.
  - b. Se realiza el cálculo ahora con una fisura centrada a la geometría de la probeta, dicha fisura se hará varias en relación a la longitud inicial de la misma, así como a su orientación.
4. Se evalúan y analizan los valores máximos obtenidos de los intensificadores de esfuerzo  $K_I$  &  $K_{II}$ .
5. Elegida la propuesta geométrica (Área como espesor), se procede a la logística para conseguir el material a experimentar.

### 1.4.3 Metodología experimental

Para la correcta realización de las pruebas experimentales después de encontrar la geometría óptima para las condiciones determinadas, se procederá a manufacturar las probetas, posterior a ello se caracterizará la geometría de las probetas ya fabricadas y estadísticamente se determinará la corroboración de las dimensiones, se realizará el moteado de las probetas para finalmente llevar a cabo la realización de las pruebas y el procesamiento de los datos obtenidos de ellas.

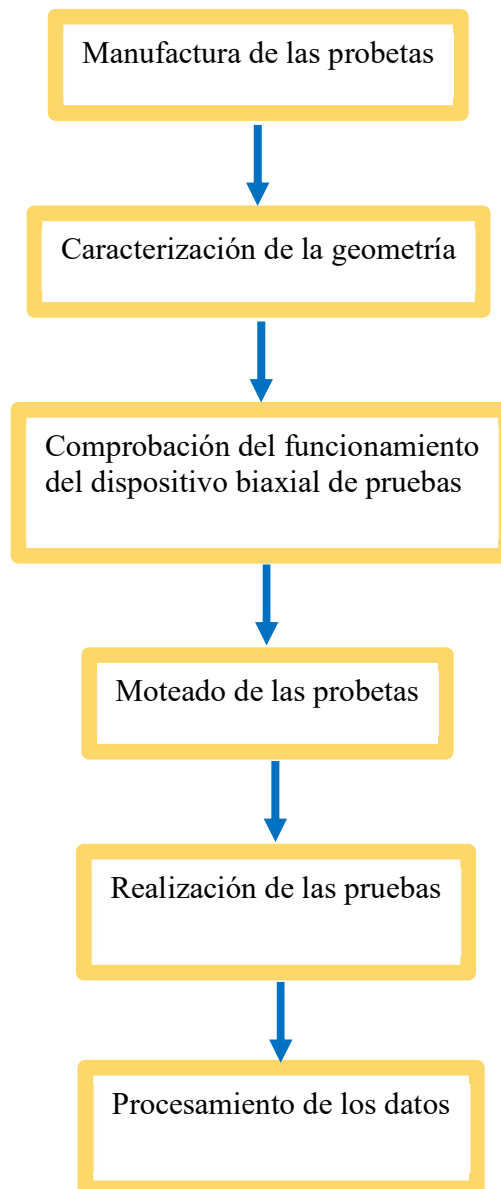


Figura 9. Metodología para la realización de pruebas experimentales

## Capítulo II Caracterización uniaxial del material

### 2.1 Preparación de las probetas para las pruebas uniaxiales

#### 2.1.1 Proceso de manufactura

Para las dimensiones de la probeta uniaxiales fabricadas se utiliza la norma ASTM -E8M, estas probetas se utilizarán para caracterizar las propiedades mecánicas del material, la nomenclatura de las dimensiones bajo las cuales se cortaron las probetas se muestra a continuación en la figura 10, detallando a que corresponde cada cota, para tener las dimensiones de las probetas uniaxiales (Véase anexo).

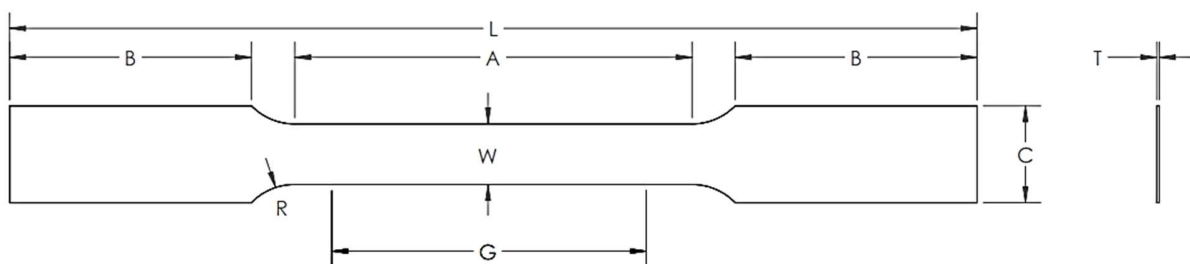


Figura 10. Simbología de medidas de probeta uniaxial ASTM E8M

G-Longitud calibrada

W-Ancho

T-Espesor

R-Radio

L-Longitud total

A-Longitud de sección reducida

B-Longitud de sección de agarre

C-Ancho en sección de agarre

#### 2.1.2 Proceso de limpieza

Para el proceso de limpieza se tuvieron que eliminar los bordes remanentes al corte, utilizando primeramente una lima para quitar los elementos de mayor tamaño, lo prevaeciente a este primer proceso se retiró utilizando una lija para metales con numeración 320, finalmente los detalles y el acabado se realizaron con lijas de numeración 1000 y 2000 en dicho orden.

### **2.1.3 Proceso de pintura**

Se coloca un pedazo de papel que cubra la zona donde estará en contacto la probeta con las mordazas, esta zona se cubre con cinta, se coloca la probeta en la zona destinada para pintura, se rocía una base de color negro mate, de acuerdo a las instrucciones sugeridas de uso por la pintura, se deja secar y se repite este proceso para asegurar una base homogénea, después de que se seque adecuadamente la pintura, se rocía a modo de goteo la pintura para que quede como se muestra en la imagen, respetando un tamaño de moteado de orden no mayor a 1.5 mm. El proceso para ambas probetas es similar cubriendo de base y moteado solamente la zona de interés y evitando pintar o dejar alguna suciedad en las zonas de sujeción de las probetas.

## **2.2 Caracterización del aluminio 3003**

### **2.2.1 Pruebas uniaxiales**

Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de pruebas, ubicado en el Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey en el equipo de pruebas de tensión el cual cuenta con sistemas para medir la carga aplicada y el desplazamiento ocasionado, se ensayaron 5 probetas de aluminio 3003 que fueron dispuestas de manera horizontal en la hoja de donde se obtuvieron, y 5 probetas de aluminio 3003 orientadas ortogonales a las primeras, esto buscando corroborar la isotropía del material.

Las pruebas fueron grabadas a 30 FPS (fotogramas por segundo), en una duración promedio de 1 minuto, Se realizaron pruebas de sensibilidad para determinar la cantidad mínima de imágenes a utilizar sin comprometer la fidelidad de los datos, por lo tanto para el análisis de las probetas uniaxiales se utilizaron las imágenes a cada 6 fotogramas, también se eliminaron las imágenes extras que se obtienen al inicio de la prueba así como las de final después de haber concluido, obteniendo finalmente una media de 90 imágenes a procesar. Para la extracción de estas imágenes se utiliza el programa VLC portable, que permite fragmentar los segundos de videos en sus fotogramas sin afectar la calidad de las mismas.

### **2.2.2 Procesamiento en GOM correlate**

El procesamiento de datos se realizó en el programa GOM correlate, el cual utiliza la correlación de imágenes, servil al análisis de desplazamientos en pruebas de materiales para la obtención de sus propiedades, dando con él, validación a las simulaciones numéricas. Los requerimientos para el procesamiento, así como los pasos a seguir se mencionan a continuación.

- a- Se necesita tener en orden y con un secuencial al final del nombre del archivo las imágenes a procesar, considerando un orden ascendente que es el que el programa seguirá.



Figura 11. Nomenclatura y secuencial de las imágenes a procesar

- b- Tener en una tabla la fuerza mostrada en el módulo indicador de la celda de carga con el orden asignado a las imágenes, debido a que el programa nos proporcionara el desplazamiento entre las imágenes solamente.

Con respecto al procedimiento:

- 1- Se abre el programa utilizando el ejecutable, en este caso se utiliza el GOM Correlate V8 SR1
- 2- Abrimos proyecto nuevo, en el menú ARCHIVO y arrastramos todas las imágenes a procesar a la ventana principal del programa, aparecerá una ventana emergente la cual nos da la opción de procesar la información que estamos introduciendo al programa como imagen de deformación o imagen de informe, Seleccionaremos la opción de imagen de deformación, posterior a esto aparecerán en orden secuencial las imágenes.

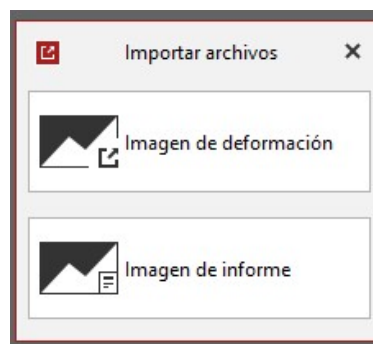


Figura 12. Ventana emergente para importación de archivos



- 3- Teniendo cargadas las imágenes en el nuevo proyecto, se procede a establecer la escala y a editar la calibración, estas opciones se encuentran en el menú ‘MODIFICAR’, seleccionamos modificar parámetros de creación, cambiamos de la pestaña emergente a la sección de editar calibración, abrimos la opción de definir escala, ya adentro de la opción en el área donde se encuentra la imagen manteniendo la tecla ‘Ctrl’ seleccionamos presionando el lado izquierdo del ratón el punto de inicio y el punto final de la distancia que definirá la escala, la cual es una distancia que conocemos (previamente establecida) como se muestra en la imagen donde referenciamos al ancho de las probetas uniaxiales.

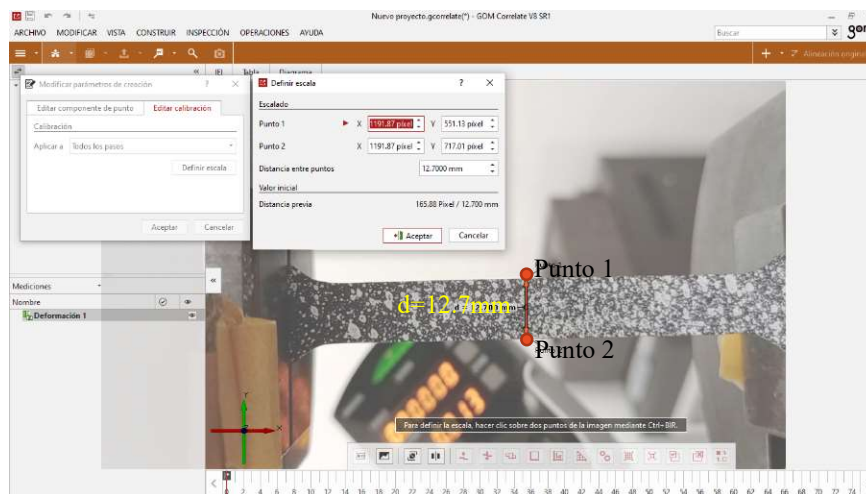


Figura 13. Definición de escala

- 4- Se crea entonces un componente de superficie el cual delimitara el área sobre la cual se creara la malla, esta área estará previamente definida por el moteado que se le dio a la probeta, para abrir el panel de herramientas que nos permite crear esta superficie, presionar en la barra de comandos directos la opción de crear componentes de superficie, se asignan los valores de tamaño de faceta y la distancia entre puntos, para nuestro caso se asignan los valores de 16 pixeles y 19 pixeles correspondientemente, el cálculo se asigna de precisión alta, y finalmente en la sección de selección, se utiliza la herramienta de seleccionar / deseleccionar polígonos que nos permite un trazo libre de la geometría a seleccionar, para el caso de las probetas uniaxiales se seleccionara la zona central antes del cambio de sección en cualquiera de los extremos como se muestra en la figura 14. Utilizamos la ventana de opciones ubicada en la parte inferior de la ventana para la creación de componente de superficie y seleccionamos la calidad del patrón, los cual nos dará una referencia de que tan adecuados son los valores seleccionados para los tamaños de faceta y distancia entre puntos.

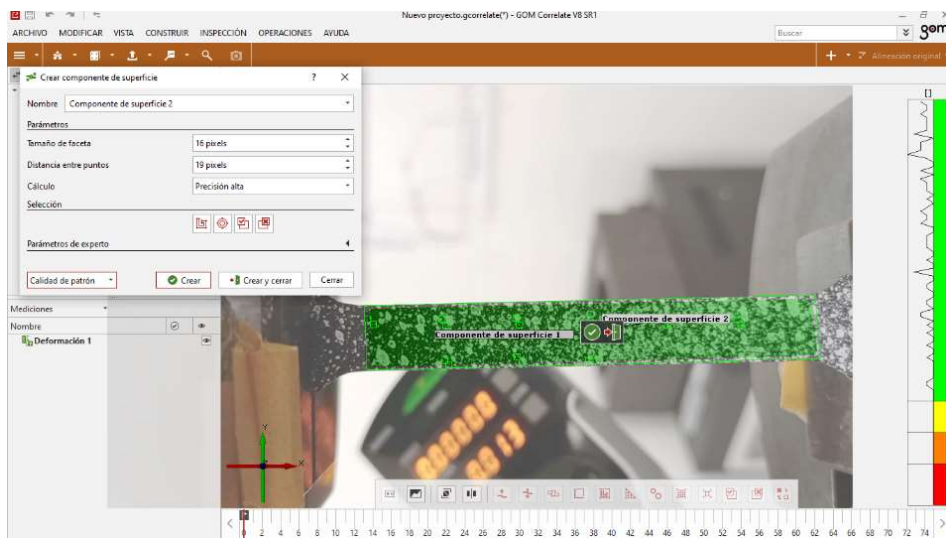


Figura 14. Ajuste de parámetros a la creación de componente de superficie

- 5- Si es necesario debido a una inclinación de la geometría a analizar con respecto al sistema de coordenadas inicial, se puede modificar esta alineación original, en el menú de acceso directo ubicado en la parte superior derecha de la pantalla, se encuentra un símbolo '+' el cual permite agregar una alineación adicional, la cual se determina preferentemente con la opción '3-2-1', en la pestaña de regla de alineación se usara 'ZZZ-XX-Y' lo cual refiere a que los primeros puntos determinados darán el dominio del plano normal al eje 'Z' los siguientes dos puntos determinan la dirección y sentido al eje 'Y' determinado inicio y fin, y finalmente el punto restante determina la dirección del eje 'X' considerando la ortogonalidad.

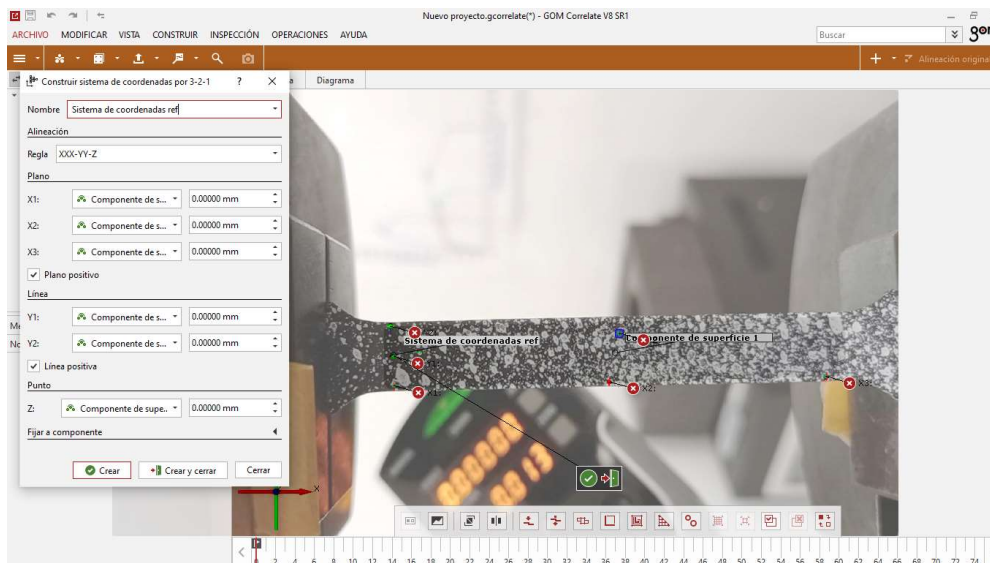


Figura 15. Creación de sistemas de coordenadas

- 6- Se vuelven visibles los parámetros sobre los cuales quieran obtenerse los datos, para el caso de la prueba uniaxial, seleccionaremos la deformación mayor y se configurara a modo de obtener el valor de la deformación unitaria porcentual.
- 7- Se configura la escala de la deformación unitaria ubicada en la sección derecha de la pantalla como se muestra en la figura 16, presionando el lado derecho del ratón sobre la barra donde se muestran las deformaciones, seleccionando como plantillas de leyenda la opción de “GOM 8 colors”, posteriormente repetimos la generación de este cuadro de opciones y ahora procedemos a posicionarnos en la pestaña de escalado y seleccionamos como opciones “Todos los pasos visibles” y “Todos los valores”

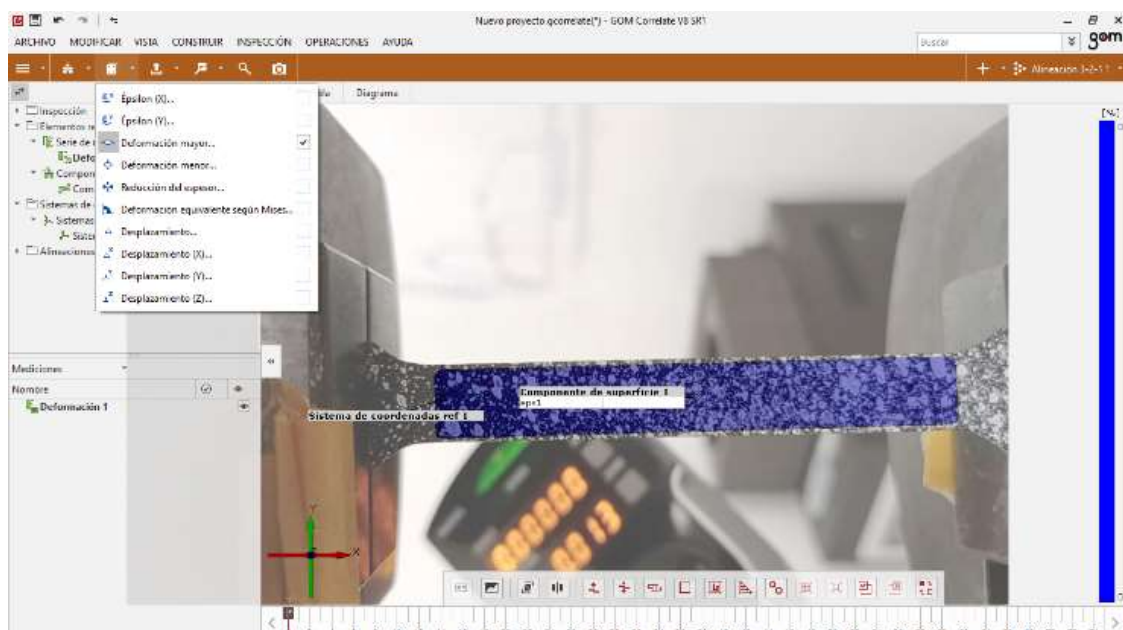


Figura 16. Parámetros a obtener

- 8- Se coloca una etiqueta de desviación por cada punto de interés que se tenga en la prueba, esta se obtiene al presionar en el menú inspección, la opción de etiqueta de desviación y manteniendo presionada la tecla ‘Ctrl’ y eligiendo algún punto dentro de la componente de superficie, en la particularidad de este ejemplo se selecciona un punto por donde pasa la fractura que se crea al ensayo, esta etiqueta estará presente en todas las imágenes a procesar mientras la malla permanezca.

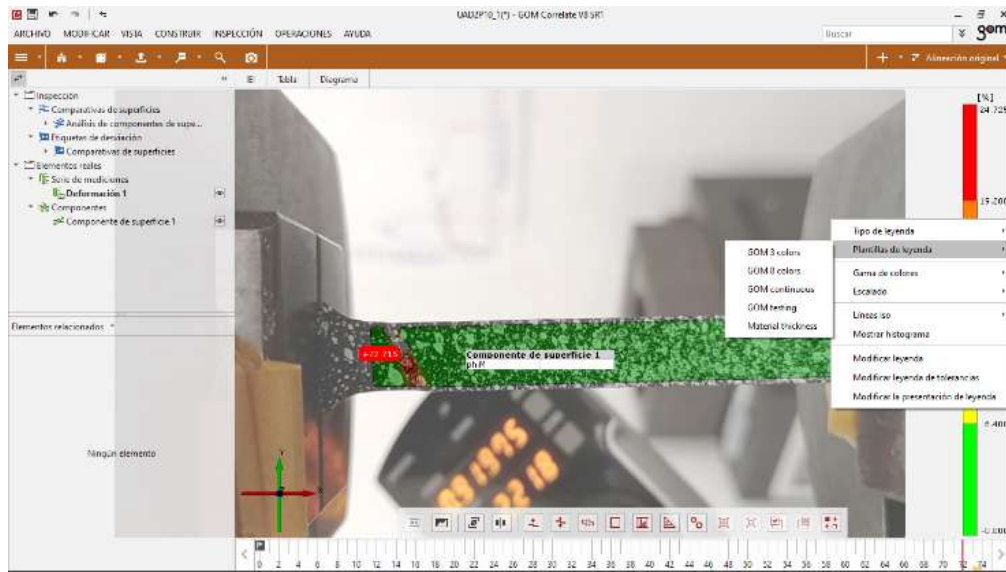


Figura 17. Etiqueta de desviación

- 9- Teniendo las etiquetas de desviación asignadas a las características requeridas procedemos a obtener estos datos de manera tabulada, previo a exportar los datos, el programa nos muestra una gráfica donde compara los datos requeridos contra el número de fotograma que lo contiene de acuerdo a la figura 18, para exportar los datos presionamos sobre la opción “Exportar contenido de diagrama”, seleccionamos la ruta en la cual se grabara nuestro archivo, el nombre del archivo y aceptamos.

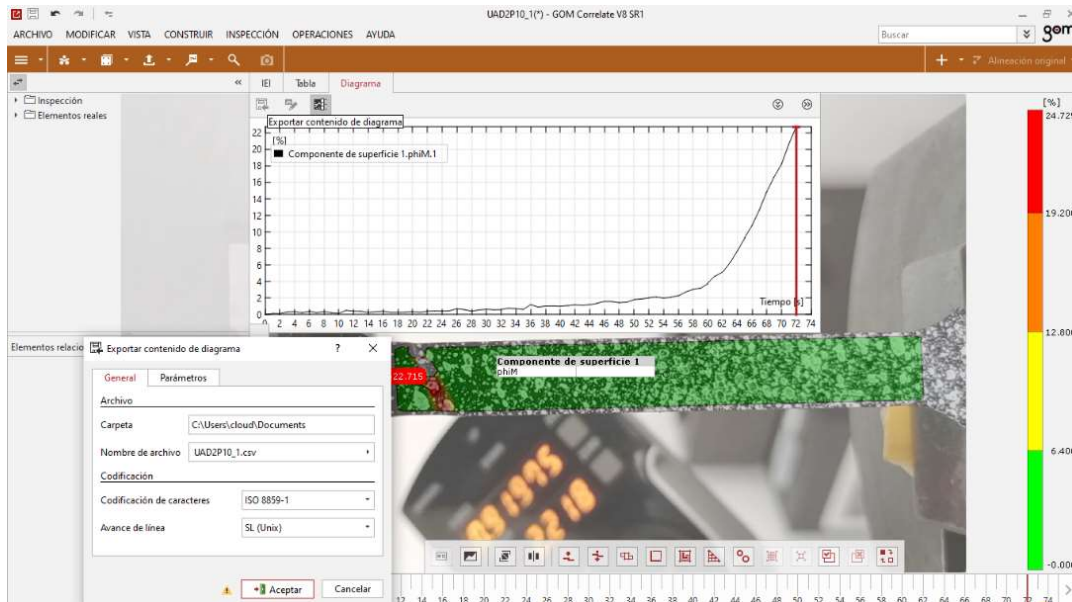


Figura 18. Grafica deformación / fotograma

### 2.2.3 Nomenclatura de las probetas uniaxiales

Se pretende analizar la isotropía del material por lo cual de la hoja de aluminio que se obtuvieron las probetas, se dispusieron de 20 probetas, 10 de ellas ortogonales a la disposición de las otras 10, para distinguir entre ambas probetas a una de las dos direcciones se le conservo una pestaña en uno de los extremos, esta pestaña no afecta el agarre de la probeta ni la sección que se analizara, la nomenclatura de las probetas contiene la siguiente relación:

**U – A – D1 – P10**

U: Carga (Uniaxial)

A: Material (Aluminio)

D\_: Dirección (Horizontal=1, Vertical=2)

P\_\_: Numero de prueba (Numeradas con valores 01,02,03,04, 05, 06, 07, 08, 09 & 10)

### 2.2.4 Creación de graficas esfuerzo-deformación

Para la creación de las gráficas esfuerzo-deformación de las pruebas uniaxiales utilizamos los valores de las deformaciones unitarias obtenidos al procesar las imágenes en GOM correlate contra el valor correspondiente de la fuerza, el cual se adquiere capturando el valor arrojado por el módulo indicador en cada una de las imágenes, el resultado de este proceso en cada una de las pruebas es la gráfica que se muestra a continuación, donde se muestra el valor del esfuerzo obtenido contra la deformación unitaria convertida a su valor adimensional .

Para obtener el valor del esfuerzo se aplica la fórmula de esfuerzo que se utiliza para calcular un esfuerzo de un elemento sometido a tensión / compresión.

$$\sigma_{uni} = \frac{F_i}{A_m} \dots (13)$$

Donde:  $\sigma_{uni}$  (Esfuerzo de prueba biaxial)

$F_i$  (Fuerza correspondiente al fotorama)

$A_m$  (Fuerza normal a la dirección de la fuerza, en la sección media)

Para calcular el área normal a la fuerza en las pruebas, se utiliza el ancho de la sección analizada de la probeta, así como el espesor, por lo cual el área se puede expresar como:

$$A_m = W * t \dots (14)$$



Donde:

$W$  (Ancho de la probeta en la seccion media)

$t$  (Espesor de la probeta)

Obteniendo los valores de los esfuerzos correspondientes a cada prueba y a cada valor de deformación dentro de las pruebas, se tabulan con su valor correspondiente para poder graficarse, teniendo como resultado las gráficas que se muestran a continuación.

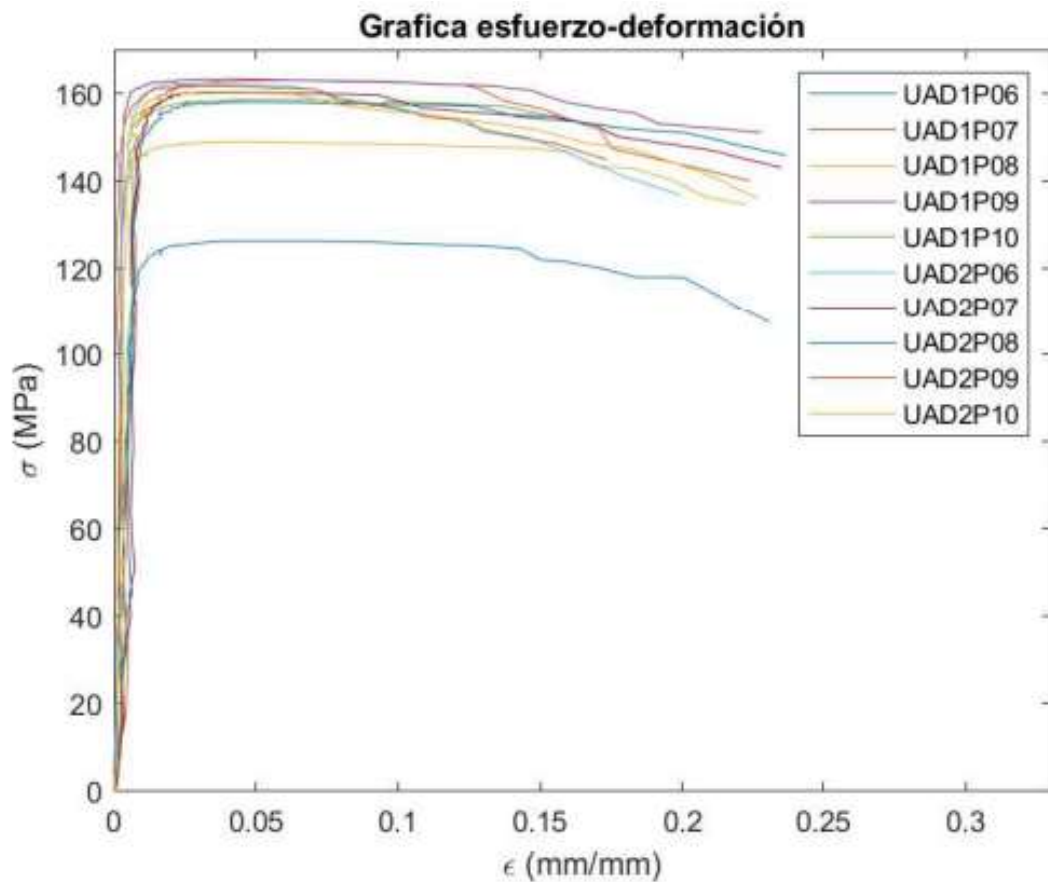


Figura 19. Graficas de pruebas uniaxiales.

Las gráficas que se obtienen tienen bastante variación de los datos, no mostrando una tendencia clara, la cual se necesita principalmente al inicio de la gráfica de donde se obtendrá el límite de cedencia y el módulo de elasticidad, por lo cual fue necesario generar un código que mejore la tendencia de las gráficas filtrando esa variación, utilizando el programa Matlab, el código se muestra en anexos, considerando pequeñas variaciones para cada gráfica, por lo cual después de este primer procesamiento se obtienen las siguientes curvas.

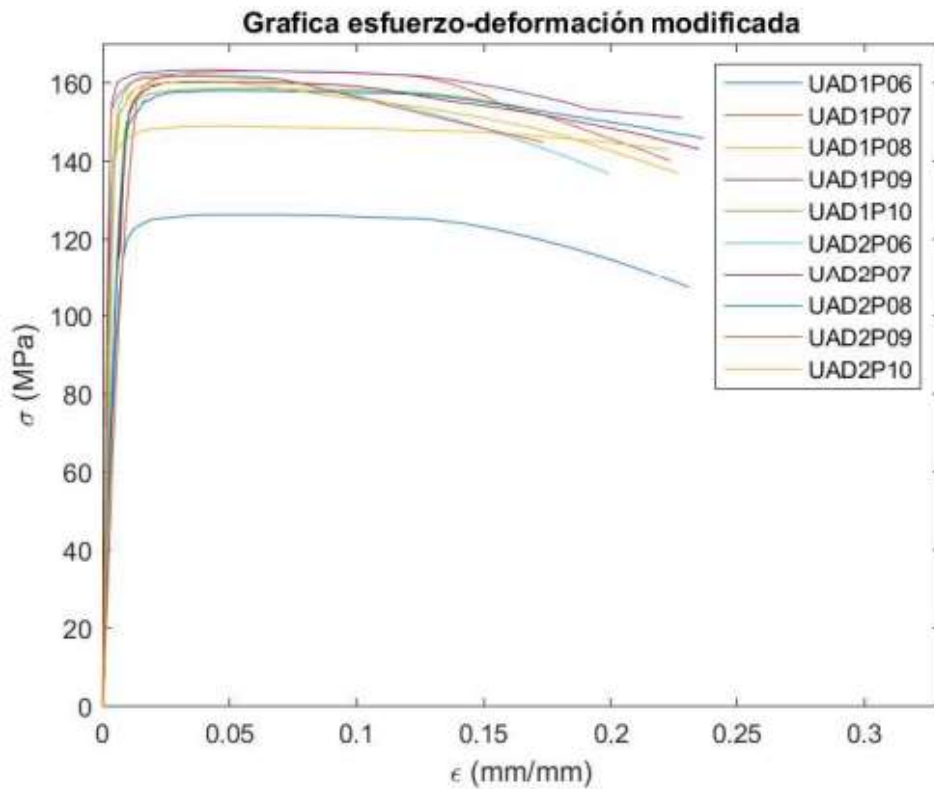


Figura 20. Graficas de pruebas uniaxiales suavizadas.

El suavizado de la curva se obtiene usando el comando ‘smoothed’ el cual suaviza los datos de respuesta en el vector columna y con un filtro de media móvil que se determina heurísticamente, esto se puede apreciar en la figura 21, donde se aprecia en el detalle A la gráfica suavizada y filtrada la cual permite obtener de ella en la parte elástica un trazo linealizado. La grafica corresponde a la prueba de nomenclatura UAD2P06.

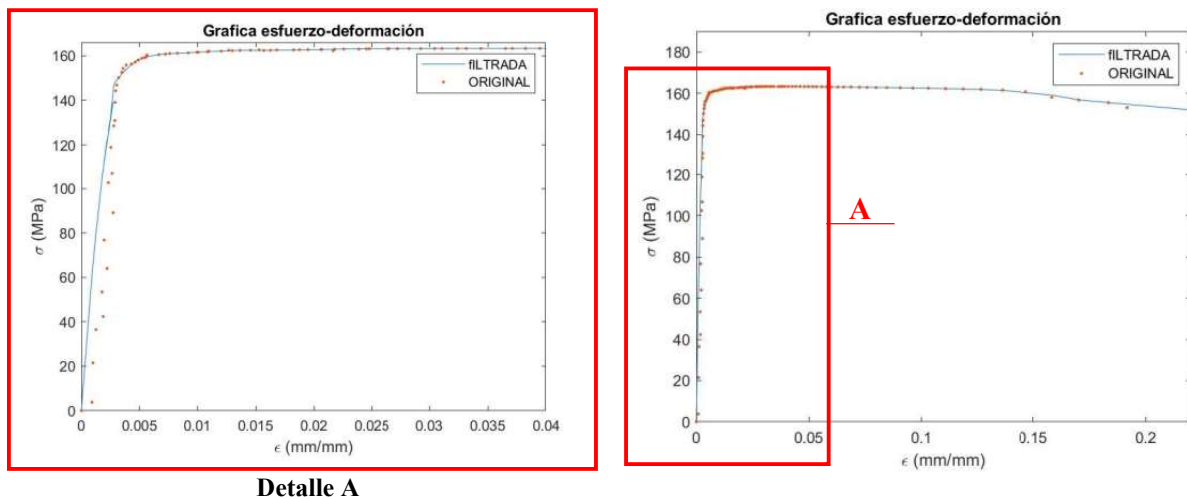


Figura 21. Comparación de grafica suavizada y sin suavizar.

### 2.2.5 Refinamiento de graficas esfuerzo deformación

En las pruebas realizadas se puede apreciar que las probetas con identificador UAD1P06 & UAD2P08 tienen una tendencia similar, pero con un menor valor de esfuerzo máximo alcanzado, y al momento de tabular estos valores se observa que este valor se encuentra en orden de 20 y 40 unidades, por lo cual estas pruebas se retiran de los valores que se promediarán, teniendo como resultado la figura 22 que contiene las 8 pruebas restantes donde se puede apreciar una cercanía en el comportamiento de las curvas.

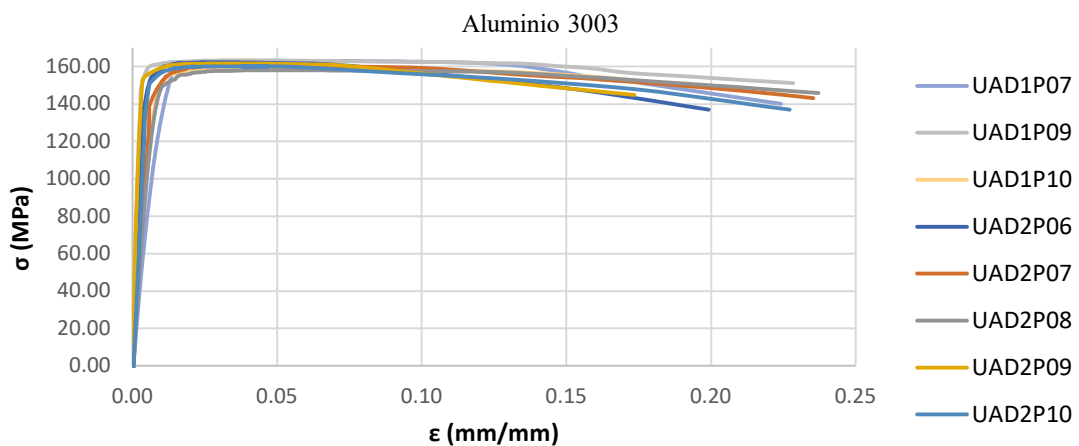


Figura 22. Selección de graficas a promediar.

### 2.2.6 Obtención de propiedades mecánicas

Se analiza de manera independiente cada grafica para obtener las propiedades mecánicas en cada ensayo, el procedimiento se describe utilizando como ejemplo la prueba UAD2P10.

1. Se grafica de manera aislada la prueba

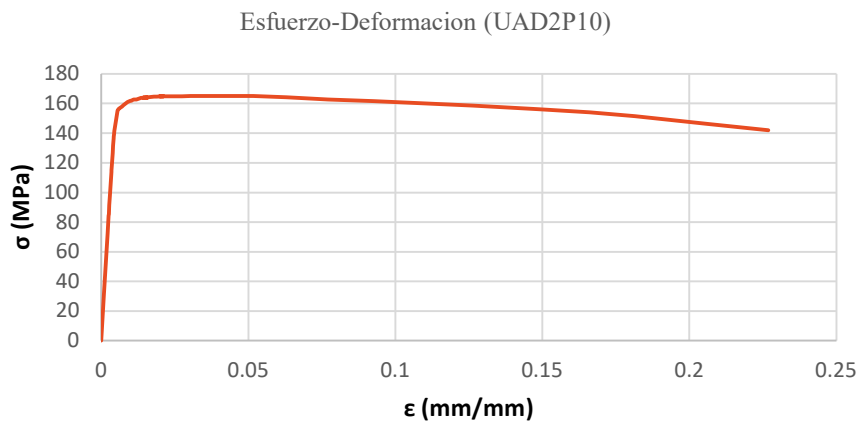


Figura 23. Grafica esfuerzo-deformación de prueba UAD2P10



- Se reducen los datos hasta un máximo de la curva donde claramente se pueda observar la tendencia lineal de esta sección de la gráfica, lo que nos comprobaría que aún se encuentra en el límite de proporcionalidad, después se solicita la línea de tendencia en las propiedades del gráfico y se habilita que se presente la ecuación del gráfico, la cual nos proporciona el valor del módulo de Young calculada a través de la ley de Hooke que relaciona el esfuerzo y la deformación unitaria señalando la proporción que guardan estos valores.

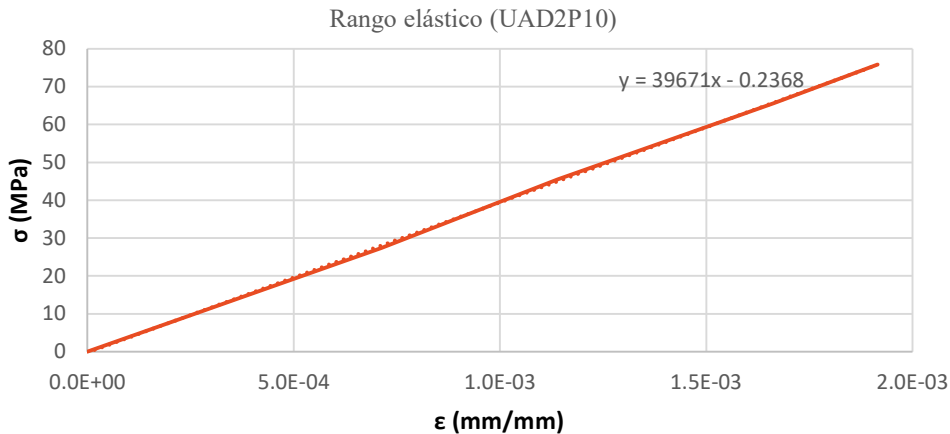


Figura 24. Obtención de la ecuación de la pendiente

- Teniendo la ecuación que describe la pendiente del rango elástico de la prueba, se utiliza una recta paralela desplazada a 0.2% (0.002 mm/mm) en el eje de las abscisas, donde esta recta intercepte la curva del ensayo, se considerara el valor del límite de cedencia a 0.2% de la deformación  $\sigma_{y(0.2\%)}$ . En el punto de la intersección se utilizan líneas auxiliares que permiten tener un aproximado del valor del esfuerzo y su valor de deformación correspondiente en ese punto.

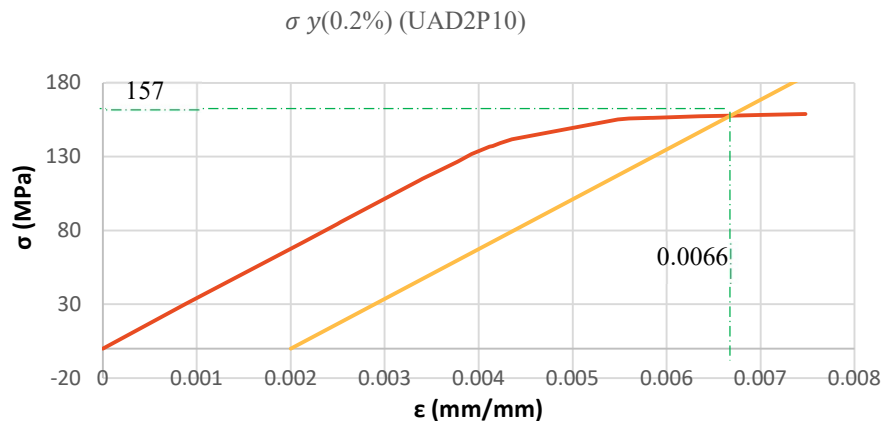


Figura 25. Esfuerzo de cedencia al 0.2% de deformación

4. El valor del esfuerzo máximo se obtiene buscando el valor máximo en nuestra tabla, así como el valor del esfuerzo último, ambos valores también se pueden obtener por medio grafico de nuestra curva esfuerzo-deformación como se muestra en la siguiente imagen.

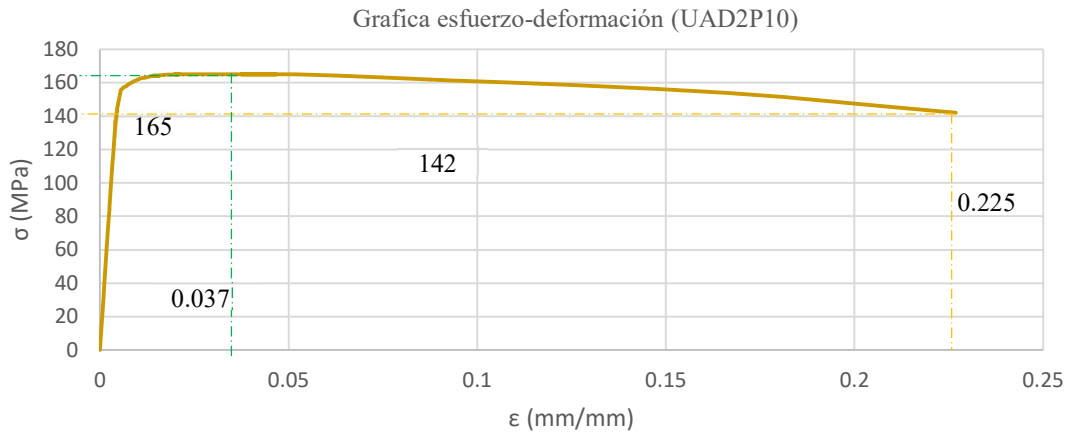


Figura 26. Esfuerzo máximo y esfuerzo último.

5. Este procedimiento se repite para cada una de las pruebas y así obtener las siguientes propiedades de ellas: Esfuerzo de cedencia, Modulo de Young, Esfuerzo Máximo. Las propiedades se tabulan y se promedian cada una, como se muestra en la tabla 3.

Probeta	$\sigma_y$ (MPa)	E (GPa)	$\sigma_{Max}$ (MPa)
UAD1P07	● 130	● 17.1	163.0
UAD1P09	156	● 64.2	163.3
UAD1P10	140	23.5	● 158.6
UAD2P06	154	39.6	162.3
UAD2P07	145	25.2	160.4
UAD2P08	140	24.9	164.0
UAD2P09	● 158	61.1	161.6
UAD2P10	156	33.7	● 165.1
Promedio	148.5	34.7	162.5

- Valor extremo inferior
- Valor extremo superior
- Curva con cercanía a  $\sigma_{máx}$ .
- Curva con cercanía a E
- Curva con cercanía a  $\sigma_y$

Tabla 3. Propiedades mecánicas de pruebas uniaxiales.

### 2.2.7 Elección de curva esfuerzo deformación característica

Previo a obtener los promedios para cada rubro, se excluyen el valor mínimo y el valor máximo en cada columna, determinado el promedio de cada propiedad, se selecciona la prueba que tenga la propiedad más cercana a el valor promediado, obteniendo así tres curvas las cuales corresponden cada una a la respectiva propiedad.

Se grafican las curvas que contienen mayor cercanía al valor promedio de las propiedades mecánicas, teniendo como resultado la comparativa de las 3 curvas esfuerzo- deformación.

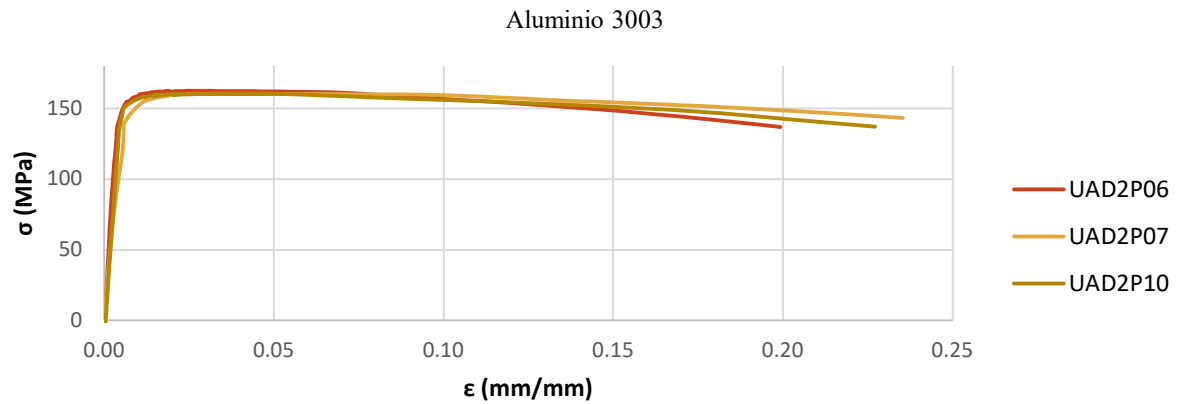


Figura 27. Curvas esfuerzo-deformación de pruebas seleccionadas.

Se obtienen los valores de los esfuerzos de forma analítica interpolando con los datos de las pruebas a cada 0.02 mm/mm de la deformación, y se tabulan, incluyendo los valores de esfuerzo y deformación a cada propiedad mecánica de las 3 curvas obteniendo así la tabla 4.

	$\epsilon$ (mm/mm)	UAD2P06 (MPa)	UAD2P07 (MPa)	UAD2P10 (MPa)
$\sigma(y)$	0.0058	152.00		
$\sigma(y)$	0.0066			158.00
$\sigma(y)$	0.0078		145.00	
$\sigma(0.02)$	0.0200	162.00	159.34	164.84
$\sigma(Max)$	0.0270	162.34		
$\sigma(Max)$	0.0343		160.36	
$\sigma(Max)$	0.0374			165.11
$\sigma(0.04)$	0.0400	162.14	160.33	165.10
$\sigma(0.06)$	0.0600	161.62	160.12	164.43
$\sigma(0.08)$	0.0800	159.67	159.87	162.64
$\sigma(0.1)$	0.1000	156.65	159.12	160.86
$\sigma(0.12)$	0.1200	153.68	157.23	159.17
$\sigma(0.14)$	0.1400	150.26	155.09	157.13
$\sigma(0.16)$	0.1600	146.32	153.26	154.70
$\sigma(0.18)$	0.1800	141.76	151.02	151.70
$\sigma(Ult)$	0.1991	136.89		
$\sigma(0.2)$	0.2000		148.65	147.59
$\sigma(0.22)$	0.2200		145.54	143.40
$\sigma(Ult)$	0.2269			141.96
$\sigma(Ult)$	0.2353		143.15	

Tabla 4. Comparación de las curvas esfuerzo deformación de pruebas seleccionadas.

Debido a que la curva correspondiente a la prueba de la probeta UAD2P10 muestra ser la curva intermedia a las 3 seleccionadas, se escoge el comportamiento de esta curva como la gráfica que representa las propiedades de nuestro material, por lo cual se extraen los datos correspondientes de los esfuerzos y deformación correspondiente desde el valor del límite de cedencia hasta el valor del esfuerzo máximo, esta sección de la gráfica nos permite tabular los datos correspondientes a la plasticidad en nuestro programa de simulación numérica para rehacer los análisis y estudios realizados previamente, pero ahora con las características particulares de nuestras probetas.

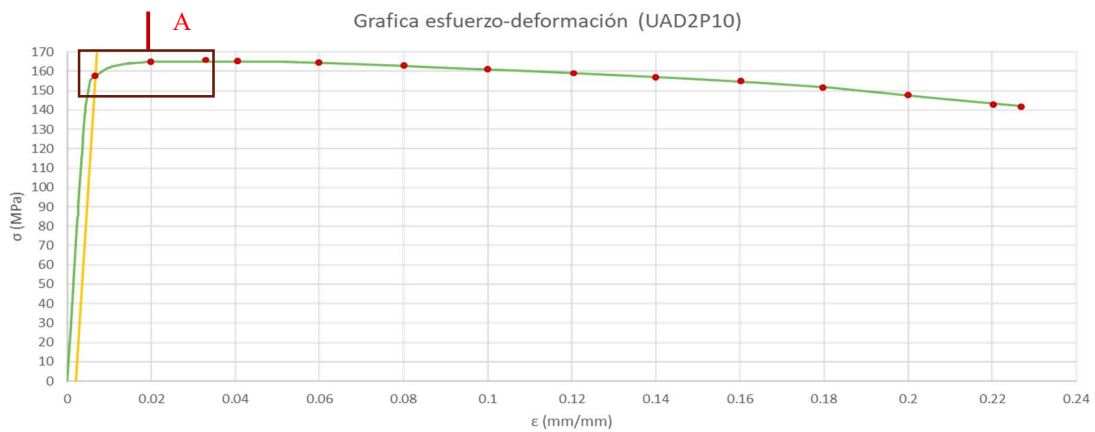


Figura 28. Curvas esfuerzo-deformación de prueba UAD2P10.

En el detalle A se muestra lo correspondiente a la deformación plástica y la transición de esta desde el límite de cedencia hasta el valor máximo alcanzado del esfuerzo, estos valores se incluyen también de forma tabulada para poder extraerse y alimentarse esta propiedad al analizar plásticamente las probetas.

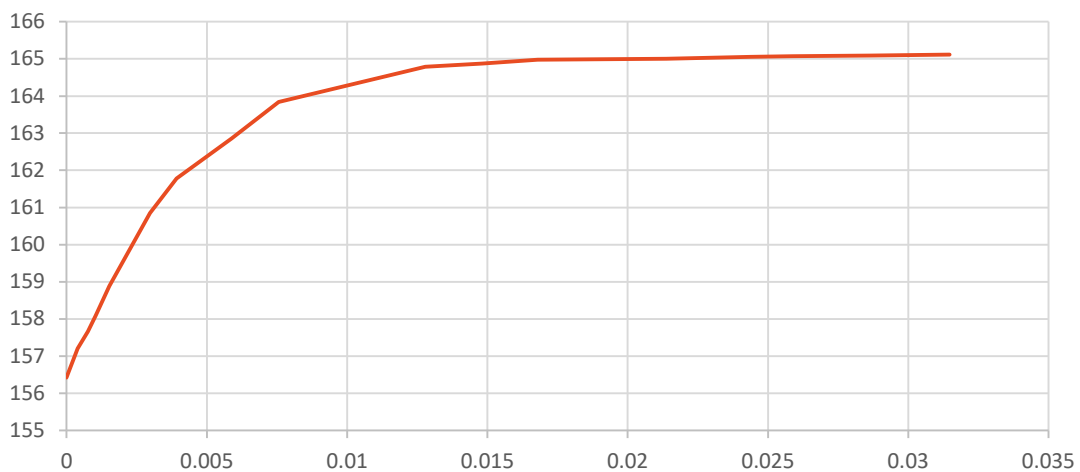


Figura 29. Curva del límite de cedencia al esfuerzo último.

## Capítulo III Dispositivo de pruebas biaxiales

### 3.1 Carga máxima soportada por el dispositivo biaxial de esfuerzos

Se propone realizar los análisis correspondientes por elemento finito sobre el esquema simplificado del dispositivo de pruebas biaxiales como se aprecia en la figura 30, se analiza la interacción entre elementos para asegurar la integridad al momento de la realización de las pruebas, posterior a los resultados de las simulaciones como la del ejemplo de la figura 31, podemos destacar:

1. Que la carga relacionada entre el dispositivo y la probeta se considera de 2 500 N
2. La carga aplicada se encuentra por debajo de las cargas que soportan de manera independiente los elementos del dispositivo de mayor atención como lo son el tornillo cabeza de martillo, así como el elemento de unión escuadra refuerzo, los cuales de acuerdo a la ficha técnica soportan cargas de 4 000 N.
3. El Perfil principal soporta una fuerza máxima aplicada por los tornillos de 7 000 N.

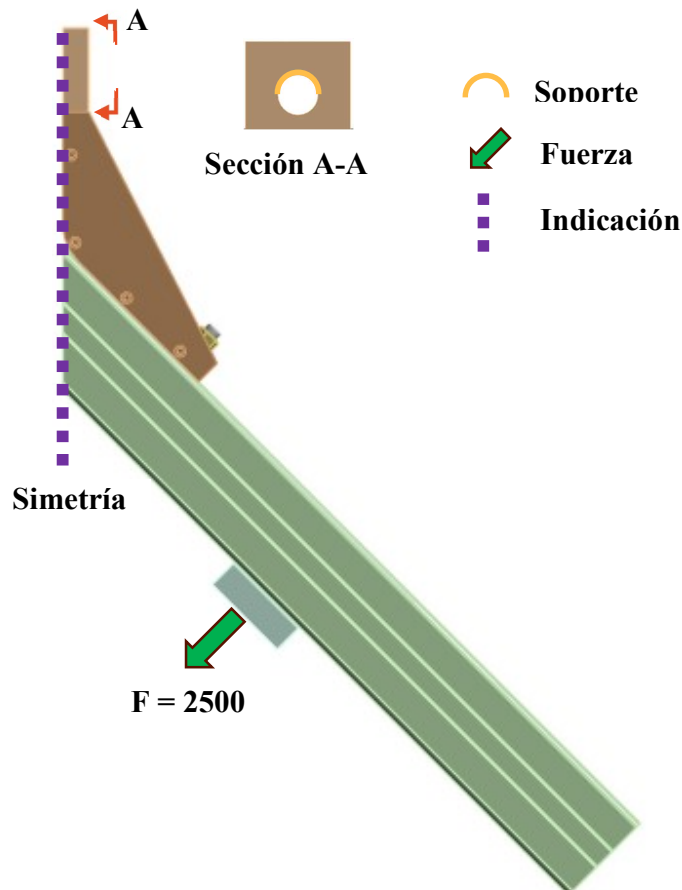


Figura 30. Esquema simplificado del dispositivo biaxial.

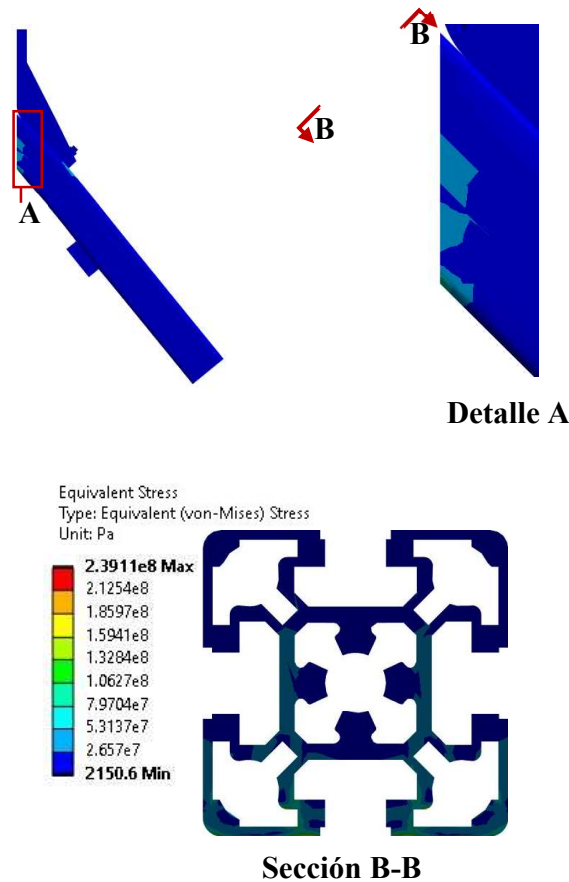


Figura 31. Esfuerzos presentes en sección crítica del perfil.

Se muestra un corte de sección en la zona donde se tiene el mayor esfuerzo, ubicada en la zona inferior del esquema, se presenta en esta parte debido a el punto de apoyo que se genera ahí debido a la disposición del dispositivo y al modo de carga.

Como refuerzo para la zona de mayor esfuerzo, se coloca un elemento de unión el cual garantiza la ortogonalidad entre los elementos, así como ayuda a disminuir el esfuerzo máximo que se presentaría en esta zona. Este elemento de unión a escuadra soporta cargas de 4000 N como se muestra en la ficha técnica ubicada en anexos.

Los cálculos del dispositivo se realizan a modo de comprobar que las cargas necesarias para realizar las pruebas de los ensayos biaxiales no superaran las cargas permisibles que el dispositivo analizado como ensamble soportara, así como los elementos de manera individual.

## 3.2 Diseño del acoplamiento del dispositivo biaxial - máquina universal

### 3.2.1 Esquema entre sistemas a acoplar

Se genera el diseño de los sistemas de acoplamiento entre el dispositivo biaxial de esfuerzos y la máquina universal de ensayos, para lo cual primero se mide de manera general la máquina de ensayos universales, se sobrepone el dispositivo de pruebas biaxiales y se realiza la previsualización de las piezas que realizarán este acoplamiento.

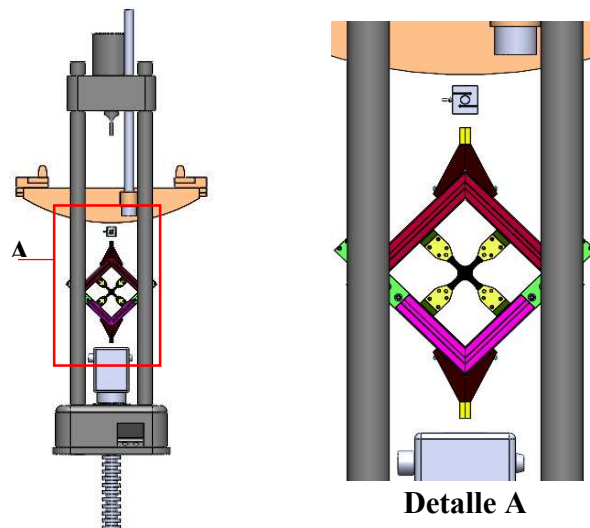


Figura 32. Esquema de máquina universal y dispositivo biaxial de esfuerzos

En este punto se realiza una lluvia de ideas basadas en la forma adecuada de acoplar el dispositivo de esfuerzos biaxiales a la máquina universal de ensayos, pasando primero a revisar si alguno de los herramientas de la máquina tiene algún aprovechamiento en el montaje del dispositivo, también se considera que la implementación del sistema de acoplamiento no genere daño alguno a los herramientas de la máquina universal.

Primeramente, en la *zona A*, se requiere un elemento que no supere las dimensiones delimitadas por el hueco del dado inferior de la máquina, así como este se pueda sujetar del perno que atraviesa el dado, este elemento tiene que asegurar la correcta transmisión de fuerza, así como evitar cualquier daño a la máquina o al dispositivo.

Para la zona superior del dispositivo biaxial de esfuerzos, que enlaza con la celda de carga, se debe considerar que este elemento deberá contar en la parte superior con una cuerda que se atornillará con la parte inferior de la celda de carga (Capacidad de 500 Kg).

Finalmente, el elemento que transmita la fuerza de la celda de carga a el soporte superior de la maquina universal, deberá de tener en cuenta las restricciones de espacio que se tienen, también considerar la rosca de la parte inferior del elemento.

De las propuestas obtenidas, se ponderan considerando lo simple del proceso de manufactura, el costo de producción o compra, así como la facilidad de montaje en el acoplamiento, por lo cual se llega a un primer esquema de elementos, los cuales se proceden a modelar en el software Solidworks, lo cual nos sirve para, primeramente, representar dichos elementos y observar la viabilidad de la propuesta, así como el análisis de esfuerzos en los elementos.

### 3.2.2 Condiciones de frontera y diseño

Se considera una fuerza de tensión de 2700 N aplicada a los elementos, se representan las piezas nuevas, así como el perno de la máquina de ensayos a la cual se acoplo para revisar los esfuerzos provocados en este elemento por los elementos de acoplamiento. La solución más simple a la zona inferior del dispositivo es la creación de dos placas sujetadas al perno y adaptadas por medio de un tornillo comercial a el dispositivo de esfuerzos biaxiales, de  $\frac{3}{4}$  in de diámetro, de un acero grado estructural A325 con rosca solo en el extremo.

Se considerará un contacto entre las piezas de fricción, el cual se asigna con un valor de 0.15, las placas de acoplamiento mostradas en la imagen, son consideradas de una aleación de aluminio comercial con un Módulo de Young de 70 GPa y coeficiente de poisson de 0.33, con un mayor refinamiento en las zonas de barreno.

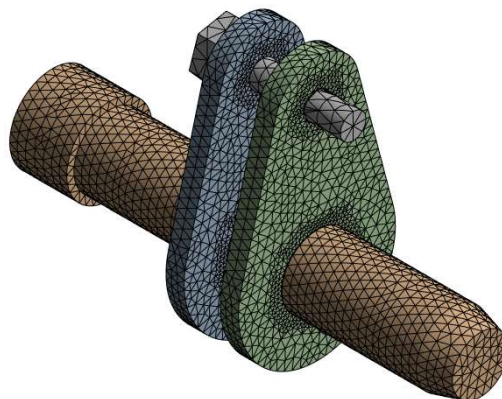


Figura 33. Discretización del acoplamiento para zona inferior.



Para las condiciones de frontera se establece que el perno inferior estará sujeto al dado de la maquina universal, mientras el tornillo de cuerda en el extremo, estará siendo tensionado al sujetarse del dispositivo de pruebas biaxiales

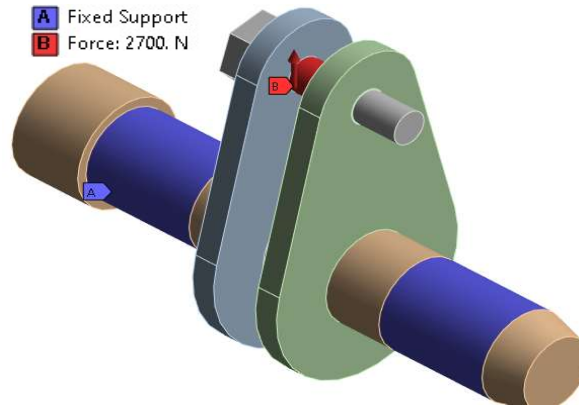


Figura 34. Condiciones de frontera del acoplamiento para zona inferior.

Bajo las condiciones geométricas iniciales a las cuales se diseñaron las placas (paletas) se tienen los siguientes esfuerzos en cada elemento

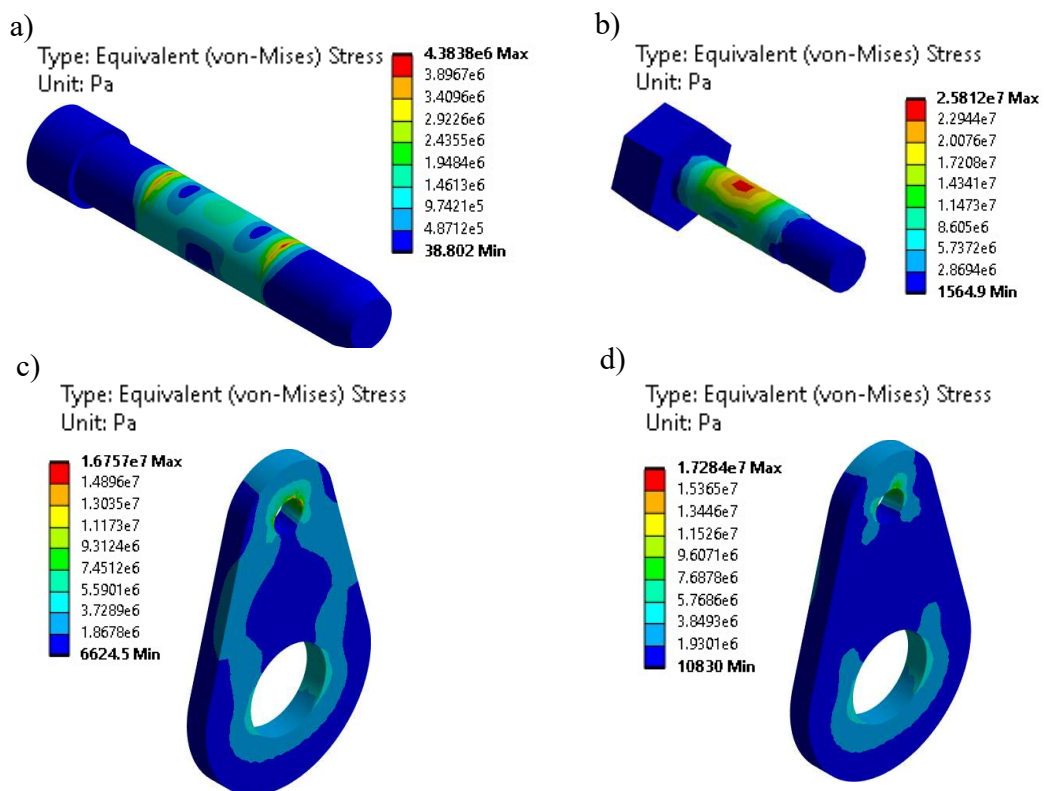


Figura 35. Esfuerzos bajo carga de 2700 N. a) Perno de maquina universal, b) Tornillo de 3/4" A325, c) Placa acoplamiento 1, d) Placa acoplamiento 2

Para el siguiente elemento se parte de una propuesta inicial, considerando el uso de soleras de 12.7 mm (0.5 in) barrenadas y soldadas con un filete del espesor de las placas, se observa que el esfuerzo más grande lo llevara el tornillo soldado a la placa, por lo cual se reducen espesores y dimensiones de los marcos que se sujetaran al perno y al tornillo

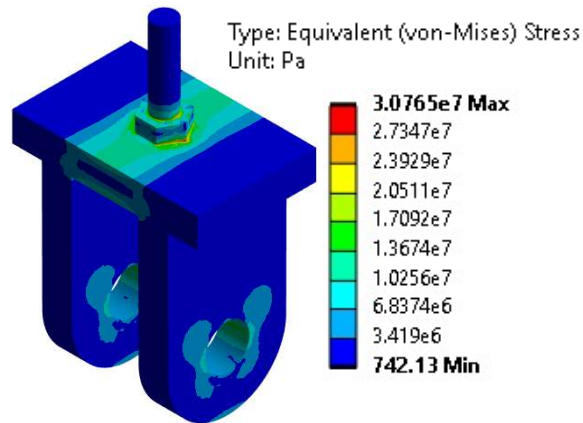


Figura 36. Esfuerzos bajo carga de 2700 N. en sistema de acoplamiento para dispositivo biaxial de esfuerzos a celda de carga.

Para el acoplamiento superior que une la celda de carga a la maquina universal de ensayos se parte de uno propuesta similar a la que se tiene para la unión de la celda de carga a el dispositivo biaxial de esfuerzo, con la diferencia del tamaño del barreno y la distancia del trazo exterior, como se muestra en la figura 37.

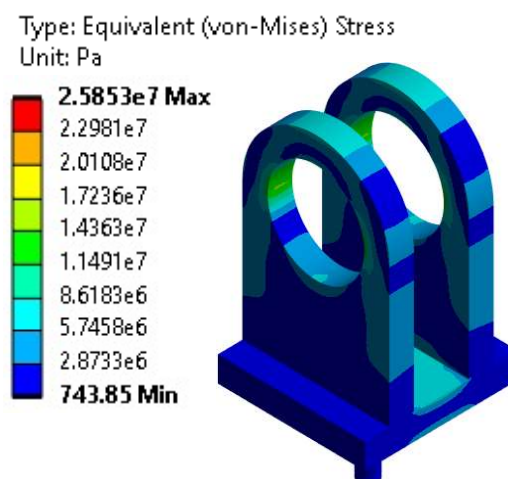


Figura 37. Esfuerzos bajo carga de 2700 N. en sistema de acoplamiento para dispositivo celda de carga a máquina de ensayos universal.

Se realizan varios análisis de los esfuerzos máximos en los elementos, considerando primeramente reducciones en las secciones, y después se analiza el cambio de esfuerzos presentado al cambiar el espesor de los elementos de acoplamiento, hay que señalar que se elige reducir al máximo la cantidad de piezas que se van a maquinar, las placas que se procesaran para obtener las piezas son de espesores comerciales con procesos simples, se asignó un sistema de apariencia robusta y confiable así como de uso y montaje practico simple.

Después de determinar la geometría ultima de cada elemento de los dispositivos de acoplamiento, se procede con la generación de los planos de detalle, los cuales se pueden observar en el capítulo de anexos.

En la figura 38, se muestran los esfuerzos presentes bajo una carga aplicada por parte de la maquina universal de ensayos de 2700N, esto en el sistema de acoplamiento directo entre el dispositivo y la maquina universal (ubicado en la zona inferior), mientras que en la figura 39 y 40 se muestran los esfuerzos presentes en el acoplamiento de la zona superior presentes en los elementos que acoplan el dispositivo de pruebas biaxiales a la celda de carga y después la celda de carga a la maquina universal respectivamente.

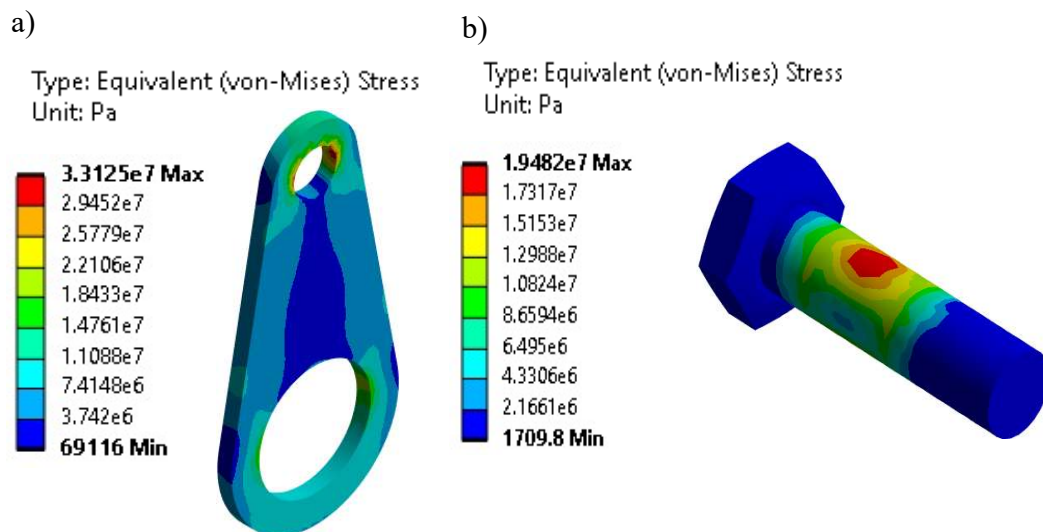


Figura 38. Esfuerzos bajo carga de 2700 N. en sistema de acoplamiento directo entre maquina y dispositivo. a) Eslabón, b) Tornillo estructural

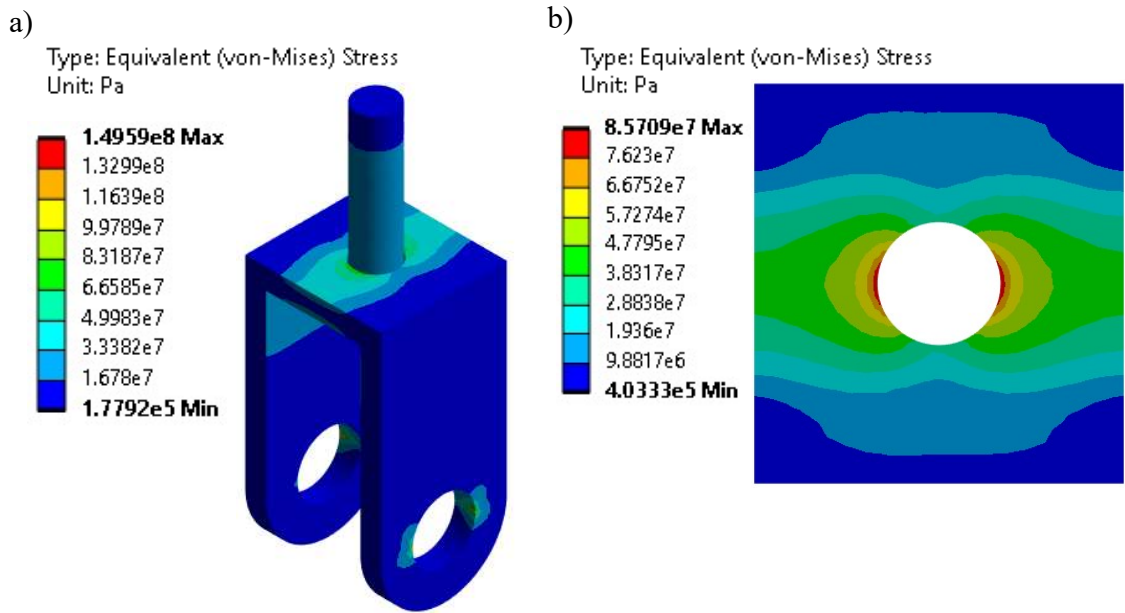


Figura 39. Esfuerzos bajo carga de 2700 N. en sistema de acoplamiento entre dispositivo de esfuerzos biaxial y celda de carga. a) Acoplamiento completo, b) Bastidor del acoplamiento

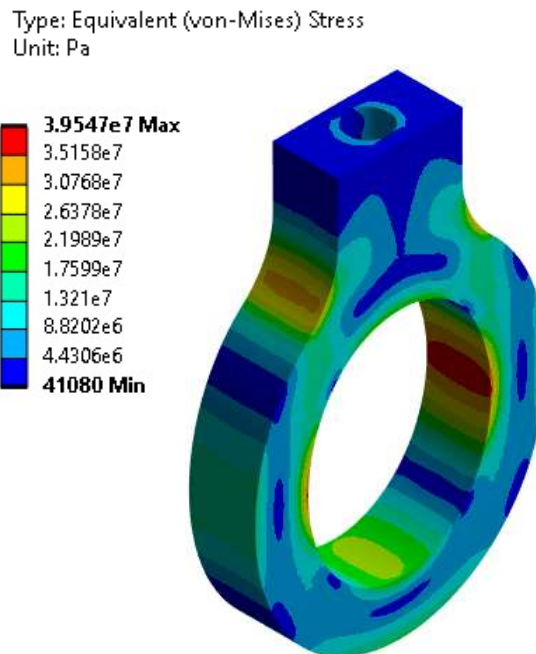


Figura 40. Esfuerzos bajo carga de 2700 N. en sistema de acoplamiento entre celda de carga y máquina universal

### 3.2.3 Fabricación de elementos de acoplamiento entre el dispositivo de ensayos biaxiales y la maquina universal de pruebas

El esquema del sistema acoplado se observa en la figura 41 donde se corrobora el espacio disponible para la implementación del dispositivo de pruebas biaxiales, estos procesos fueron realizados en conjunto desarrollo para evitar algún problema dimensional.

Diseñados los elementos de acoplamiento, se fabricaron estos utilizando los planos dispuestos en la sección de anexos, usando un acero A36, el acabado de estos elementos es maquinado con los bordes eliminados. Parte de lo calculado y definido fue la determinación y compra de los elementos de ensamble y metrología como lo son los tornillos, la celda de carga y el módulo indicador.

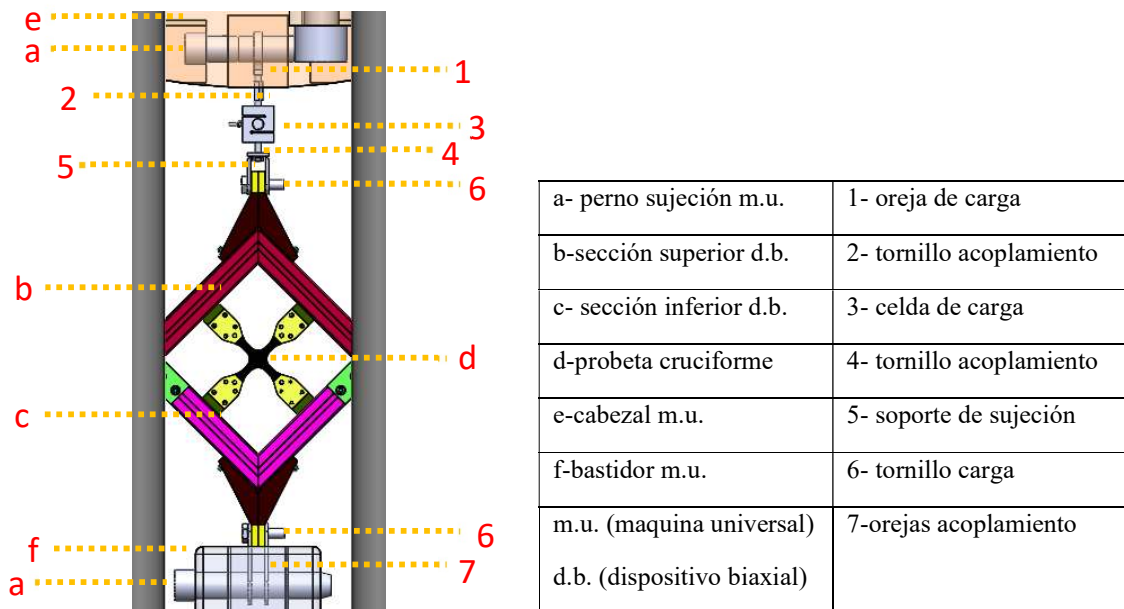


Figura 41. Esquema del dispositivo biaxial acoplado a la maquina universal.

## Capítulo IV Geometría y preparación de la probeta

### 4.1 Elección geométrica de la probeta considerando aluminio 6061-T6

#### 4.1.1 Aluminio 6061-T6

Para la elección geométrica de la probeta cruciforme, se realiza la simulación a través del software ANSYS. para la obtención máxima de fuerzas aplicables para cada una de las geometrías propuestas se designa un material del cual se extraen sus propiedades mecánicas.

De un ensayo uniaxial de una probeta de aluminio 6061-T6 se obtienen los siguientes valores esfuerzo-deformación, los cuales se proceden a asignar creando el material en la biblioteca de ANSYS workbench, en la figura 42 se observan los valores de los esfuerzos correspondientes a cada deformación plástica presentada, así como el esfuerzo en el límite elástico.

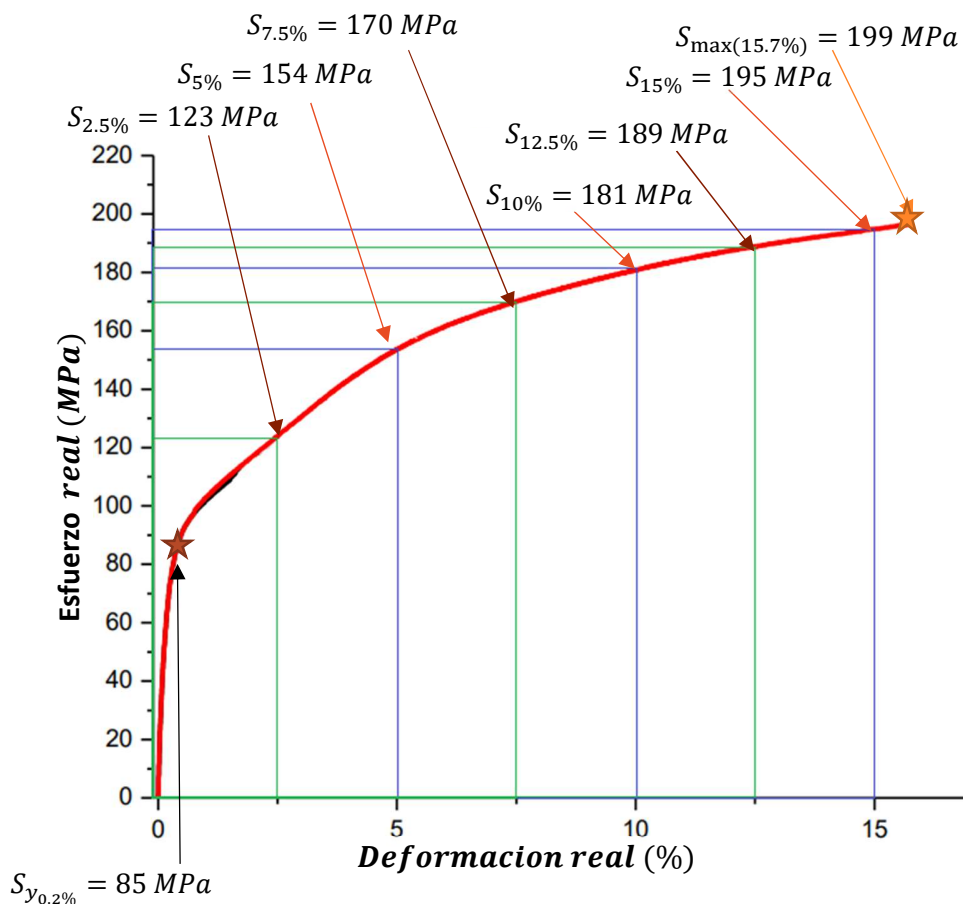


Figura 42. Esfuerzo-Deformación (reales) de aluminio 6061-T6.

### 4.1.2 Propuestas geométricas

Designado el material, se procede con la evaluación de variaciones significativas a la geometría posible de la probeta cruciforme, dichas variaciones producen las probetas mostradas en la figura 43, en la cual se destacan las cotas generales que definen su sección.

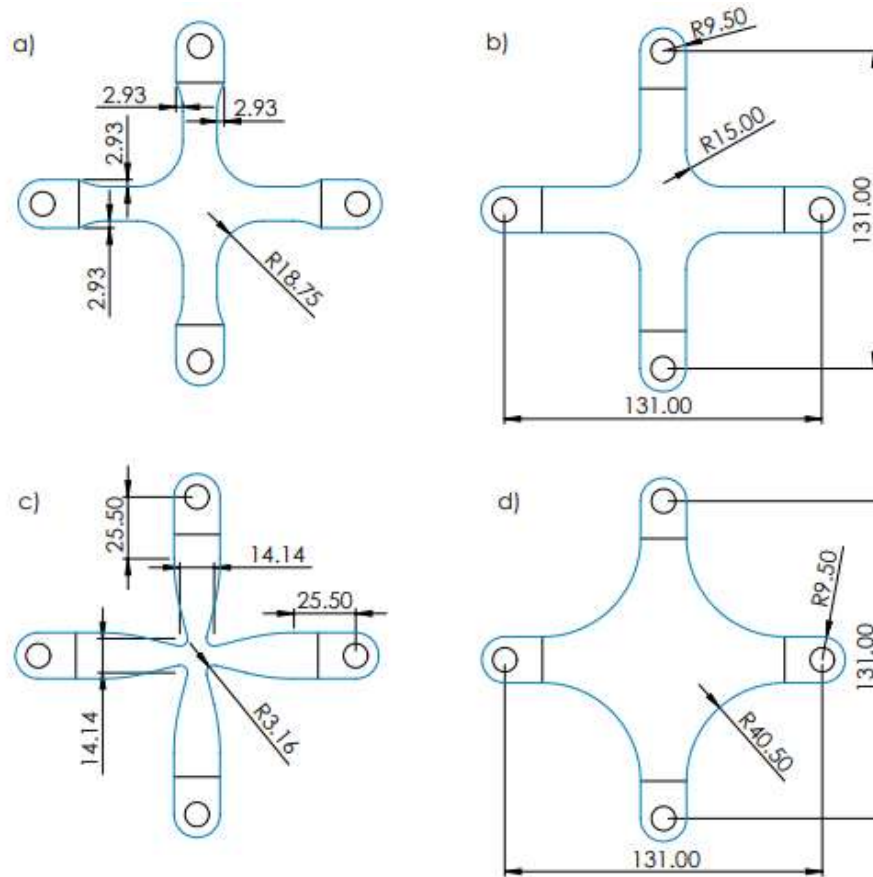


Figura 43. Geometría cruciforme. a) Probeta con reducción en zona de los brazos de la probeta, b) Probeta sin cambio de sección transversal en brazos, c) Probeta con reducción de sección en la zona central, d) Probeta con aumento en zona de brazos y central

Como características generales para la simulación del Aluminio 6061-T6 se tiene:

$$\sigma_y = 84 \text{ MPa}$$

$$E = 70 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0.34$$

$$T = 20^\circ\text{C}$$

$$t = 0.4 \text{ mm (Calibre 28)}$$



### 4.1.3 Análisis elástico y plástico

Se realiza primero una evaluación sobre las geometrías descritas en la figura 43, bajo las características generales para la simulación previamente descritas, de las cuales se obtienen las fuerzas máximas aplicables para cada uno de los casos antes de alcanzar 85 MPa de esfuerzo considerando únicamente una relación lineal en la fuerza. Dichos resultados se pueden observar en la tabla 5.

Después se calcula la fuerza máxima aplicable en las probetas antes de llegar a el esfuerzo ultimo de nuestro material, en la figura 44 se muestran las distribuciones de esfuerzos, los datos de las fuerzas obtenidas se recopilan en la tabla 5.

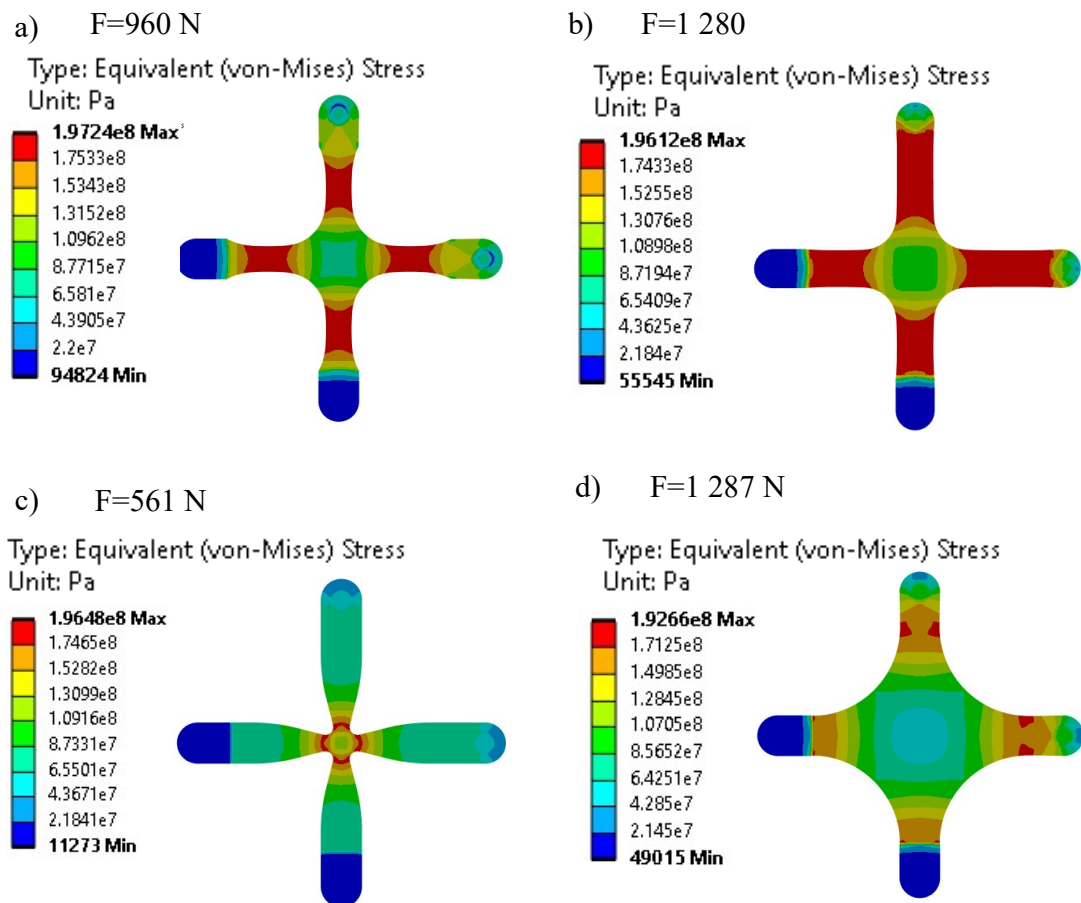


Figura 44. Distribución de esfuerzos. a) Fuerza aplicada de 960 N en configuración “A”, b) Fuerza aplicada de 1 280 N en configuración “B”, c) Fuerza aplicada de 561 N en configuración “C”, d) Fuerza aplicada de 1 287 N en configuración “D”



Configuración de la Probeta	Fuerza para alcanzar $S_y$ (N)	Fuerza para alcanzar $S_{ut}$ (N)
A	403	960
B	512	1 280
C	176	561
D	429	1 287

Tabla 5. Análisis de fuerza máxima permisible en probeta.

Basado en los resultados obtenidos se observa que las geometrías basadas en las configuraciones “B” y “D” ofrecen una mayor fuerza aplicable, para determinar cuál de las dos geometrías sería la apropiada a utilizar para los análisis subsecuentes, tomamos como factor importante que la probeta de configuración “B” ofrece mayores esfuerzos en la zona central de la probeta, que es donde se localiza la fisura, por lo cual se elige esta geometría.

#### 4.1.4 Análisis de deformación plástica sin fisura en la geometría seleccionada

Se simula la geometría seleccionada y se reproducen las condiciones de carga máxima posible antes de llegar al esfuerzo último y se solicita la deformación plástica equivalente, se obtiene la distribución de esta deformación a determinadas fuerzas como se muestra en la figura 45. Considerar que el color verde da inicio a una deformación plástica en la probeta.

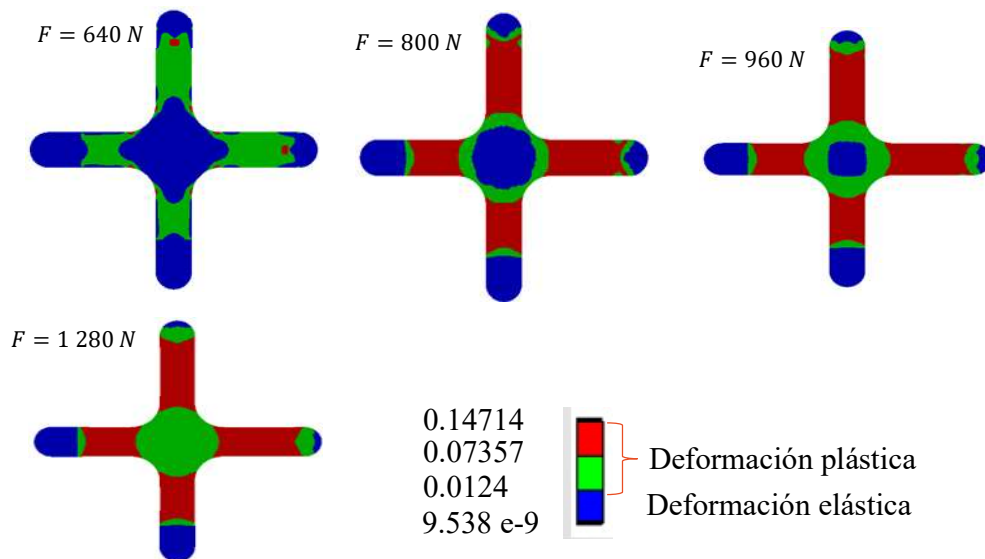


Figura 45. Evolución de la deformación plástica en probeta cruciforme.

#### 4.1.5 Creación de geometría cruciforme con comentarios usando el comando CINT

Se genera a través de comandos, un código que permita la sencilla reproducibilidad de la simulación numérica de la probeta cruciforme sometida a carga biaxial, dicho código permite con un mínimo de modificaciones la reproducibilidad sencilla de la simulación en ANSYS APDL, el código descrito a continuación representa la geometría previamente definida con una fisura central de longitud inicial de 3 mm, orientada a 45 grados respecto al eje horizontal, el cual tiene solución para los intensificadores de esfuerzo a través del comando CINT:

/PREP7 !Modulo de preproceso

a=0.0015 !variable definida que indica la mitad de la longitud de la grieta

pi=3.14159265358979 !Constante pi definida

alfa=45 !Se define el Angulo de variación de la grieta

ET,1,PLANE183 !Se crea el primer tipo de elemento que se usara

KEYOPT,1,1,0 !Para el elemento 1 creado se designa “cuadrilateral” para la forma

KEYOPT,1,3,3 !Para el elemento 1 creado se designa “plane stress with thickness” para el comportamiento

KEYOPT,1,6,0 !Para el elemento 1 creado se designa “pure displacement” para la formulación

R,1,0.0004547, !Se asigna el espesor a nuestra geometría a definir.

MPTEMP,,,,,,,,, !Se entra a la carpeta de

Material model\_Structural\_Linear\_Elastic\_Isotropic.

MPTEMP,1,0 !Se define el primer campo a utilizar sin temperatura designada

MPDATA,EX,1,,7E4 !Se da el valor de 70 000 Megapascales para el módulo de Young

MPDATA,PRXY,1,,0.33 !Se asigna el de 0.33 para el coeficiente de poisson

!Dentro del modulo de preproceso se procede con la creación de los nodos que delimitan el perímetro externo de nuestra probeta

K,1,0.075,0

K,2,0.07221751,0.00671751

K,3,0.0655,0.0095

K,4,0.0505,0.0095

K,5,0.0345,0.0095

K,6,0.02493291,0.01140301

K,7,0.01682233,0.01682233

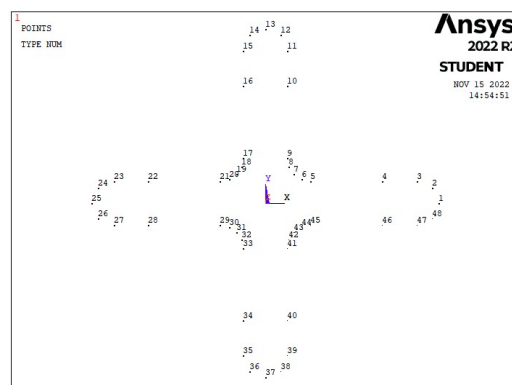


Figura 46. Nodos perimetrales de geometría

K,8,0.01140301,0.02493291  
K,9,0.0095,0.0345  
K,10,0.0095,0.0505  
K,11,0.0095,0.0655  
K,12,0.00671751,0.07221751  
K,13,0,0.075  
K,14,-0.00671751,0.07221751  
K,15,-0.0095,0.0655  
K,16,-0.0095,0.0505  
K,17,-0.0095,0.0345  
K,18,-0.01140301,0.02493291  
K,19,-0.01682233,0.01682233  
K,20,-0.02493291,0.01140301  
K,21,-0.0345,0.0095  
K,22,-0.0505,0.0095  
K,23,-0.0655,0.0095  
K,24,-0.07221751,0.00671751  
K,25,-0.075,0  
K,26,-0.07221751,-0.00671751  
K,27,-0.0655,-0.0095  
K,28,-0.0505,-0.0095  
K,29,-0.0345,-0.0095  
K,30,-0.02493291,-0.01140301  
K,31,-0.01682233,-0.01682233  
K,32,-0.01140301,-0.02493291  
K,33,-0.0095,-0.0345  
K,34,-0.0095,-0.0505  
K,35,-0.0095,-0.0655  
K,36,-0.00671751,-0.07221751  
K,37,0,-0.075  
K,38,0.00671751,-0.07221751  
K,39,0.0095,-0.0655

- K,40,0.0095,-0.0505
- K,41,0.0095,-0.0345
- K,42,0.01140301,-0.02493291
- K,43,0.01682233,-0.01682233
- K,44,0.02493291,-0.01140301
- K,45,0.0345,-0.0095
- K,46,0.0505,-0.0095
- K,47,0.0655,-0.0095
- K,48,0.07221751,-0.00671751

!Se procede a la creación de líneas que definen el perímetro externo de la geometría

- LARC,1,3,2
- L,3,4
- L,4,5
- LARC,5,7,6
- LARC,7,9,8
- L,9,10
- L,10,11
- LARC,11,13,12
- LARC,13,15,14
- L,15,16
- L,16,17
- LARC,17,19,18
- LARC,19,21,20
- L,21,22
- L,22,23
- LARC,23,25,24
- LARC,25,27,26
- L,27,28
- L,28,29
- LARC,29,31,30
- LARC,31,33,32
- L,33,34

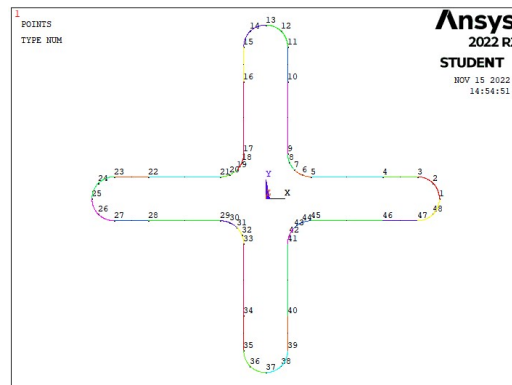


Figura 47. Líneas de perímetro exterior

- L,34,35
- LARC,35,37,36
- LARC,37,39,38
- L,39,40
- L,40,41
- LARC,41,43,42
- LARC,43,45,44
- L,45,46
- L,46,47
- LARC,47,1,48

!Se utilizan líneas que delimitaran las áreas internas de la geometría correspondientes al seccionamiento de los brazos de la probeta

- L,46,4
- L,45,5
- L,29,21
- L,28,22
- L,16,10
- L,17,9
- L,33,41
- L,34,40

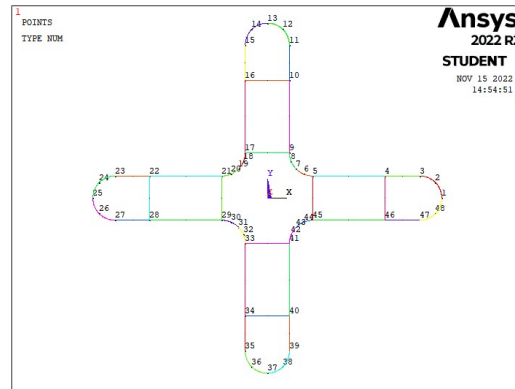


Figura 48. Líneas intermedias de la geometría

!Se crean los nodos pertenecientes a la región central de la probeta, los cuales servirán de apoyo para la generación de la fisura así como para la segmentación de los cuadrantes cercanos.

- K,49,a\*cos(pi\*alfa/180),a\*sin(pi\*alfa/180)
- K,50,a\*0.5\*cos(pi\*alfa/180),a\*0.5\*sin(pi\*alfa/180)
- K,51,0,0
- K,52,-a\*0.5\*cos(pi\*alfa/180),-a\*0.5\*sin(pi\*alfa/180)
- K,53,-a\*cos(pi\*alfa/180),-a\*sin(pi\*alfa/180)
- K,54,a\*0.5\*cos(pi\*alfa/180),a\*0.5\*sin(pi\*alfa/180)
- K,55,0,0
- K,56,-a\*0.5\*cos(pi\*alfa/180),-a\*0.5\*sin(pi\*alfa/180)

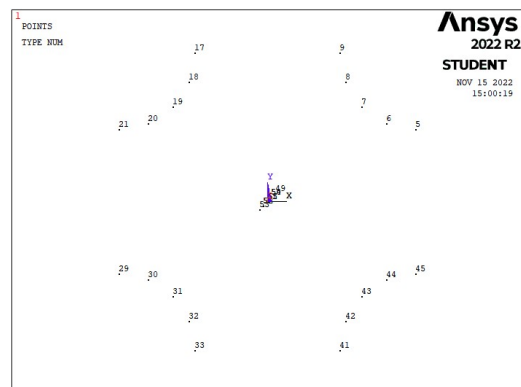


Figura 49. Nodos de la grieta

!Se crean las líneas que limitan el centro de la probeta que involucra la creación de la grieta.

- L,7,19
- L,19,31
- L,31,43
- L,43,7
- L,49,7
- L,53,31
- L,51,19
- L,55,43
- L,49,50
- L,50,51
- L,51,52
- L,52,53
- L,49,54
- L,54,55
- L,55,56
- L,56,53

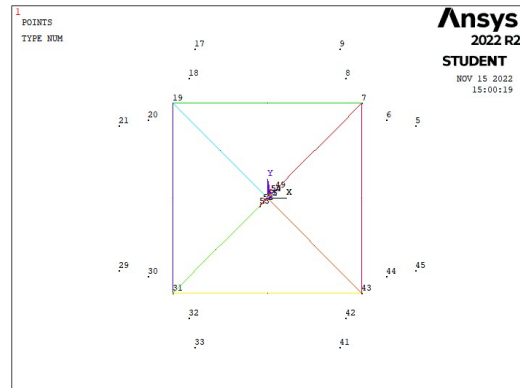


Figura 50. Líneas centrales y líneas de grieta

!Definidos todos los Keypoints y líneas de la geometría, procedemos al seccionamiento por áreas.

- AL,1,2,33,31,32
- AL,3,34,30,33
- AL,4,44,29,34
- AL,13,35,20,42
- AL,14,36,19,35
- AL,15,16,17,18,36
- AL,9,10,37,7,8
- AL,11,38,6,37
- AL,12,41,5,38
- AL,21,39,28,43
- AL,22,40,27,39
- AL,23,24,25,26,40
- AL,45,41,47,50,49
- AL,46,42,47,51,52
- AL,46,43,48,55,56

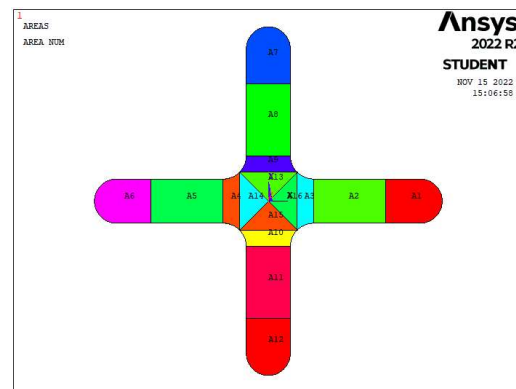


Figura 51. Áreas de discretización

AL,45,44,48,54,53

!Se asignan tamaños de malla acorde a los requerimientos de la zona.

KSCON,49,a/16,1,8,0, !Mallado basado en el frente de la grieta, con una distribución de elementos pensada para el tipo de análisis

KSCON,53,a/16,1,8,0,

FLST,2,4,5,ORDE,4

FITEM,2,1

FITEM,2,6

FITEM,2,-7

FITEM,2,12

AESIZE,P51X,0.002, !Tamaño de malla asignado a las áreas previamente listadas

FLST,2,4,5,ORDE,4

FITEM,2,2

FITEM,2,5

FITEM,2,8

FITEM,2,11

AESIZE,P51X,0.0015,

FLST,2,8,5,ORDE,6

FITEM,2,3

FITEM,2,-4

FITEM,2,9

FITEM,2,-10

FITEM,2,13

FITEM,2,-16

AESIZE,P51X,0.001,

MSHKEY,0

FLST,5,16,5,ORDE,2

FITEM,5,1

FITEM,5,-16

CM,\_Y,AREA

ASEL, , , P51X

CM,\_Y1,AREA

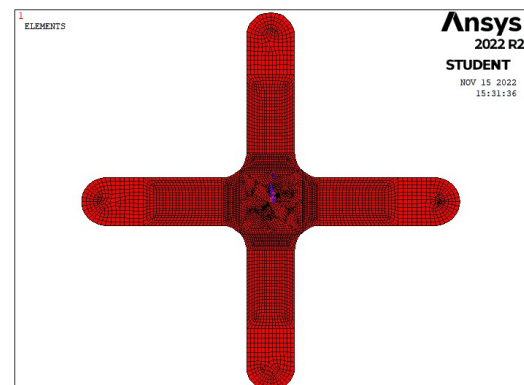


Figura 52. Geometría mallada

```
CHKMSH,'AREA'
```

```
CMSEL,S,_Y
```

```
AMESH,_Y1
```

```
CMDELE,_Y
```

```
CMDELE,_Y1
```

```
CMDELE,_Y2
```

!Se definen los nodos pertenecientes a las áreas que definen las condiciones de frontera y se asignan las condiciones de frontera

```
NSEL,ALL
```

```
NSEL,S,LOC,X,0.05,0.08
```

```
CM,Force_X_Nodes,NODE
```

```
CMSEL,A,Force_X_Nodes
```

```
NSEL,ALL
```

```
NSEL,S,LOC,Y,0.05,0.08
```

```
CM,FORCE_Y_NODES,NODE
```

```
CMSEL,A,FORCE_Y_NODES
```

```
NSEL,ALL
```

```
/REPLOT
```

```
NPLOT
```

```
FLST,2,1,5,ORDE,1
```

```
FITEM,2,6
```

```
DA,P51X,UX,0
```

```
FLST,2,1,5,ORDE,1
```

```
FITEM,2,12
```

```
DA,P51X,UY,0
```

```
FLST,2,1,9,ORDE,1
```

```
FITEM,2,1
```

```
F,P51X,FX,2.416254102E-06
```

```
FLST,2,1,9,ORDE,1
```

```
FITEM,2,2
```

```
F,P51X,FY,2.582075462E-06
```

!Se asigna nombre al nodo ubicado en el frente de la grieta

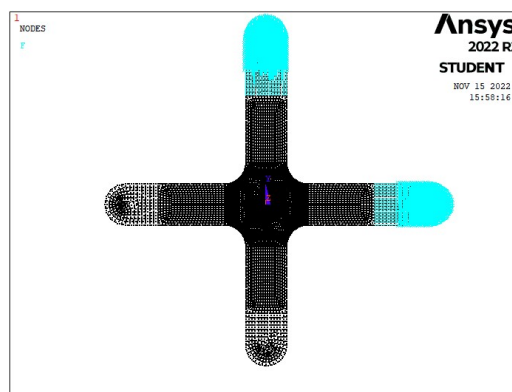


Figura 53. Condiciones de frontera



```
NSEL,S,LOC,X,a*cos(pi*alfa/180)
```

```
NSEL,R,LOC,Y,a*sin(pi*alfa/180)
```

```
CM,CRACK,NODE
```

```
NSEL,ALL
```

*!Se crea un sistema de coordenadas auxiliar para la impresión futura de resultados*

```
CS,11,0,11116,11117,11654,1,1,
```

```
CSYS,11,
```

*!Se determinan las características para la obtención de resultados, el modelo de solución, el numero de contornos cercano al frente de la grieta*

```
CINT,NEW,1
```

```
CINT,CTNC,CRACK
```

```
CINT,TYPE,SIFS
```

```
CINT,NORMAL,11,2
```

```
CINT,NCONTOUR,20
```

```
CINT,SYMM,OFF
```

```
OUTRES,CINT
```

```
FINISH
```

*/SOL !Entramos al módulo de soluciones*

```
/STATUS,SOLU
```

*SOLVE !Se procede a dar solución al modelo establecido*

```
FINISH
```

*/POST1 !Entramos al módulo de post proceso*

```
SET,LAST
```

```
RSYS,11
```

```
AVPRIN,0
```

```
AVRES,2,
```

```
/EFACET,1
```

```
LAYER,0
```

```
FORCE,TOTAL
```

*PLNSOL, S,EQV, 0,1.0 !Se grafican los esfuerzos*

*PRCINT,1,,K1 !Se llaman el valor del intensificador de esfuerzo k1*

*PRCINT,1,,K2 !Se llaman el valor del intensificador de esfuerzo k2*

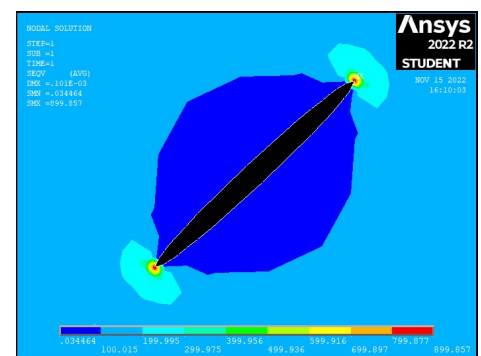


Figura 54. Representación de la grieta

### 4.1.6 Análisis de fuerza aplicable a probeta con fisura central a 45°

Se evalúan diferentes casos, variando como parámetros la sección de la probeta, la fuerza a aplicar y la longitud inicial de la muesca que inducirá la fisura.

Caso 1

Radio del contorno de la probeta (30 mm)

Longitud inicial de grieta (10 mm)

Fuerza aplicada (1 500 N)

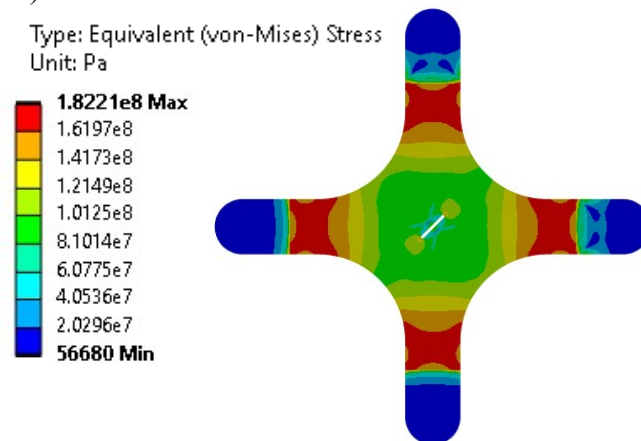


Figura 55. Distribución de esfuerzos en probeta cruciforme, caso 1.

Caso 2

Radio del contorno de la probeta (30 mm)

Longitud inicial de grieta (30 mm)

Fuerza aplicada (1 400 N)

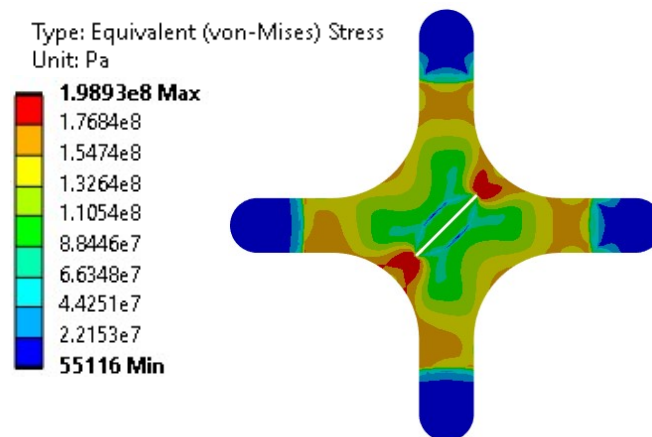


Figura 56. Distribución de esfuerzos en probeta cruciforme, caso 2.

Caso 3

Radio del contorno de la probeta (10 mm)

Longitud inicial de grieta (10 mm)

Fuerza aplicada (1 300 N)

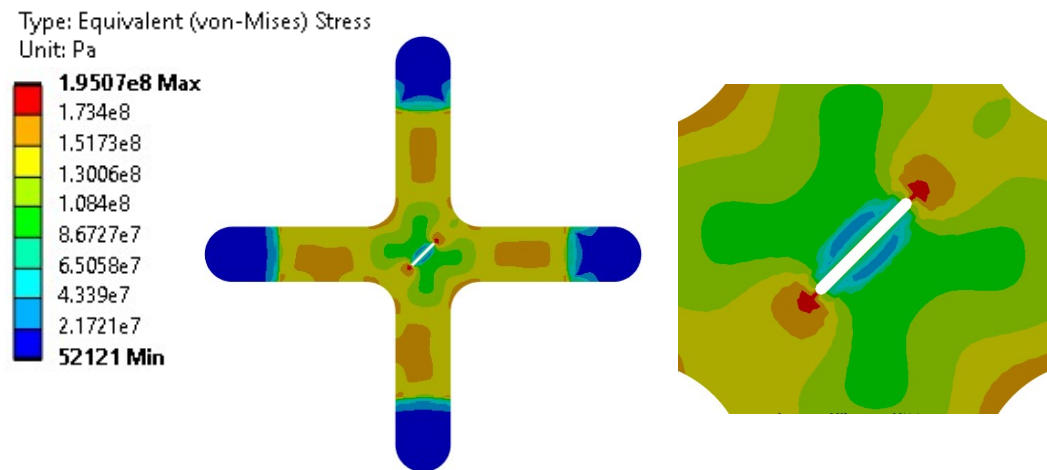


Figura 57. Distribución de esfuerzos en probeta cruciforme, caso 3.

Caso 4

Radio del contorno de la probeta (10 mm)

Longitud inicial de grieta (30 mm)

Fuerza aplicada (700 N)

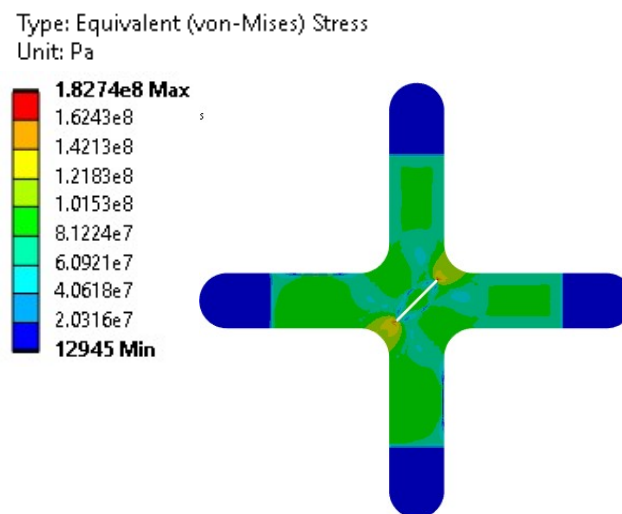


Figura 58. Distribución de esfuerzos en probeta cruciforme, caso 4.

Caso 5

Zona con reducción en zona central

Longitud inicial de grieta (5 mm)

Fuerza aplicada (500 N)

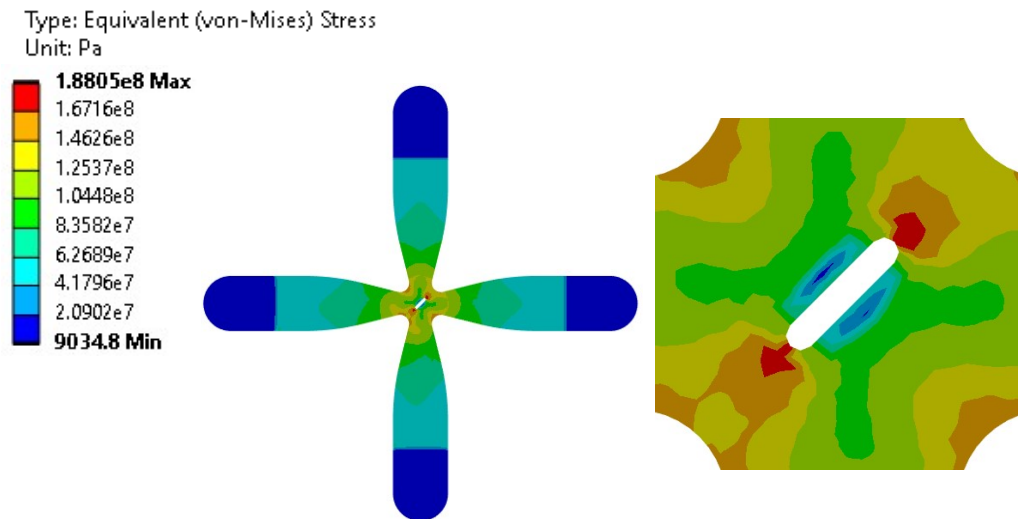


Figura 59. Distribución de esfuerzos en probeta cruciforme, caso 5.

Caso 6

Zona con reducción en zona central

Longitud inicial de grieta (10 mm)

Fuerza aplicada (260 N)

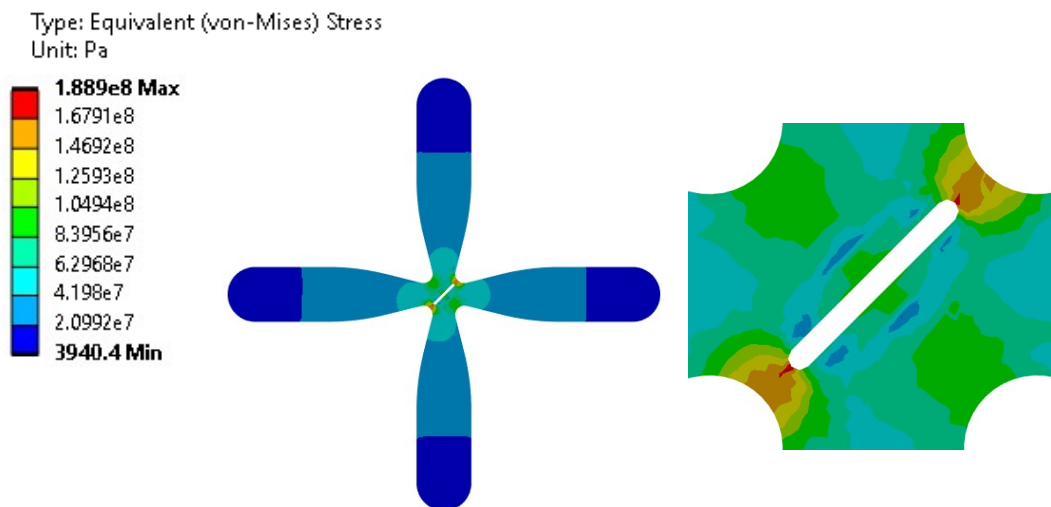


Figura 60. Distribución de esfuerzos en probeta cruciforme, caso 6.

Caso 7

Geometría optimizada para elastómero

Longitud inicial de grieta (5 mm)

Fuerza aplicada (600 N)

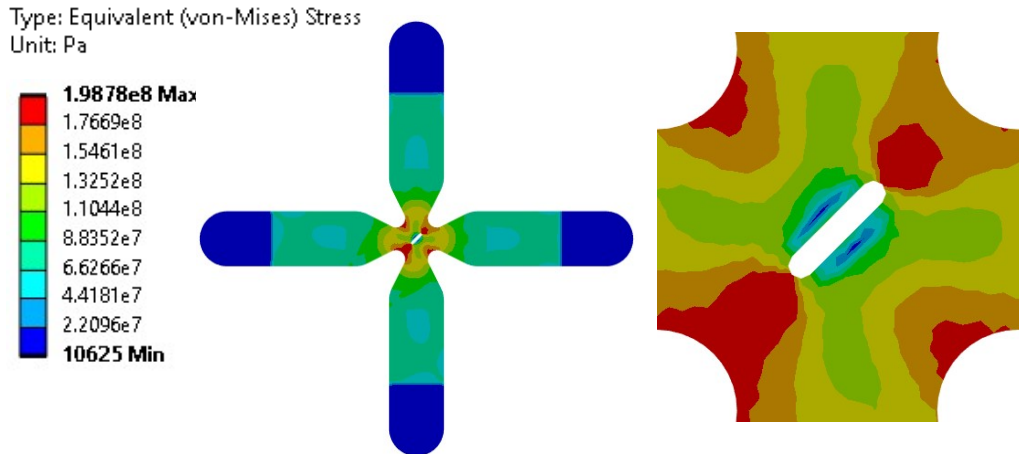


Figura 61. Distribución de esfuerzos en probeta cruciforme, caso 7.

Analizando de manera contigua estos resultados con los valores máximos alcanzados de los intensificadores de esfuerzos para las diferentes geometrías, así como al hacer variar parámetros en ellos como radio del perímetro de la probeta, posición de la fisura central y su longitud inicial, tenemos definida la geometría final con la cual se realizarán las pruebas experimentales. A continuación, se muestra en la figura 62 el gráfico que representa el radio del perímetro de la probeta.

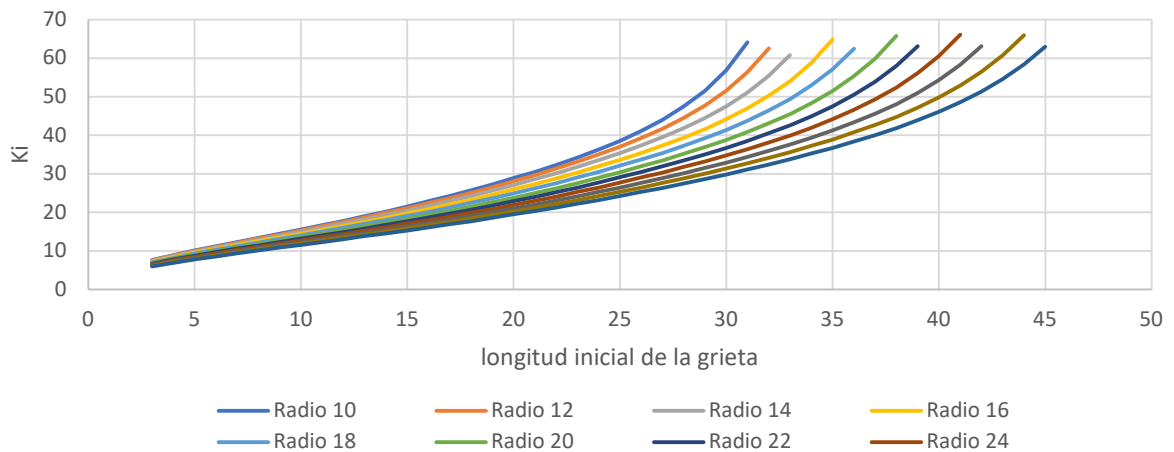


Figura 62. Gráfico de las curvas de valor de intensificador de esfuerzo al variar el radio del perímetro de la probeta

Se realizan las simulaciones en APDL de las probetas bajo las condiciones reproducibles experimentalmente, y los resultados que se obtienen de los intensificadores de esfuerzos se muestran en esta sección.

Primero se realiza una comparación entre dos procesos para la obtención de los intensificadores de esfuerzos en este módulo de ANSYS, uno es a través de los contornos en el frente de la grieta usando el comando CINT, el otro método analiza los esfuerzos trazando una ruta definida por los nodos que caracterizan el frente de la grieta usando el comando KCALC. Obteniendo como resultados las imágenes 63 y 64 donde los valores del intensificador de esfuerzo KI y KII respectivamente.

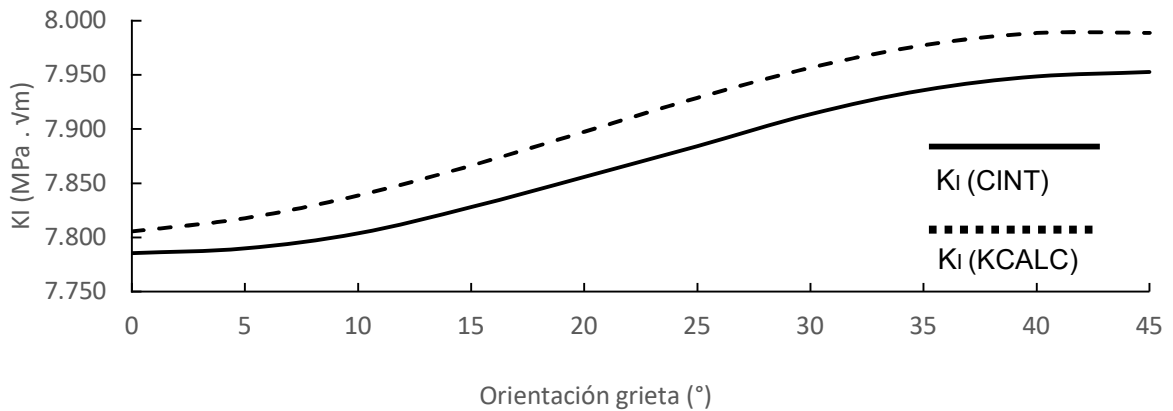


Figura 63. Comparación de procesos para Intensificador de esfuerzo (modo I) en grietas con longitud inicial de 5 mm

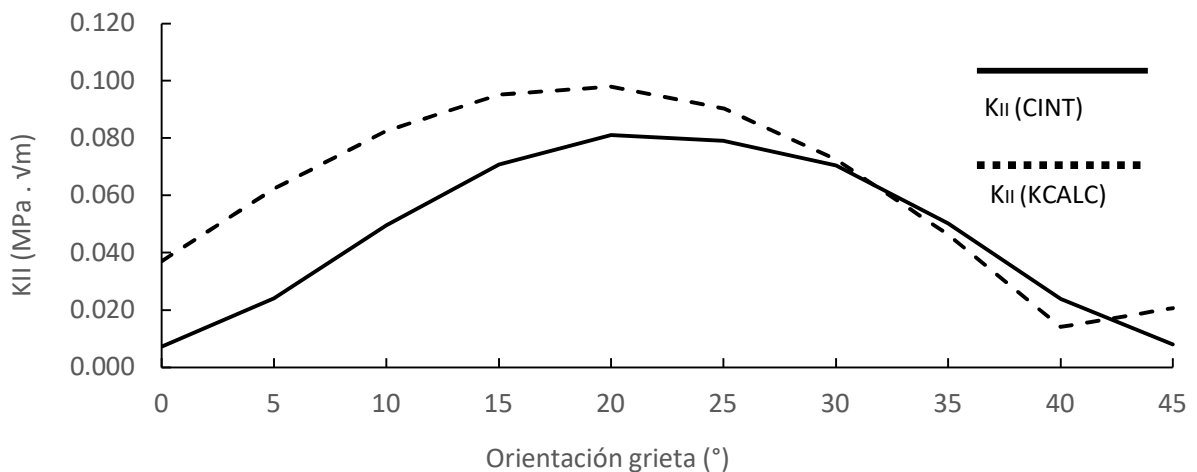


Figura 64. Comparación de procesos para Intensificador de esfuerzo (modo II) en grietas con longitud inicial de 5 mm.

Se elige la solución por el comando CINT y se compara la variación de los valores de los intensificadores de esfuerzo en las posiciones de valores máximos, presentadas a 22.5 y 45° respecto a la horizontal.

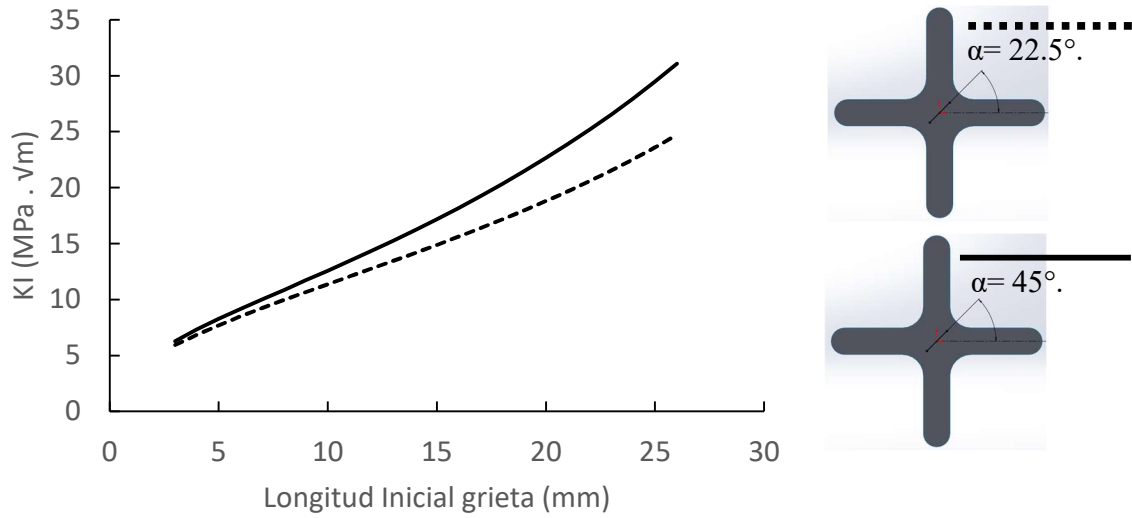


Figura 65. Intensificador de esfuerzo (modo I) en grietas orientadas con  $\alpha=45^\circ$  &  $\alpha=22.5^\circ$

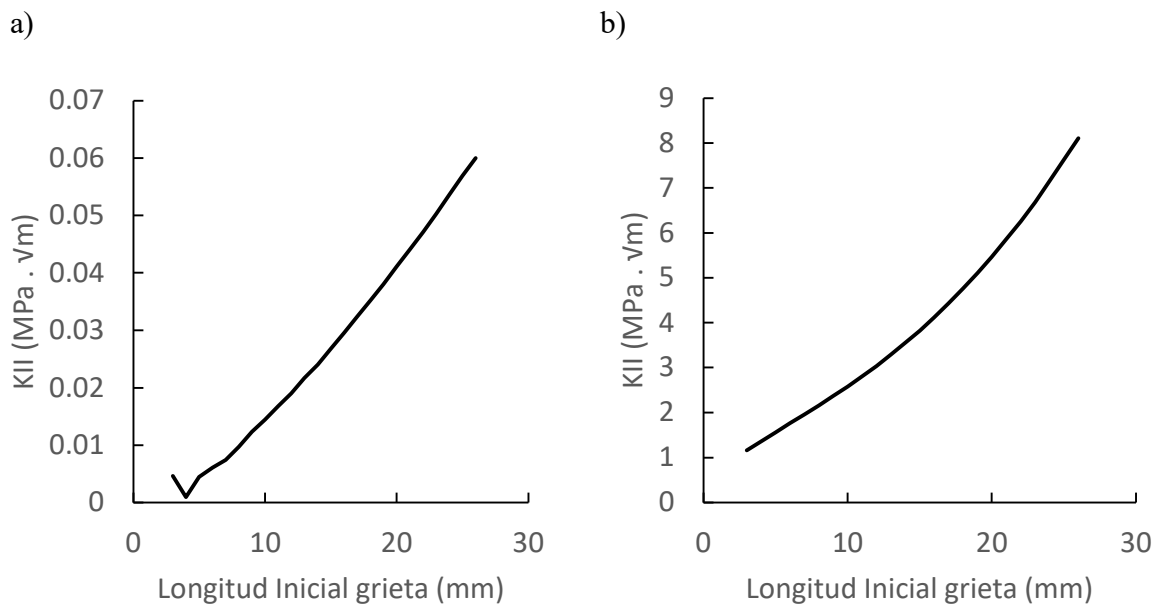


Figura 66. Intensificador de esfuerzo (modo II) en grieta orientada a)  $\alpha=45^\circ$ , b)  $\alpha =22.5^\circ$

Determinada la longitud mínima de fisura a la cual se obtendrá un valor cercano al crítico del intensificador de esfuerzo, se procede a evaluar las curvas de longitudes iniciales en un rango de 20 a 26 mm, y ver el comportamiento de estas al variar la orientación de la grieta, teniendo como resultado para el modo I de intensificador de esfuerzo la figura 67 y para el modo II la figura 68.

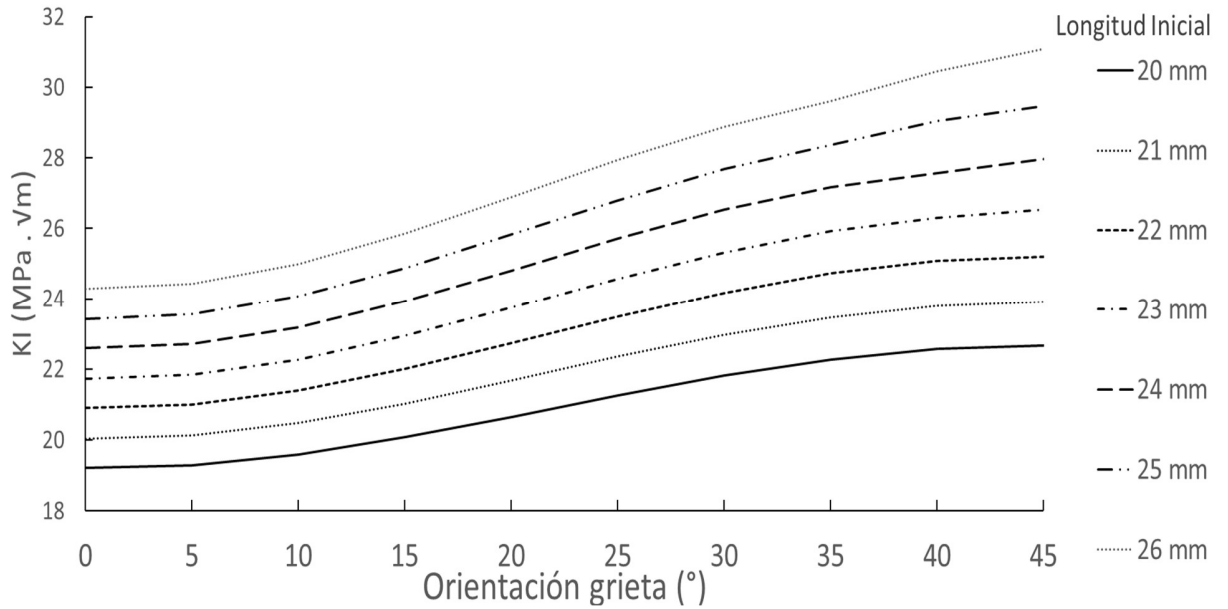


Figura 67. Intensificador de esfuerzo (modo I) en grieta con diferentes longitudes iniciales

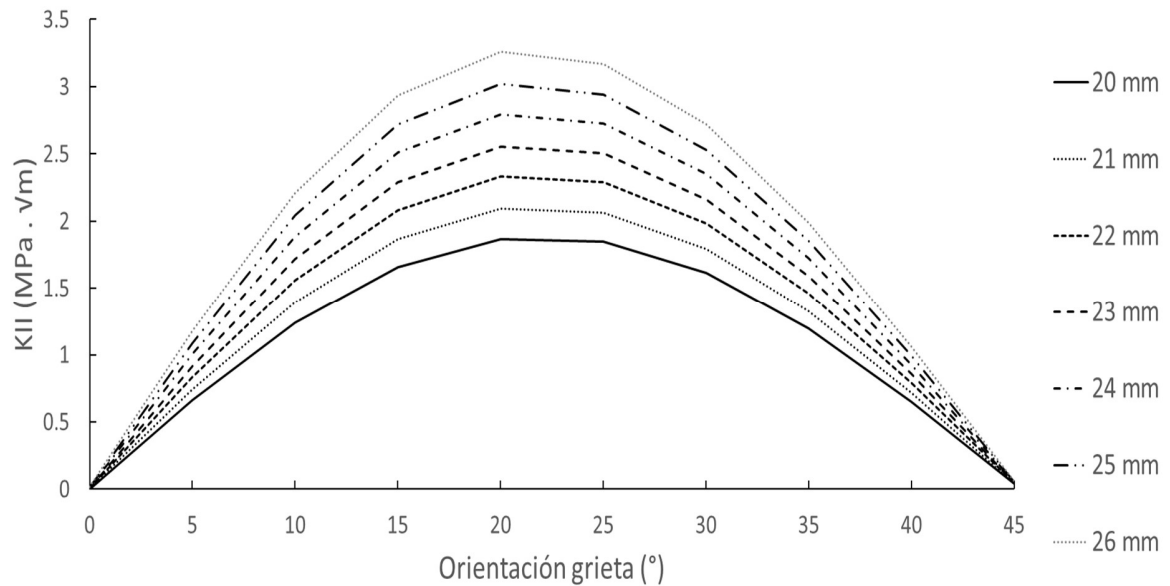


Figura 68. Intensificador de esfuerzo (modo II) en grieta con diferentes longitudes iniciales



#### 4.1.7 Distribución del material en una plancha de lámina con medidas de 3' x 8'

Se realiza la proyección para obtener un mejor aprovechamiento del material a comprar, como se requieren calibres con espesores menores a 1 mm, se realiza un sondeo de disponibilidad de materiales laminares que cumplan con el espesor deseado, a partir de este estudio se prevé un tamaño mínimo de la hoja de lámina a adquirir.

Se modula la geometría de la probeta elegida y se dispone con diferentes distribuciones eligiendo la distribución que genere el menor desperdicio, determinado el rango de probetas posibles a obtener en esta distribución se procede con la descripción de la variación de la fisura central y se anexan un par de casos de geometrías diferentes para poder analizar experimentalmente la mayor cantidad de fenómenos que se piensa sucederán.

Descripción de cortes	
Cantidad	Descripción
10	Fisura a 0°, radio 10
10	Fisura a 5°, radio 10
10	Fisura a 10°, radio 10
10	Fisura a 15°, radio 10
10	Fisura a 20°, radio 10
10	Fisura a 25°, radio 10
10	Fisura a 30°, radio 10
10	Fisura a 35°, radio 10
10	Fisura a 40°, radio 10
10	Fisura a 45°, radio 10
5	Sin fisura, radio 10
5	Sin fisura, radio 15
5	Sin fisura, radio 20
5	Sin fisura, radio 25
5	Sin fisura, radio 30
5	Fisura a 45°, radio 30
10	Sin fisura, Geometría B
10	Fisura a 45°, Geometría B
10	Ensayo tracción Vertical
10	Ensayo tracción Hor.

Tabla 6. Cuantificación de probetas a ensayar.

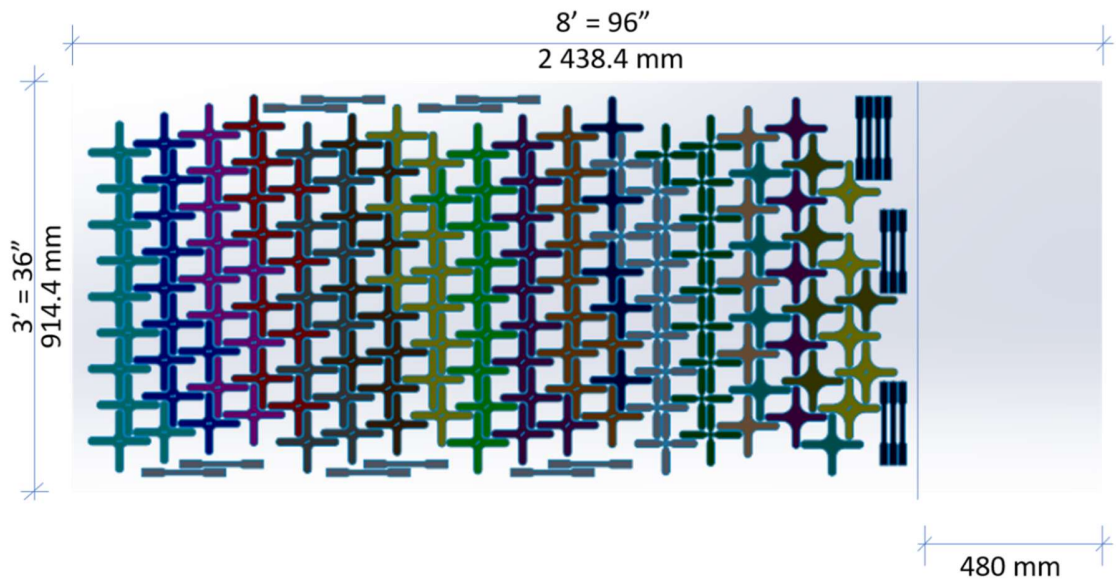


Figura 69. Distribución de probetas en lámina de 914 mm por 2 440 mm.

#### 4.1.8 Manufactura de las probetas

Se compraron dos láminas de materiales diferentes; lamina negra de un calibre 26 y aluminio 3003 de un calibre 24, estos materiales se llevaron al taller donde se manufacturaron las probetas utilizando una máquina de corte CNC (Control Numérico Computarizado).

Para el proceso de limpieza se tuvieron que eliminar los bordes remanentes al corte, utilizando primeramente una lima para quitar los elementos de mayor tamaño, lo remanente a este primer proceso se retiró utilizando una lija para metales con numeración 320 para eliminar los bordes restantes, finalmente los detalles y el acabado se realizaron con lijas de numeración 1000 y 2000 en dicho orden.



Figura 71. Importación del CAD a máquina CNC



Figura 70 Ensayo de corte para evaluar la muesca (fisura)

#### 4.1.9 Moteado de probetas biaxiales

Como parte inicial al proceso de pruebas experimentales se diseñó el sistema de acoplamiento entre maquina universal y dispositivo de pruebas biaxiales, se configuro la celda de carga para obtener valores con 2 cifras después del punto, en un orden de cientos en unidades, se hicieron pruebas de acondicionamiento (iluminación, fondo, y acceso para el equipo con el que se grabaran las pruebas), y en lo que concierne a la transición de tener las probetas cortadas hasta un sistema de pruebas realizada organizado se realizaron pasos que con la repetición del proceso se acondicionaron a modo de protocolo de preparación y administración de archivos, este proceso se describe a continuación:

1. Se ordenan las probetas de acuerdo a el tipo geométrico que representen y las probetas focales del estudio se ordenan de acuerdo a la posición de la fisura adicionalmente.



Figura 72. Probeta con fisura a 20°

2. Se les da el proceso de limpieza a las probetas, comenzando con una lima pequeña que ayude a quitar el borde excesivo de material, causado por el corte de la probeta, es decir se desbasta suavemente con la lima todo el perímetro de la probeta, así como la zona central que contiene la fisura, posterior a ello se da una pequeña limpieza evitando desbastar el espesor de las probetas así como teniendo el cuidado de no dañar o doblar la probeta, este proceso se realiza con primeramente una lija para metal de 360, posterior una 1000 y finalmente una 2000.



Figura 73. Probeta con fisura a 20° limada y lijada

3. Se coloca una protección en los cuatro extremos que estarán dispuestos a la sujeción de la probeta por las mordazas del dispositivo de pruebas biaxial, esto se realizó para evitar que la pintura causara una ineficiente sujeción que llevara a una prueba fallida.



Figura 74. Probeta con fisura a 20° con extremos protegidos

4. Se aplica una base esmalte acrílico en aerosol de color negro mate, se otorga un tiempo de secado de aproximadamente 5 minutos y se aplica una segunda capa para tener una aplicación de la base homogénea, se le otorga un mayor tiempo de secado a la segunda aplicación de pintura teniendo un lapso de espera antes de la siguiente capa de pintura de 30 a 45 minutos.



Figura 75. Probeta con fisura a 20° con base de esmalte negro mate

5. A una distancia de 40 centímetros respecto a la horizontal y 15 centímetros de la vertical, con la probeta dispuesta en el plano normal a la gravedad, se presiona suavemente el aspersor del esmalte acrílico en aerosol de color blanco mate, provocando que la pintura salga no completamente pulverizada, conservando en las gotas rociadas un tamaño aproximado promedio de 1 milímetro, este proceso se aplica hasta conseguir un moteado del color blanco que llene de un 40% a un 50% del total del área lo más proporcionalmente distribuido, se otorga un tiempo de secado de 30 a 45 minutos para asegurar que a la manipulación de la probeta no exista afectación en la zona pintada.



Figura 76. Probeta con fisura a 20° con moteado en color blanco mate

6. Se marca la probeta utilizando en la parte posterior a la zona pintada, de acuerdo a la nomenclatura establecida la cual determina el tipo de probeta, la orientación de la fisura, el material del que está hecha y el número de probeta correspondiente.



Figura 77. Probeta con fisura a 20° marcada con nomenclatura correspondiente

## Capítulo V Simulación numérica

### 5.1 Análisis de probeta sin fisura

Para poder determinar la fuerza con la que se simulara la prueba en APDL (Ansys Parametric Design Language) por sus siglas en inglés, se obtienen previamente de una geometría diseñada en el programa Solid Works que represente la probeta biaxial, presentada como una superficie plana y exportada en su formato parasolid, para ver los detalles de la geometría véase en anexos el plano de este archivo.

Se crea un proyecto nuevo en el módulo de workbench de ansys, se resuelve por medio de un análisis estático estructural con propiedades geométricas en dos dimensiones, previo a establecer las condiciones de frontera se asignan las propiedades mecánicas que se obtuvieron, creando un nuevo material y asignándole los valores, para este primer análisis se creara un material el cual se considerara linealizado utilizando los siguientes valores.

Propiedad	Valor
$\sigma_y$	156.4 MPa
$\nu$	0.33
$E$	33.7 GPa

Tabla 7. Propiedades mecánicas del aluminio 3003

Se asigna el material creado y se modifica el espesor de la probeta el cual se corrobora tomando medidas del espesor de un muestreo de 10 probetas utilizando un vernier, lo que nos arrojó un promedio, media y moda de 0.55 mm, lo cual corresponde con una variación de 0.01mm menor al dato que se encuentra correspondiente al calibre 24 en láminas de aluminio, dicho valor viene especificado en la descripción técnica de la factura.

Se establecen ahora las condiciones de frontera estableciendo restricciones de desplazamiento en dos de los brazos que mantienen ortogonalidad entre ellos, mientras que en los extremos opuestos a estos se establece una fuerza propuesta que hará trabaja bajo tensión a la probeta, tal como se muestra en la figura 78.

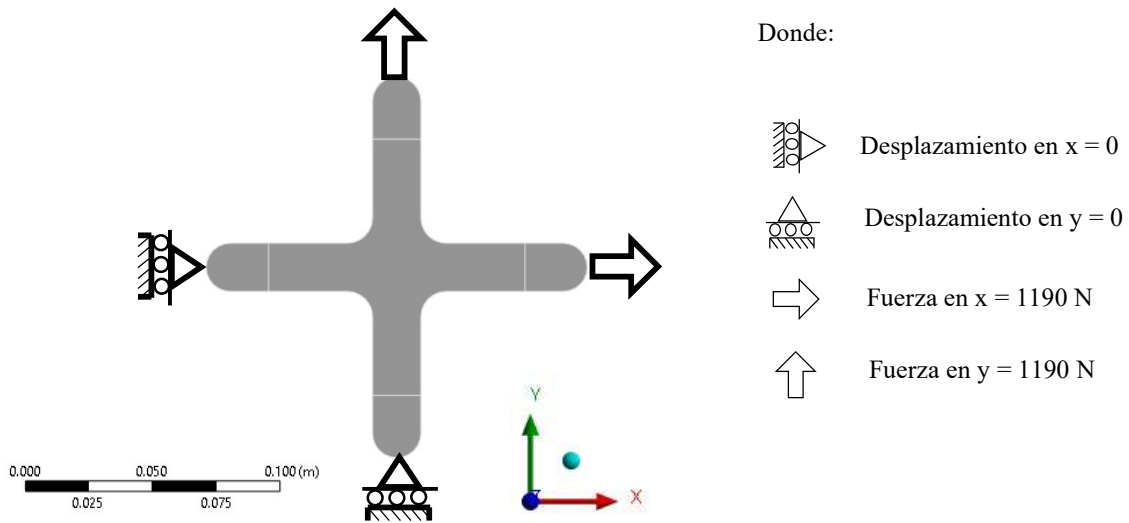


Figura 78. Esquema de condiciones de frontera

Se obtiene un esfuerzo proporcional a la fuerza, el cual al considerar que estamos en el límite elástico podemos aproximar al valor deseado del límite de cedencia para poder determinar en una probeta sin fisura cual sería la fuerza límite a aplicar antes de llegar a la deformación plástica de nuestra probeta. Obteniendo como resultado la figura 79 que muestra la distribución de esfuerzos a las condiciones calculadas.

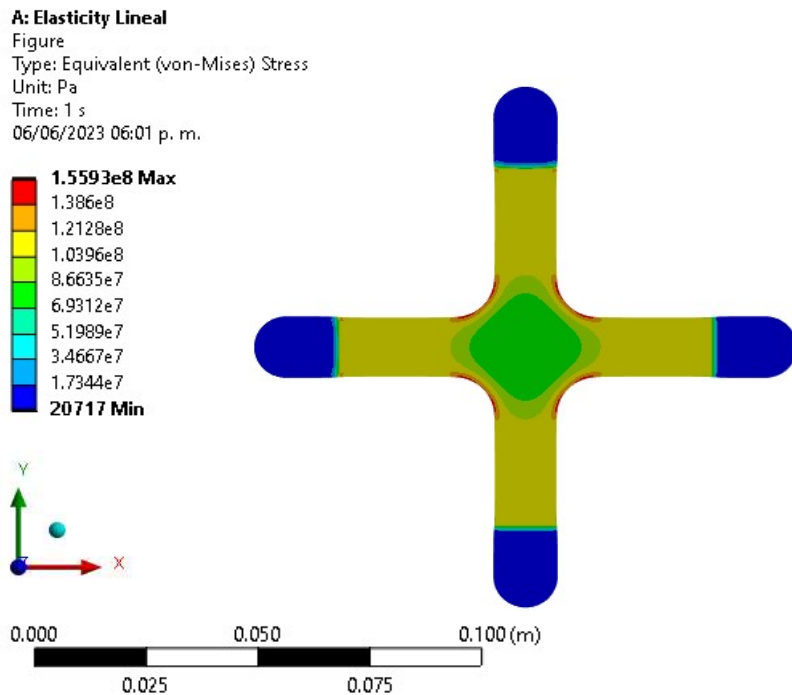


Figura 79. Esquema de condiciones de frontera



La fuerza aplicada en los brazos de nuestra probeta uniaxial guarda la relación matemática descrita en la fórmula ‘n’ con la cual calculamos la fuerza aplicada en kilogramos que se aplicara por la maquina universal con la cual alcanzamos el límite de cedencia, la fórmula se extrae del siguiente esquema donde se representa gráficamente.

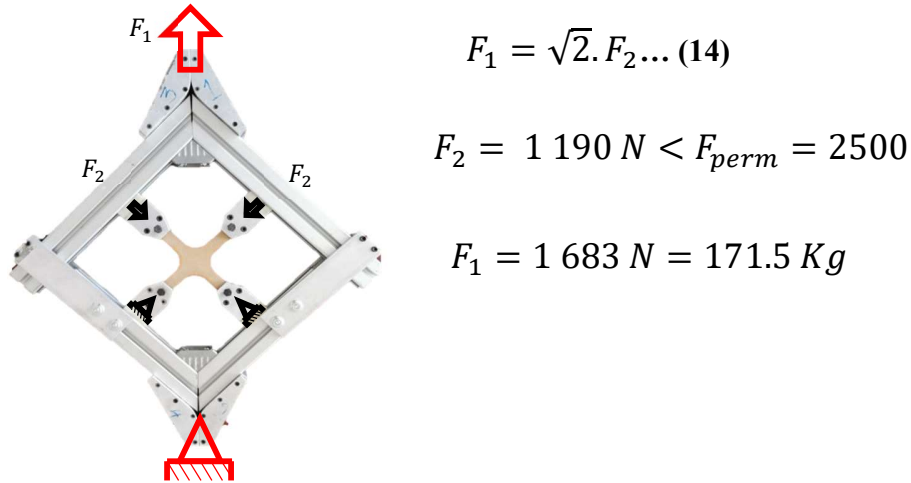


Figura 80. Relación de fuerzas en dispositivo biaxial.

Se utilizan los datos tabulados de la curva de la deformación plástica correspondiente a nuestra caracterización del aluminio 3003, y se procede a analizar la probeta considerando ahora la plasticidad del material hasta el esfuerzo ultimo que soporta, este análisis nos permite determinar la fuerza a la cual la prueba sin fisura alcanzaría el esfuerzo máximo, así como la deformación máxima que tendría la probeta al alcanzar el fallo por fluencia.

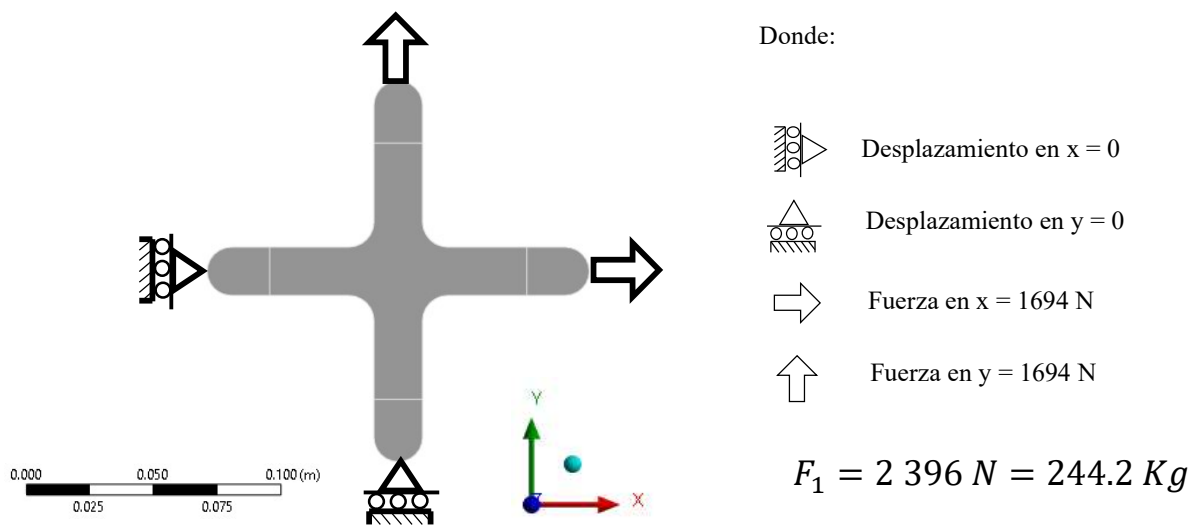


Figura 81. Esquema de condiciones de frontera en rango plástico

Teniendo como resultado la distribución de esfuerzos mostrada en la imagen ‘n’, donde se aprecia que la mayor concentración de esfuerzos se presenta en los brazos de la probeta.

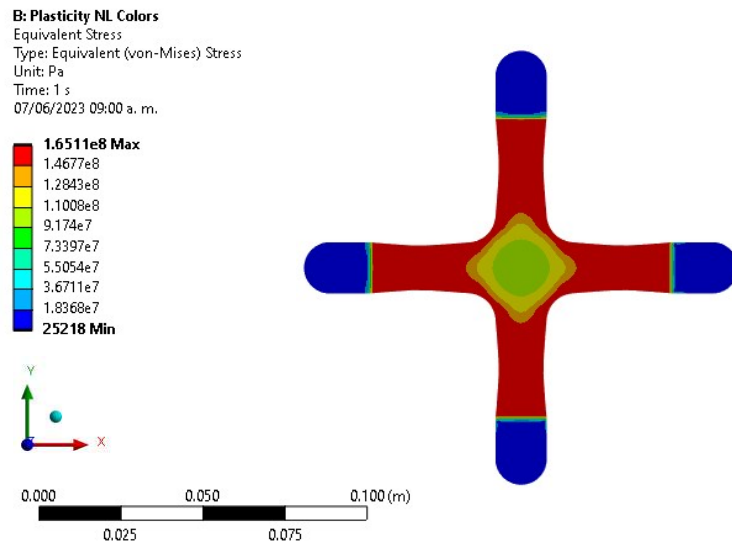


Figura 82. Esfuerzos equivalentes en probeta analizada en rango plástico

Se muestra la transición de la deformación elástica a plástica en las pruebas biaxiales sin fisura.

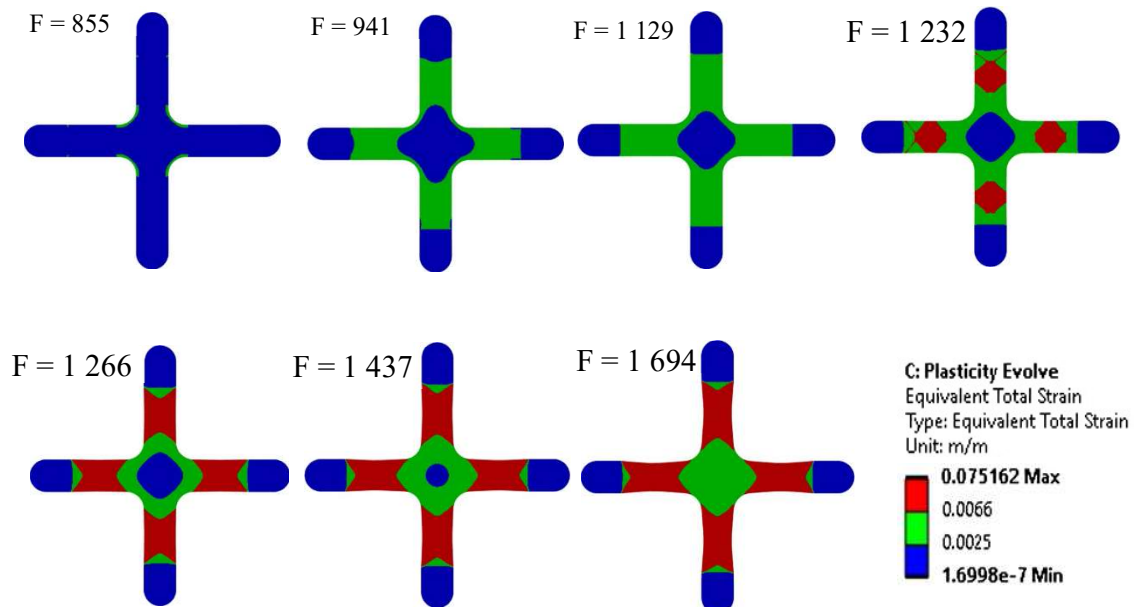


Figura 83. Transición de la deformación elástica en plástica

Teniendo determinada la fuerza máxima aplicable a la prueba antes de alcanzar el fallo por fluencia, se reescriben los códigos correspondientes a APDL para calcular los intensificadores de esfuerzo en el frente de la grieta, se escriben 3 códigos debido a la variación geométrica que se establece en el centro de la probeta al momento de hacer una rotación para la posición de la fisura centra, el primer código corresponde a una posición inicial a 0°, la segunda es la variación de la posición que va de 5° a 40° con un incremento en todo análisis de 5° en la posición, y finalmente el código que se utiliza para la fisura con un posicionamiento a 45°. Estos códigos vienen presentes en la sección de anexos. Obteniendo como resultado los siguientes valores graficados para los intensificadores de esfuerzos, calculados bajo las condiciones experimentales reproducibles.

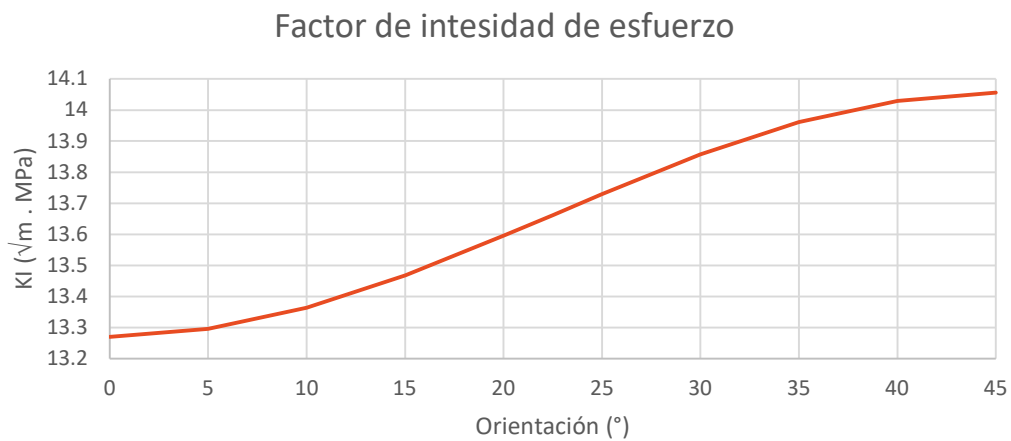


Figura 85. Comportamiento del intensificador de esfuerzo modo I

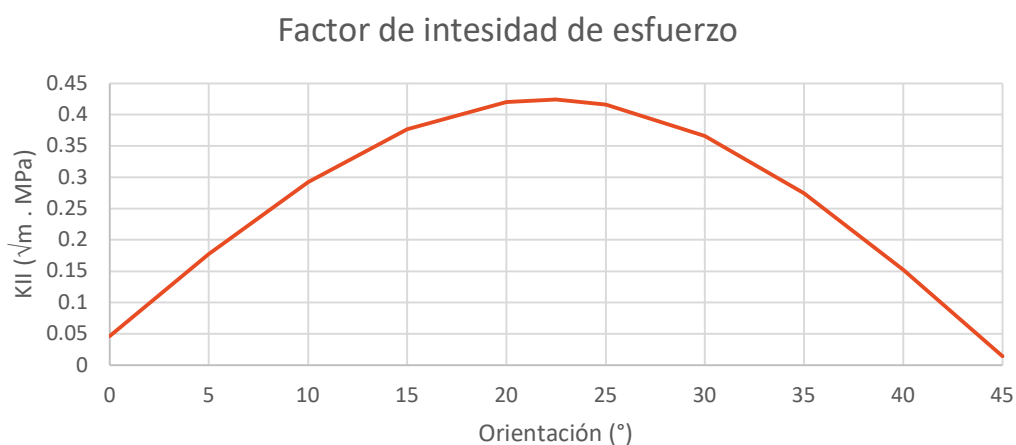


Figura 84. Comportamiento del intensificador de esfuerzo modo II

## 5.2 Evolución de la deformación plástica por simulación numérica

Para observar la evolución de la deformación plástica de manera numérica, se utilizan las características geométricas definidas en las probetas ensayadas de manera experimental, utilizando las mediciones que se obtuvieron de estas en el laboratorio de metrología, principalmente se toma en cuenta la caracterización de la fisura utilizando un ancho de muesca de 0.17mm que fue el promedio que se obtuvo, también se utiliza de manera precisa los datos obtenidos para las propiedades mecánicas de nuestro material (tabla 7), así como la gráfica de la curva plástica asignada a ANSYS para la simulación de las pruebas numéricas (Figura 29).

Las pruebas se realizan a la máxima fuerza aplicable para alcanzar el esfuerzo ultimo del material, obteniendo como resultado de las simulaciones las figuras mostradas a continuación donde se observa la evolución de la deformación plástica así como la fuerza máxima en cada simulación, cada figura representa una orientación de fisura diferente se utiliza un código de colores que representa la transición de la deformación elástica al rango plástico mostrando en color amarillo mostaza la presencia de la deformación plástica y en color rojo cuando se supera la deformación máxima al esfuerzo ultimo.

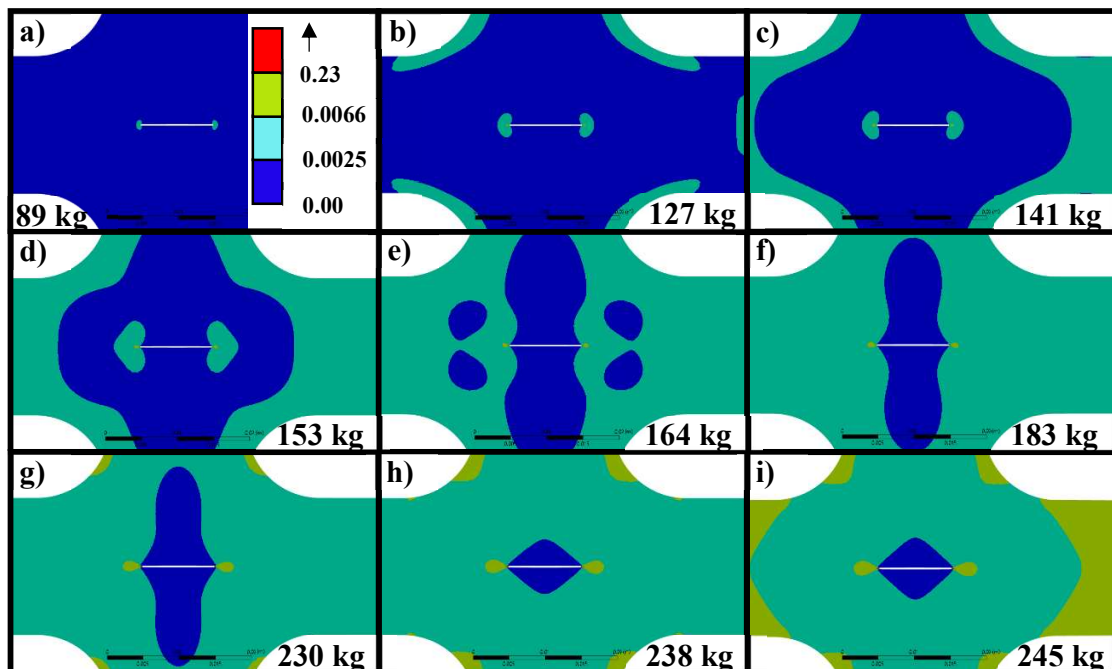


Figura 86. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en  $0^\circ$ , en la fuerza; a) 89 kg, b) 127 kg, c) 141 kg, d) 153 kg, e) 164 kg, f) 183 kg, g) 230 kg, h) 238 kg, i) 245 kg.

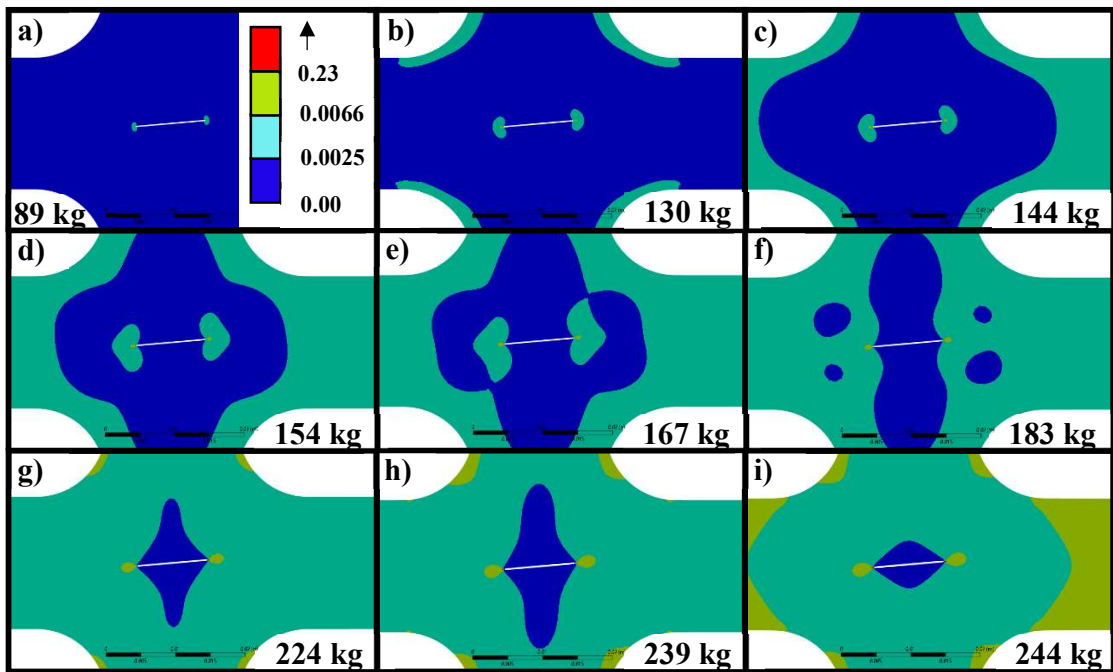


Figura 88. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 5°, en la fuerza; a) 89 kg, b) 130 kg, c) 144 kg, d) 154 kg, e) 167 kg, f) 183 kg, g) 224 kg, h) 239 kg, i) 244 kg

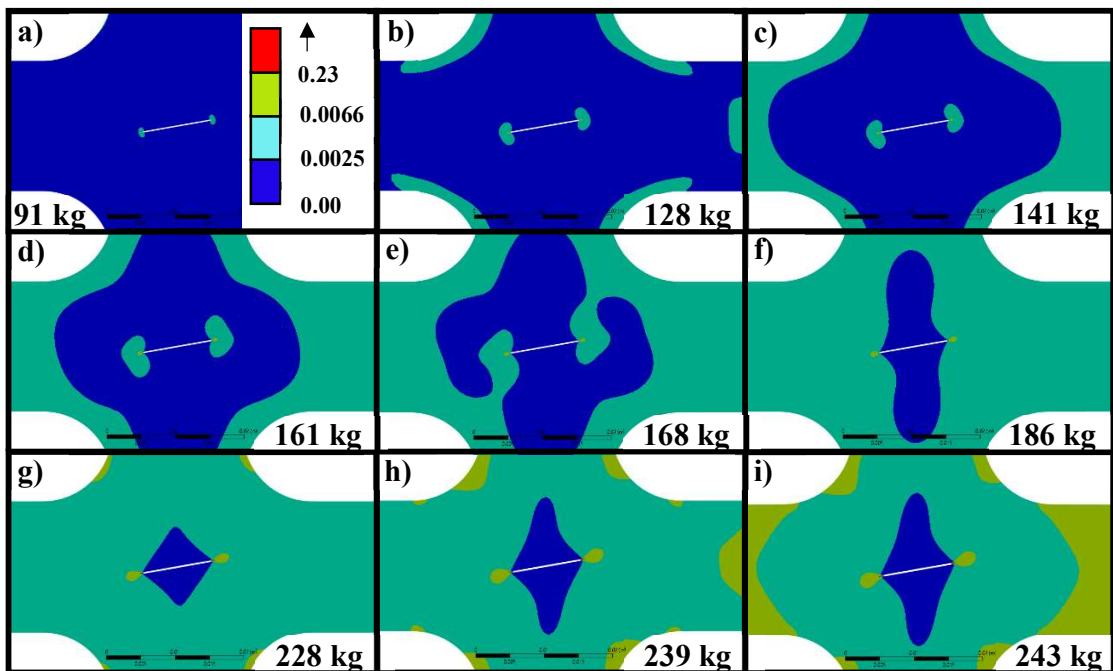


Figura 87. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 10°, en la fuerza; a) 91 kg, b) 128 kg, c) 141 kg, d) 161 kg, e) 168 kg, f) 186 kg, g) 228 kg, h) 239 kg, i) 243 kg.

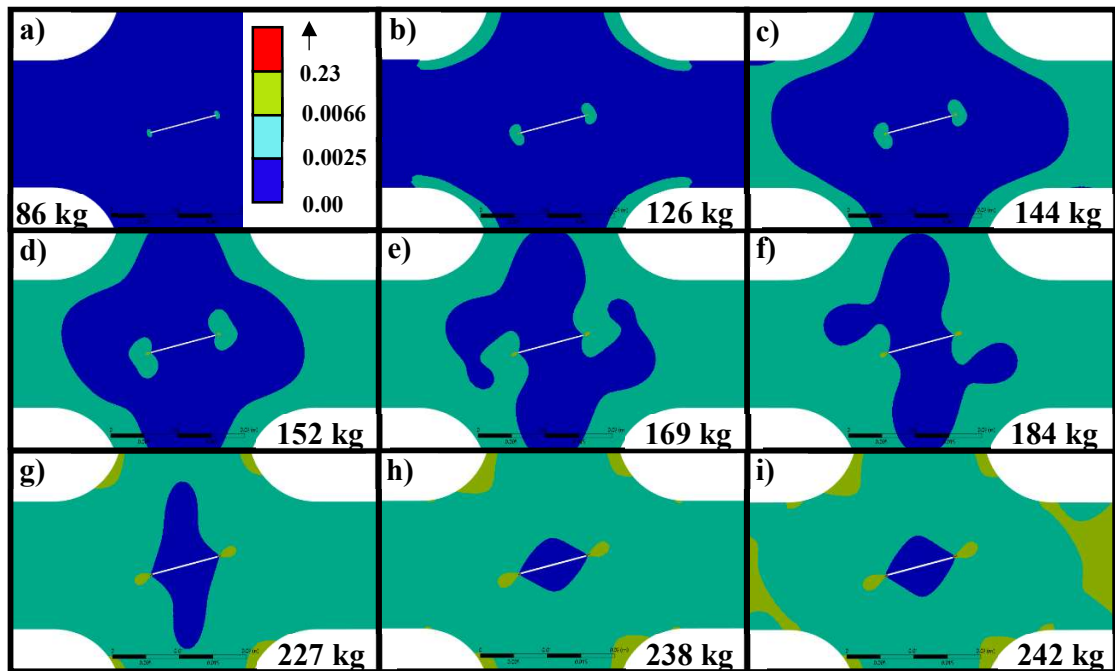


Figura 90. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 15°, en la fuerza; a) 86 kg, b) 126 kg, c) 144 kg, d) 152 kg, e) 169 kg, f) 184 kg, g) 227 kg, h) 238 kg, i) 242 kg.

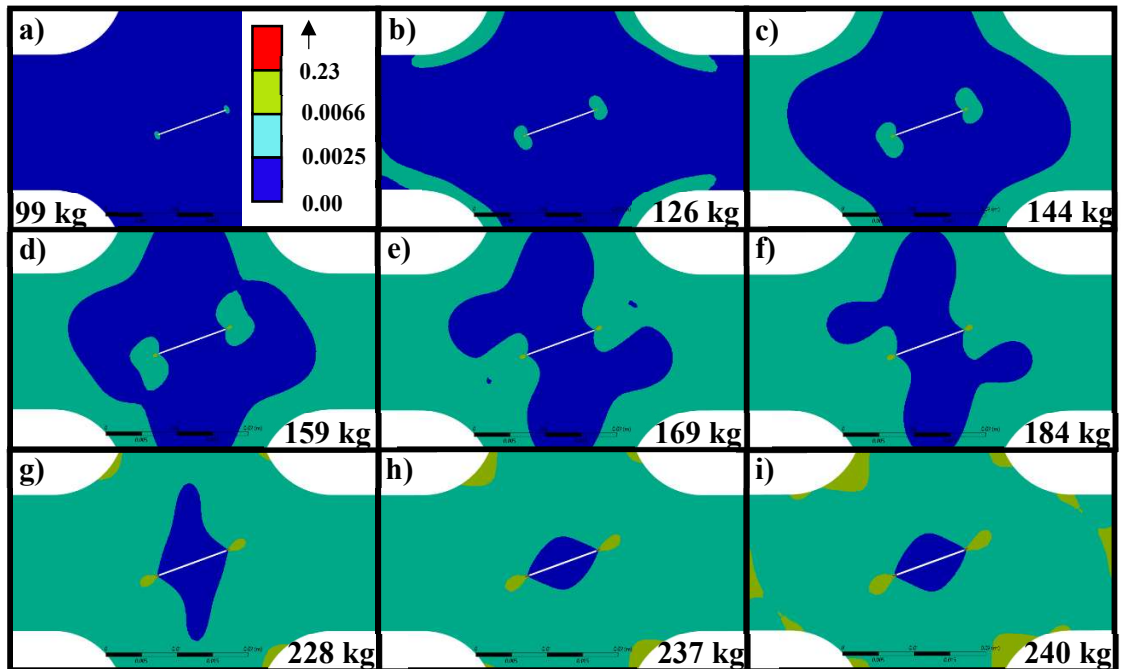


Figura 89. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 20°, en la fuerza; a) 99 kg, b) 126 kg, c) 144 kg, d) 159 kg, e) 169 kg, f) 184 kg, g) 228 kg, h) 237 kg, i) 240 kg.



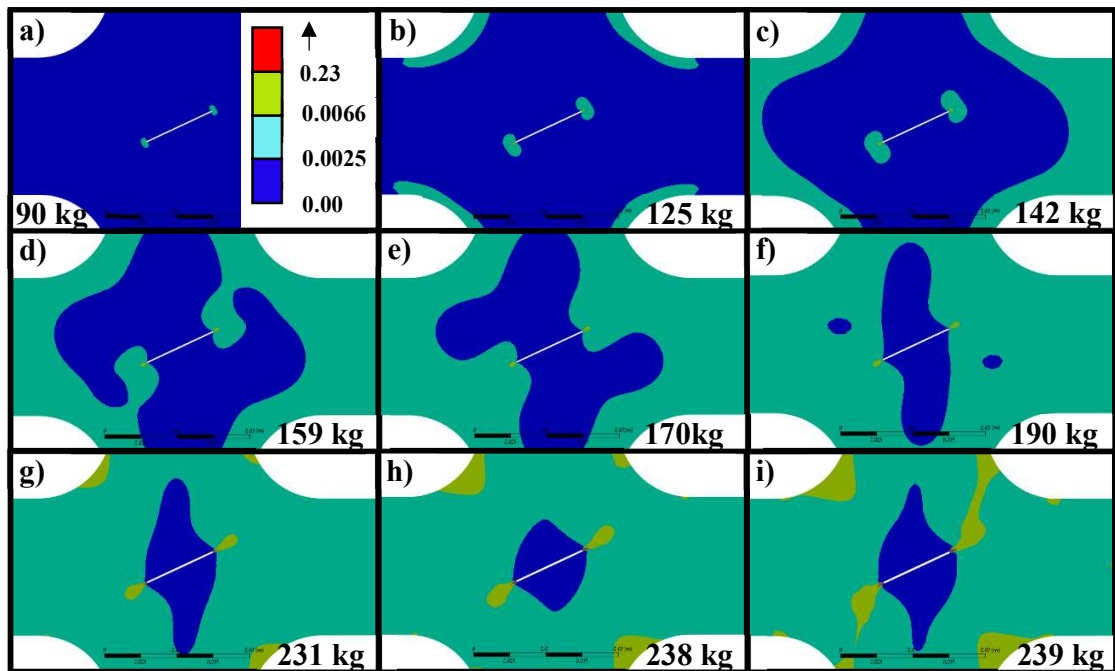


Figura 92. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 25°, en la fuerza; a) 90 kg, b) 125 kg, c) 142 kg, d) 159 kg, e) 170 kg, f) 190 kg, g) 231 kg, h) 238 kg, i) 239 kg.

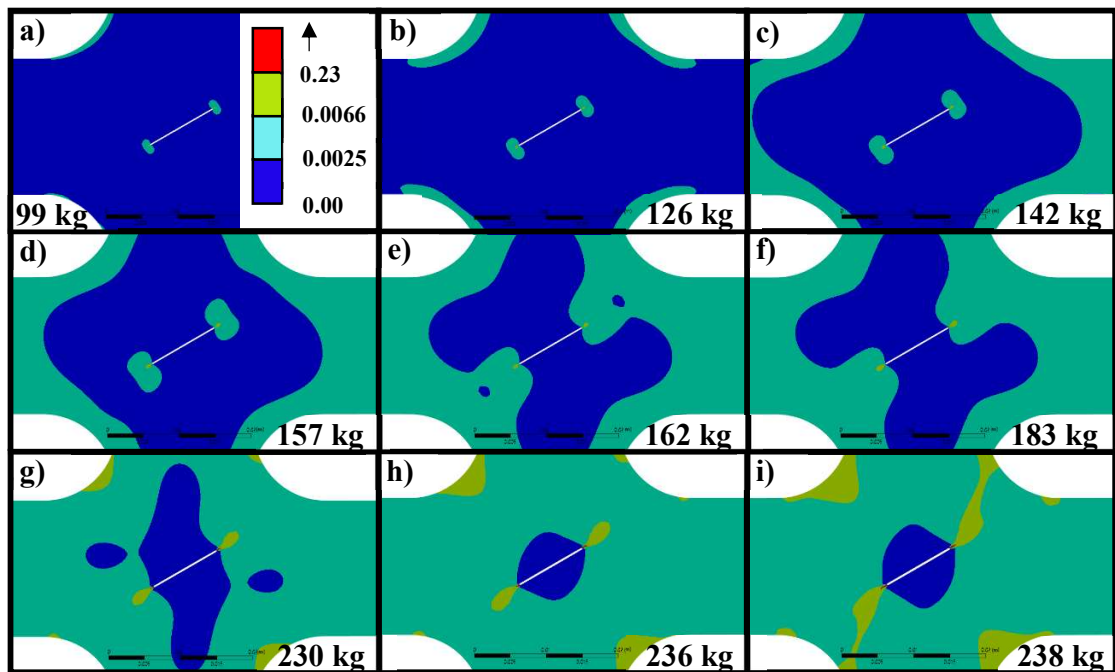


Figura 91. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 30°, en la fuerza; a) 99 kg, b) 126 kg, c) 142 kg, d) 157 kg, e) 162 kg, f) 183 kg, g) 230 kg, h) 236 kg, i) 238 kg.

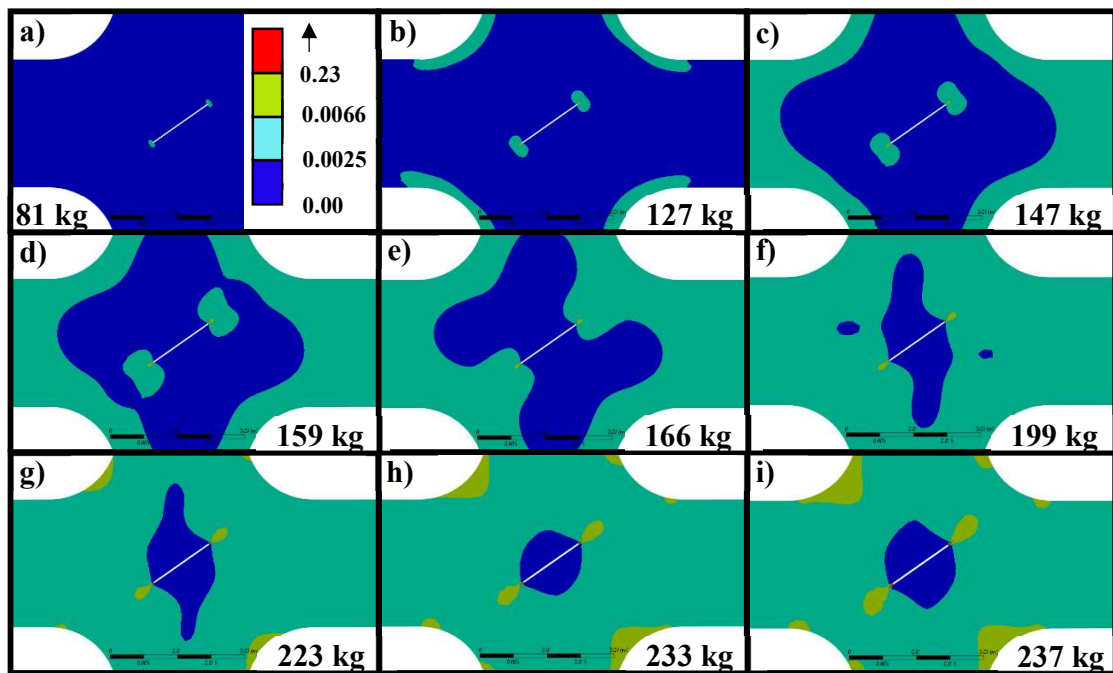


Figura 94. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 35°, en la fuerza; a) 81 kg, b) 127 kg, c) 147 kg, d) 159 kg, e) 166 kg, f) 199 kg, g) 223 kg, h) 233 kg, i) 237 kg.

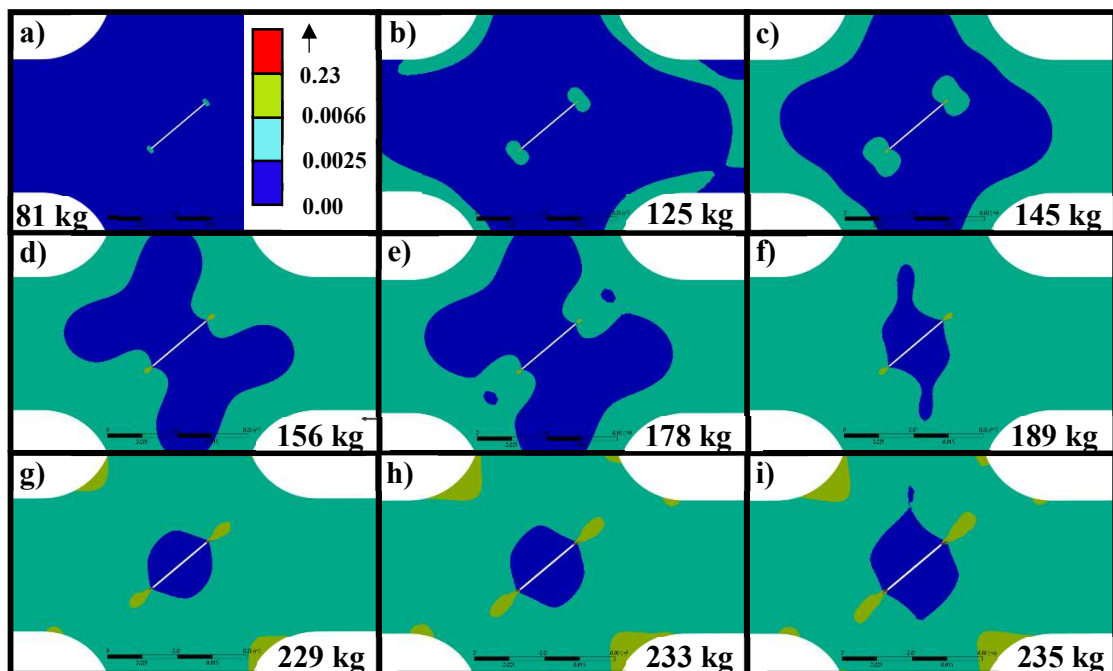


Figura 93. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 40°, en la fuerza; a) 81 kg, b) 125 kg, c) 145 kg, d) 156 kg, e) 178 kg, f) 189 kg, g) 229 kg, h) 233 kg, i) 235 kg.



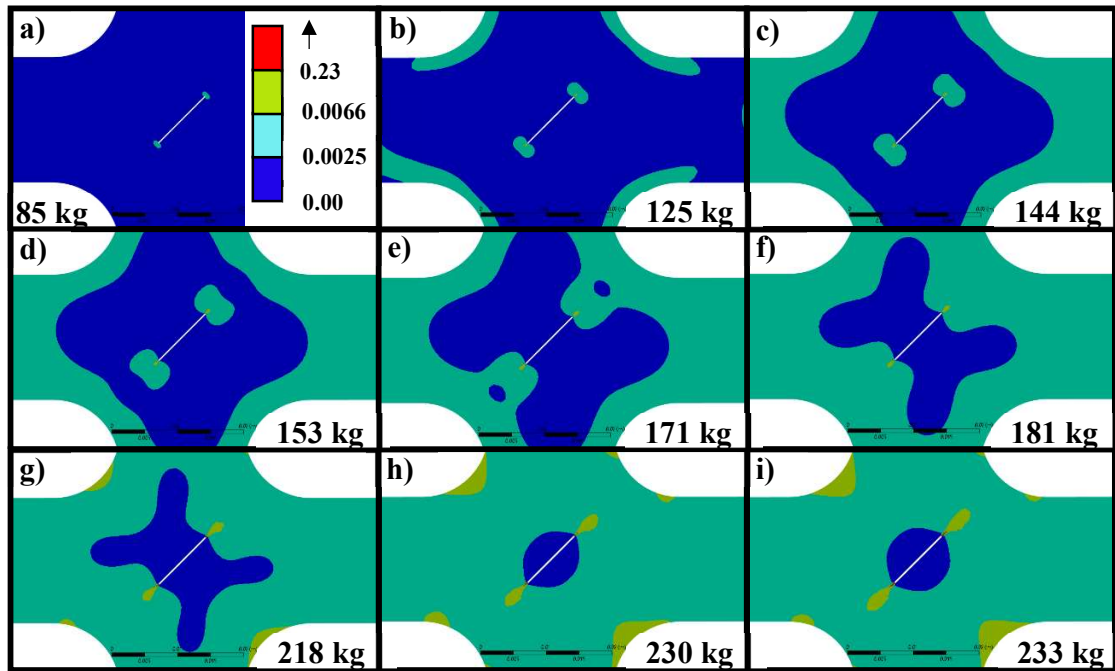


Figura 95. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 45°, en la fuerza; a) 85 kg, b) 125 kg, c) 144 kg, d) 153 kg, e) 171 kg, f) 181 kg, g) 218 kg, h) 230 kg, i) 233 kg.

Se grafican las fuerzas máximas que se obtienen en las diferentes simulaciones al hacer variar la orientación de la fisura con respecto a la posición inicial, la fuerza mostrada corresponde a la fuerza que sería aplicada en las pruebas experimentales a la maquina universal haciendo la conversión correspondiente, descrita en la fórmula 14.

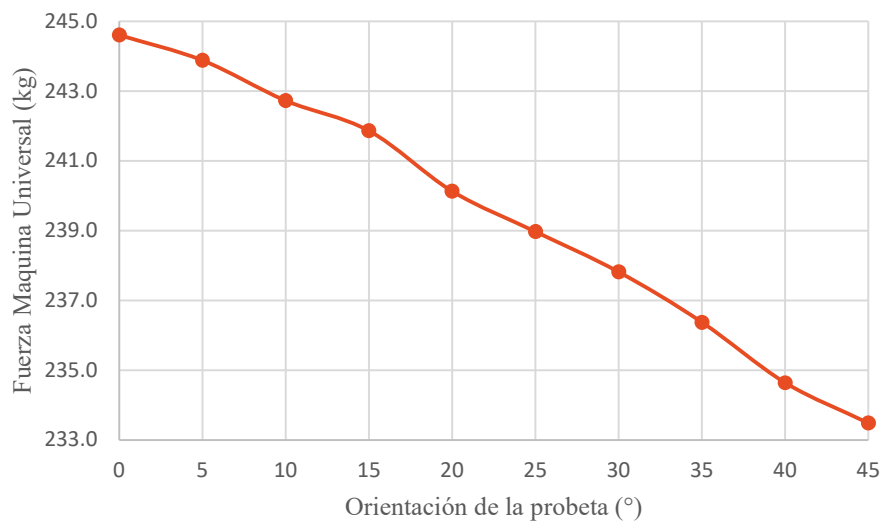


Figura 96. Grafica de fuerza máxima aplicada para las diferentes orientaciones de las fisuras.

## Capítulo VI Pruebas experimentales

### 6.1 Caracterización geométrica de las probetas

Utilizando los microscopios “Nikon measurescope model II” y “Mitutoyo toolmakers microscope” se toman medidas en puntos equidistantes sobre la muesca que simula ser la fisura como se muestra en las figuras 97-99, tomando como muestra 3 probetas de aluminio y 3 probetas de acero, teniendo como resultados los datos dispuestos en la tabla 8.



Figura 97. Calibración de la cámara

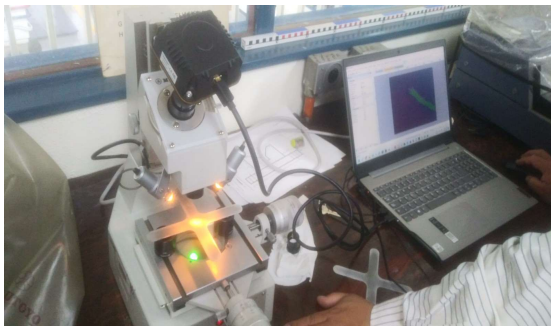


Figura 99. Medición en microscopio



Figura 98. Medición en microscopio

La cámara que se utiliza para tomar las fotografías utilizando los microscopios es una cámara de microscopio la cual nos permite a través del software AM Scope tomar fotografías digitales con los aumentos permitidos por el microscopio, por detalles de resolución y para que fuera posible tomar medidas utilizando el software se utilizó un aumento 10X pero previo a comenzar la caracterización geométrica de la fisura en las probetas, se necesita calibrar la escala que relacionara en unidades longitudinales del sistema métrico, los pixeles de las imágenes obtenidas, se utiliza el calibrador girando las perillas para lograr el acercamiento adecuado al enfoque necesario, ya una vez calibrado, se procede a colocar la probeta, se distribuyen los puntos sobre los cuales se tomaran las medidas de manera equidistante, y se capturan en los puntos preestablecidos, se colocan las cotas y guardan las imágenes, se muestra a continuación, el esquema bajo el cual se segmentaron las mediciones.

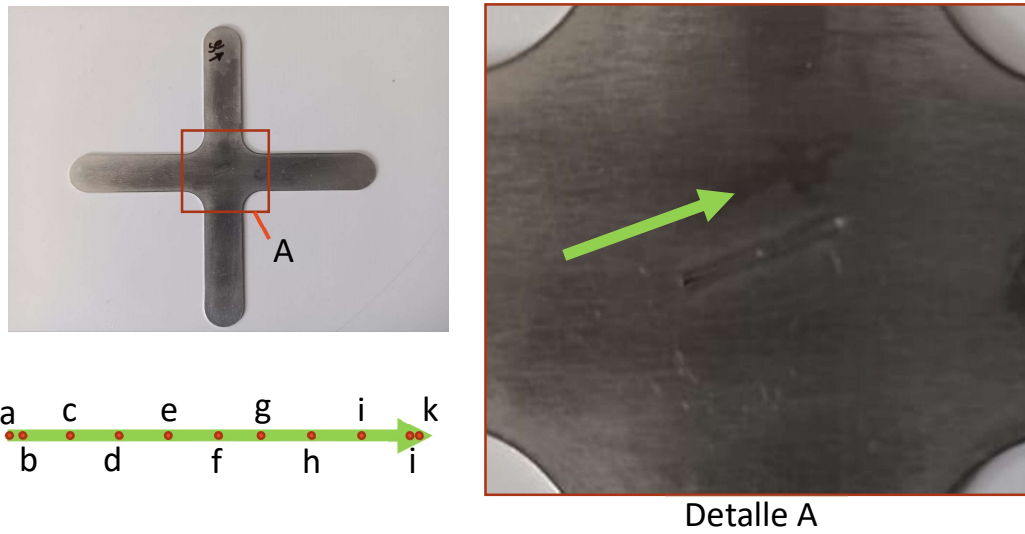


Figura 100. Esquema y distribución de puntos a medir

Descripción Probeta (ID)	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	Promedio	Desviación Estándar
<i>Aluminio (1A)</i>	0.16	0.16	0.21	0.21	0.23	0.23	0.21	0.20	0.19	0.18	0.18	0.195	0.024
<i>Aluminio (2B)</i>	0.15	0.16	0.19	0.21	0.23	0.23	0.22	0.21	0.19	0.18	0.18	0.193	0.027
<i>Aluminio (5E)</i>	0.18	0.17	0.16	0.17	0.17	0.17	0.18	0.19	0.19	0.17	0.17	0.175	0.009
<i>Acero (3C)</i>	0.28	0.23	0.22	0.22	0.23	0.24	0.24	0.25	0.26	0.28	0.31	0.251	0.027
<i>Acero (6F)</i>	0.31	0.21	0.21	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23	0.22	0.26	0.29	0.237	0.034
<i>Acero (7H)</i>	0.27	0.26	0.25	0.24	0.22	0.23	0.23	0.23	0.24	0.25	0.29	0.246	0.021

Tabla 8. Caracterización de fisuras

Las dimensiones se obtienen dentro del programa AM Scope teniendo diversas herramientas que permiten adecuar la edición de las imágenes para que se muestre la escala de referencia y las cotas que definen el ancho de las fisuras, se muestra un ejemplo de estas imágenes en la figura 101.

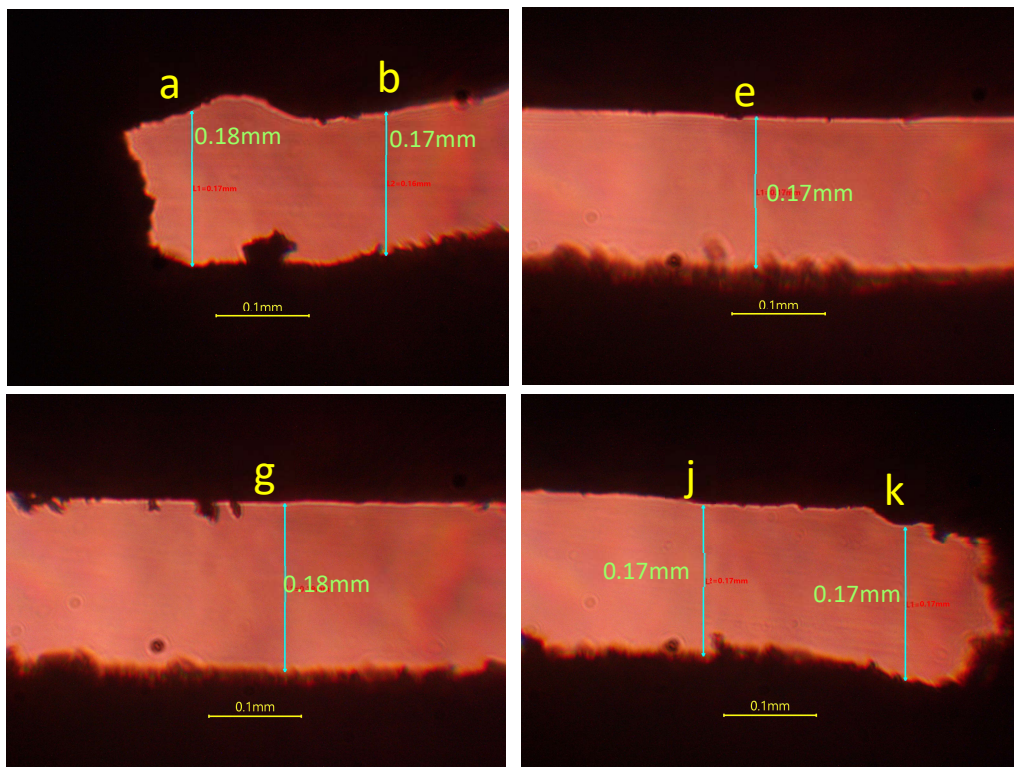


Figura 101. Medidas en los puntos indicados de la prueba 5E de las probetas de aluminio

## 6.2 Procedimiento para la ejecución y documentación de las pruebas biaxiales

Teniendo los elementos fabricados, se ensambla de manera preliminar para observar los detalles que se tendrán para la preparación de las pruebas, teniendo como resultado a esto, la redacción de una simple metodología para el montaje de la probeta y el dispositivo y para la extracción del mismo a la realización de las pruebas biaxiales.

1. Desplazar el bastidor de la maquina universal a su posición inferior extrema.
2. Prender la bomba de la maquina universal y girar de 6 a 8 vueltas la perilla de carga para elevar la parte superior hasta llegar a 30 centímetros antes de su posición superior extrema, Se apaga la bomba.
3. Se colocan las piezas superior e inferior del dispositivo de pruebas biaxiales en la mesa de preparación con una orientación donde el tornillo de ajuste para las mordazas quede normal a la mesa con dirección al techo.
4. Se revisa el correcto desplazamiento de los deslizadores, la lubricación de la carrera de los mismos sobre los brazos del dispositivo.

5. Se giran en sentido de extracción los tornillos de las mordazas para liberar las mordazas y retirarlas.
6. Se coloca la probeta a ensayar teniendo en las ranuras de los deslizadores, colocando la parte con el moteado de la probeta con dirección al techo.
7. Se colocan las mordazas en la ranura correspondiente, sobre la probeta, colocando la cara moteada de la mordaza en contra de la probeta.
8. Se aprietan los tornillos con el mayor torque posible sin dañar los deslizadores.
9. Se prepara el arreglo eléctrico para el suministro de energía que necesitaran la iluminación y el módulo de carga al realizar las pruebas.
10. Se coloca el subensamble de la parte superior, entonces se atraviesa el perno de la máquina de ensayos universales quedando sujetado el subensamble.
11. Manteniendo una coplanariedad de los elementos del dispositivo de pruebas biaxiales, así como cuidando la colinealidad de los deslizadores, se levanta de la mesa de preparación y se coloca de manera concéntrica los agujeros de la parte superior del dispositivo biaxial a los agujeros del soporte colocado previamente en la parte superior de la máquina de ensayos universales, se atraviesa un tornillo de  $\frac{3}{4}$  de diámetro, se coloca la tuerca apretando hasta restringir el movimiento del tornillo.
12. Se colocan las placas de sujeción con el barreno grande concéntrico a el paso del perno que se coloca en la parte inferior de la máquina de ensayos universales y se introduce el perno.
13. Se nivela con la válvula de descarga la altura del dispositivo de pruebas biaxiales, para poder sujetar del bastidor el dispositivo a la máquina de ensayos universales utilizando otro tornillo de  $\frac{3}{4}$  de diámetro.
14. Se verifica que el sistema acoplado no tenga alguna pretensión antes de iniciar la prueba, verificando que la carga que aparezca en el módulo indicador de la celda de carga es el peso del dispositivo de pruebas biaxiales (aproximadamente 9 kilos) se procede a colocar en 0 el módulo.

15. Se coloca el soporte para el sistema de grabación, colocando al centro la toma de la prueba teniendo en el cuadro toda la zona pintada de la probeta.
16. Se coloca el sistema de iluminación evitando que se generen sombras en el enfoque de la prueba.
17. Se enfoca la grabación a la probeta y se inicia la grabación.
18. Se enciende la maquina universal y se una velocidad de carga determinada girando la perilla 2.5 pasos.
19. Una vez concluida la prueba se apaga la máquina de ensayos.
20. Se retira el equipo de iluminación y de grabación.
21. Se sujeta el dispositivo de pruebas biaxiales mientras se retiran ambos tornillos de ensamble y se retira del área de pruebas volviendo a colocar el dispositivo en la mesa de preparación, evitando doblar la probeta ensayada.
22. Se aflojan los tornillos que aprietan las mordazas y se sustrae la probeta.
23. Se anota en cada una de las partes de la probeta el número de ensayo que lleva.

### **6.3 Procedimiento para la segmentación de los videos en imágenes usando VLC y preparación de imágenes para procesarlas en GOM correlate**

La prueba se graba en un estimado promedio de 8 a 10 minutos, buscando el mayor parecido en tiempos de ejecución de las pruebas entre sí, teniendo el archivo del video en la computadora, se procede a segmentar en los fotogramas necesarios para el procesamiento de datos, el proceso se describe en los siguientes pasos.

1. Se abre el programa utilizando el ejecutable.
2. En el menú herramientas en la opción de preferencias se despliega la ventana de opciones y en la parte inferior izquierda se habilita la opción de mostrar todo como se observa en la figura 102, mostrando ahora las preferencias avanzadas.
3. En la sección correspondiente a video de la lista que aparece en el lado izquierdo de las opciones, se selecciona la opción de filtros y se habilitan los filtros de escena lo cual despliega en el lado derecho de la ventana en la que trabajamos las siguientes opciones.



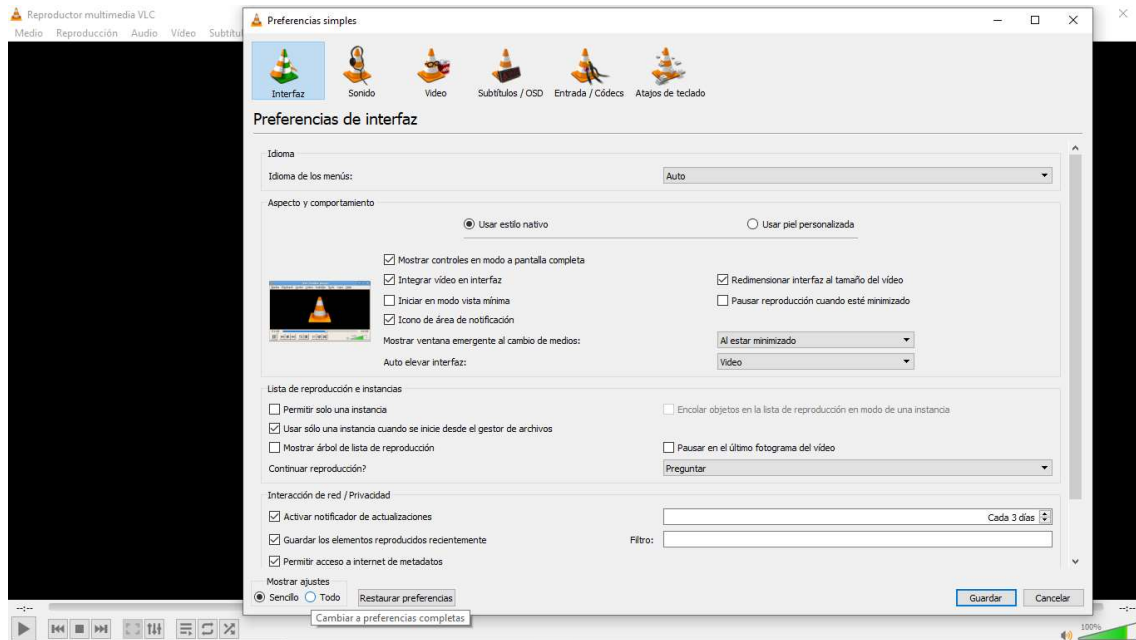


Figura 102. Ventana de opciones de preferencias simples

4. Se asigna un nombre de prefijo, el cual corresponde al nombre que se asignó de acuerdo a la nomenclatura prevista para las probetas de pruebas biaxiales.

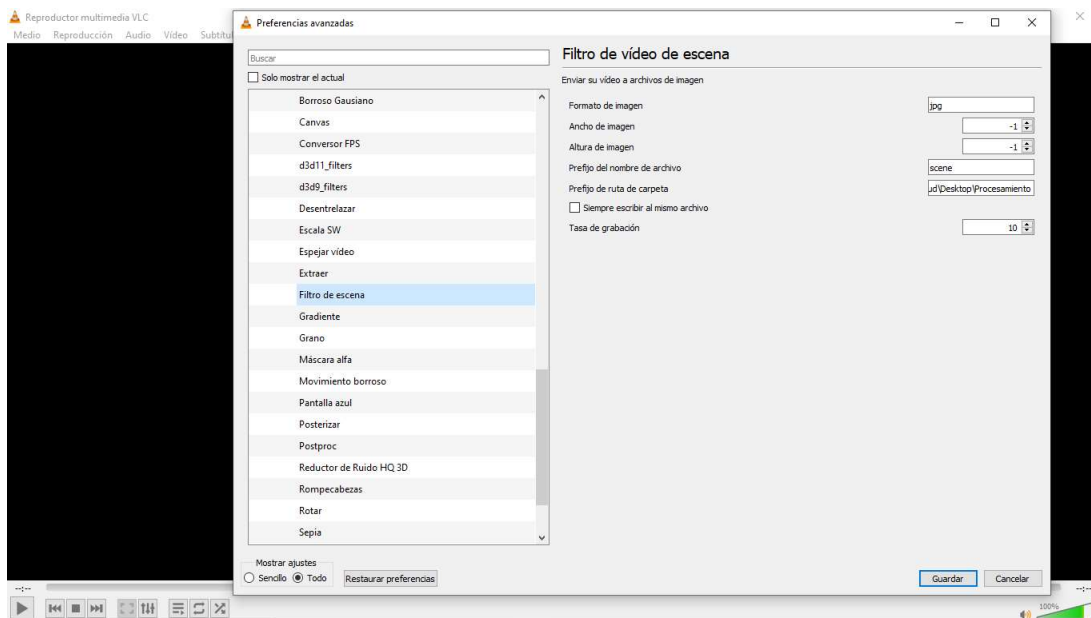


Figura 103. Ventana de opciones de preferencias avanzadas

5. Se selecciona la ruta en la cual serán archivados los fotogramas extraídos del video
6. Se determina y asigna la tasa de grabación, este dato varia y corresponde de la cantidad de fotogramas por segundo y de la duración del video, en el caso de las pruebas obtenidas por las cámaras usadas, se tienen 30 fotogramas por segundo, considerando una duración de las pruebas de 10 minutos, se tendrían 18 000 imágenes al guardar todos los fotogramas, para determinar cómo es que esta sensibilidad por la cantidad de datos afectaría nuestro estudio, se realizó un análisis procesando una prueba en diferentes tasas de grabación obteniendo un resultado que muestra una tendencia bastante aceptable al someter los videos a una tasa de grabación de 10, obteniendo en promedio 1 800 datos a procesar por prueba.
7. Se arrastra el archivo al programa VLC, el video comenzara a reproducirse y al terminar tendremos los archivos en la carpeta predestinada.
8. Se eliminan los fotogramas que no ofrecen información procesable, es decir, las previas al inicio de la prueba, y las resultantes después de la fractura, ya que, al haberse presentado la falla, la malla se rompe y los datos que se obtienen posterior a esto no son procesables.
9. Se provee una re-enumeracion a los fotogramas utilizando un programa de acceso sencillo y gratuito, para esta prueba se utiliza "File renamer", y se asigna a 4 dígitos el secuencial iniciando en 0001 sin brincos numéricos.

#### **6.4 Procesamiento de pruebas biaxiales a través de GOM correlate**

Obteniendo los fotogramas a utilizar para el procesamiento de imágenes correlacionadas se realizan varias pruebas donde se determinan los rangos de tamaño de faceta y distancia entre puntos, los cuales servirán para tener una mejor malla en todo momento del análisis, el procesamiento es muy similar al descrito en las pruebas uniaxiales, con el principal interés de la creación del sistema de coordenadas auxiliar ya que las imágenes tienen una rotación al sistema de coordenadas por defecto, también se focaliza la atención a que los datos que se procesaran serán los desplazamientos en los ejes auxiliares de un punto cercano al frente de la grieta.



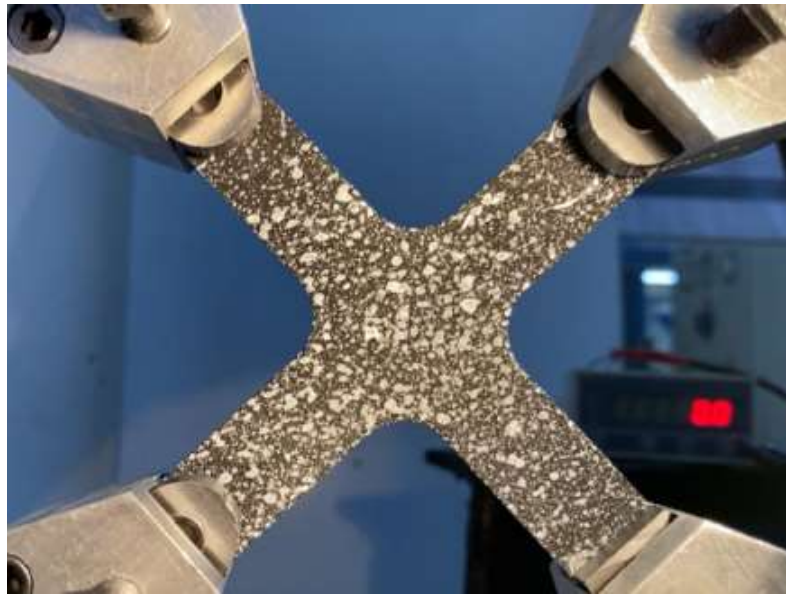


Figura 104. Inicio de prueba biaxial

La realización de diversas pruebas del procesamiento de las imágenes permite mejorar en el todo el procedimiento de las pruebas experimentales detalles hasta alcanzar un resultado inicial más suavizado.

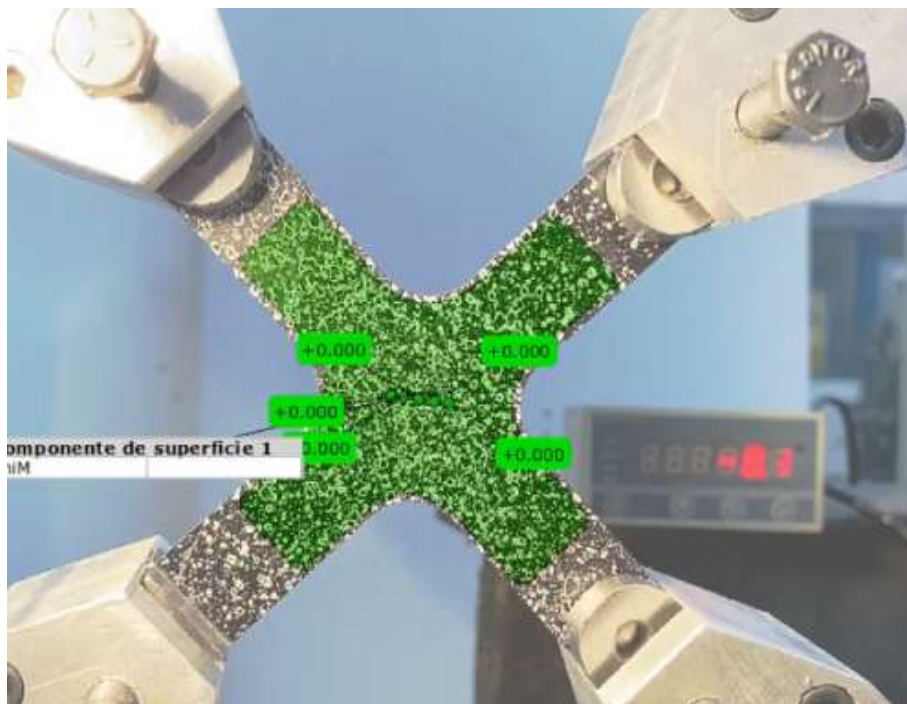


Figura 105. Prueba biaxial analizada en GOM correlate

Para mejorar el procesamiento de datos en la prueba y la focalización en el área de impacto de la probeta para nuestro estudio, se realiza un acercamiento digital, lo que permite tener una mayor atención en nuestra grieta.

Se genera un componente de superficie circular el cual representa nuestra malla, los datos correspondientes se registran en una tabla, y se obtiene la deformación unitaria de la prueba, se grafican ambos valores teniendo como resultado una gráfica de esfuerzo-deformación del punto de intersección colocado en la prueba ver figura 106, adicional se observa la evolución de la deformación durante la prueba ver figura 107, los datos correspondientes a los incisos de la figura se tabulan en la tabla 9.

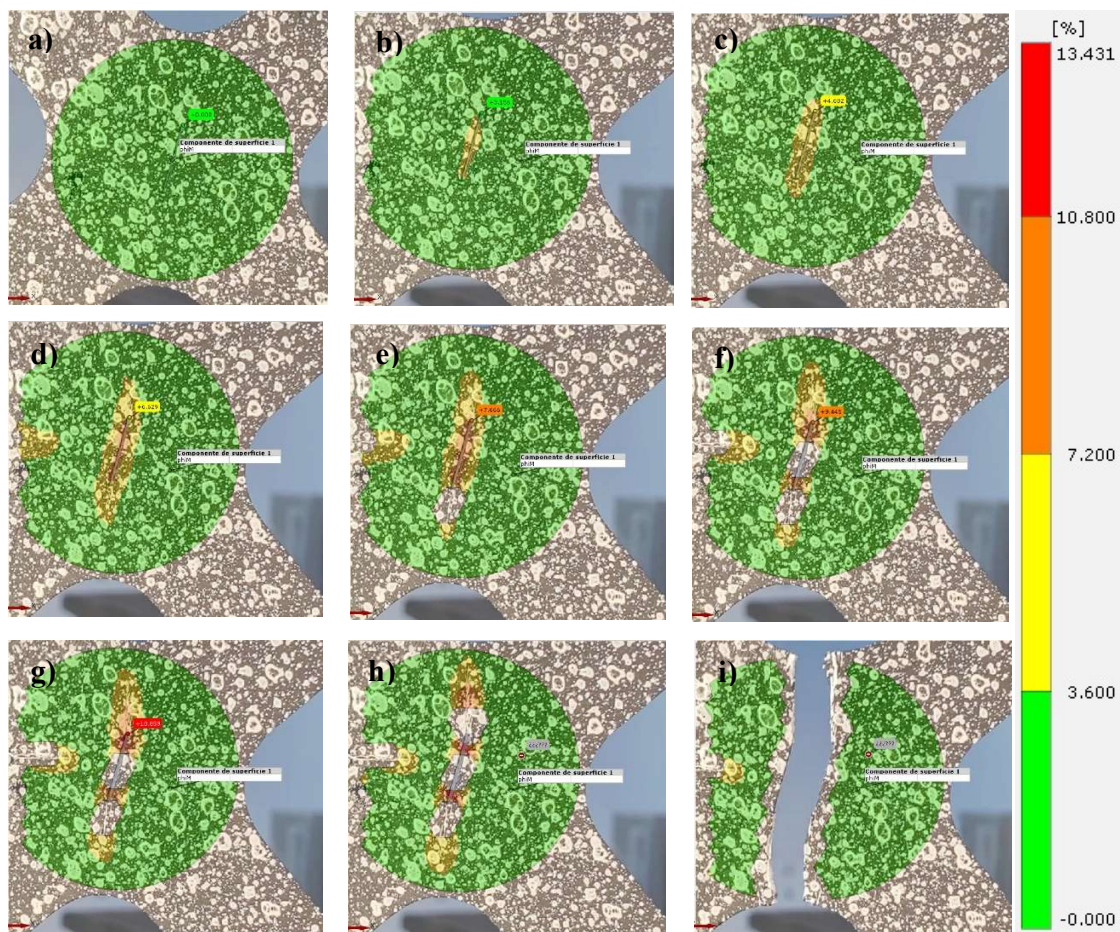


Figura 106. Prueba biaxial analizada en GOM correlate con acercamiento digital, evolución de la deformación durante la prueba.

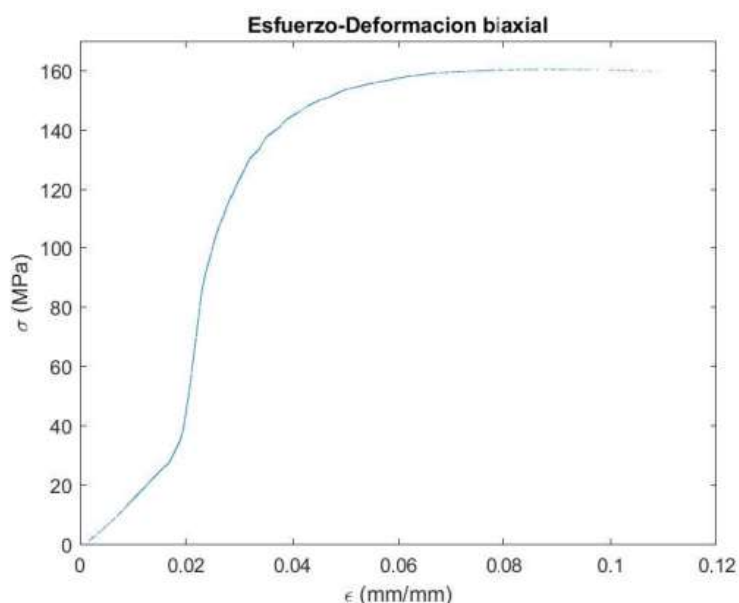


Figura 107. Grafica correspondiente a la prueba biaxial de la probeta EL35AL03

ID	Deformación (mm/mm)	Esfuerzo (MPa)
a)	0	0
b)	3.298	134
c)	4.603	150.8
d)	6.629	159.2
e)	7.736	160.2
f)	9.444	160.4
g)	10.883	159.8
h)	-	-
i)	-	-

Tabla 9. Datos de deformación y esfuerzo presentes en la evolución de la prueba biaxial

### 6.5 Análisis de probetas biaxiales que no fueron concluyentes al fallo inducido por intensificador de esfuerzo

La realización de las pruebas tuvo diferentes vertientes y puntos de mejora para la mayor cantidad de pruebas concluyentes para nuestro estudio, sin embargo, es de gran interés observar y analizar las probetas que fallaron en una zona diferente a la zona de la fisura, las cuales fueron fallas que la mayoría permitieron mejora en el procedimiento establecido para la realización de las pruebas, o el uso y acomodo del equipo de grabación.



Una de las principales vertientes que se presentaron en las probetas que no fallaron en el centro, son las que tuvieron el fallo en la zona intermedia del brazo, lo cual se puede asimilar gracias al estudio de deformación plástica en el cual se demuestra que esta zona en los brazos es la que tiene mayor afectación por la deformación plástica.

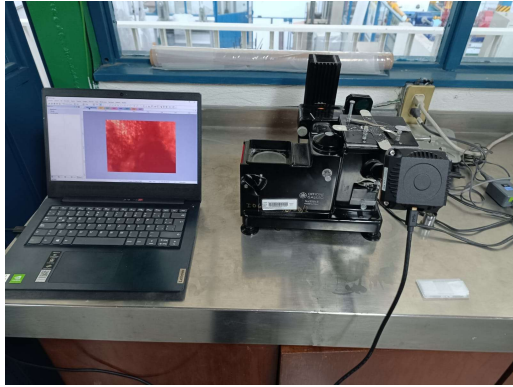


Figura 108. Medición de probetas ensayadas



Figura 109. Calibración de cámara

Estas probetas presentan en el frente de la grieta un adelgazamiento del material el cual representa una no presente pero cercana y posible falla en esta zona, entonces para observar de una manera adecuada este fenómeno, se utilizan los microscopios con los que se cuenta en el área de metrología para observar que ocurría en esta zona, teniendo como resultado lo que se observa en la figura 110 donde se utiliza el programa AM Scope para poder tomar el dimensionamiento de lo que se interpreta como la aparición y el crecimiento de una fisura en el frente de lo que representa nuestra fisura fabricada.

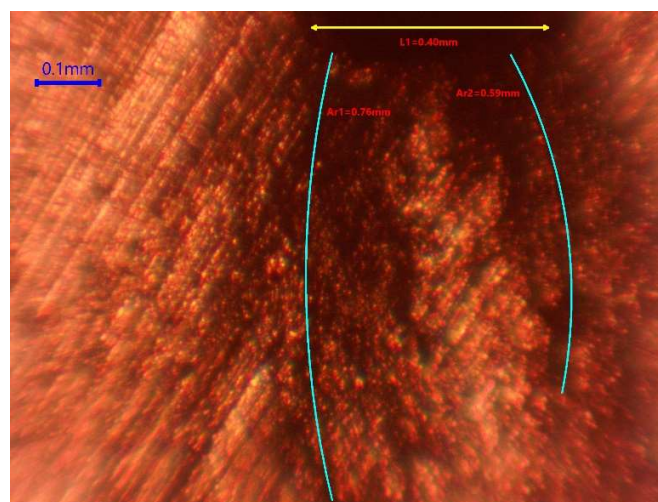


Figura 110. Imagen microscópica de frente de grieta en probeta con falla en brazo

## 6.6 Evolución de la deformación plástica por pruebas experimentales

Se realizan 7 pruebas experimentales para cada una de las diferentes orientaciones que se tienen en la fisura, teniendo un total de 70 pruebas realizadas, se lleva a cabo una bitácora donde se incluye el registro de la fuerza máxima alcanzada en cada una de las pruebas, las pruebas se procesan a través de Gom correlate teniendo la transición y evolución de la deformación elástica -plástica registrada en cada una de las pruebas, teniendo como principal enfoque las pruebas que fallaron en la fisura, en la figura 111 se muestra la cantidad de pruebas falladas en fisura de las 7 ensayadas.

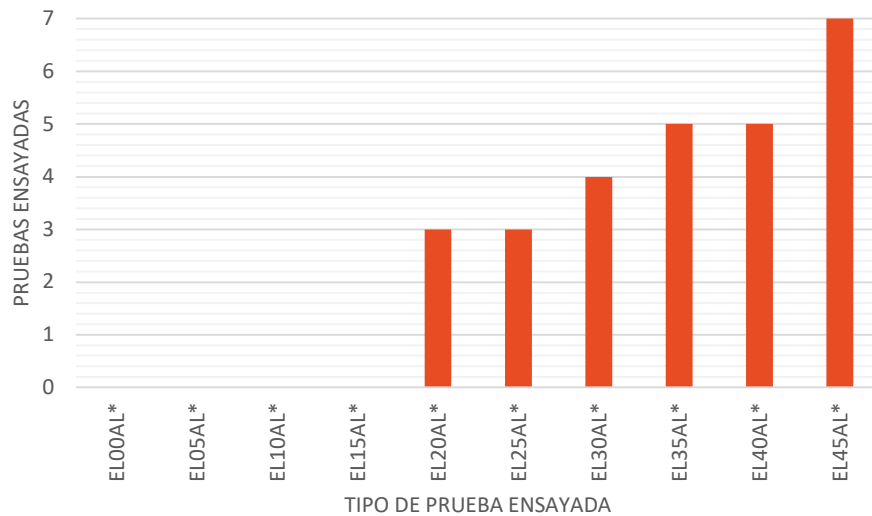


Figura 111. Relación de pruebas falladas en la fisura respecto a las pruebas ensayadas.

Se procesan todas las pruebas ensayadas de manera experimental seleccionando a partir de 15° hasta 45° (existiendo incrementos de 5°) una prueba que mejor ejemplifique en su tipo de orientación la evolución de la deformación que se presenta, siendo a partir de 20° las pruebas que lograron fallar en la fisura.

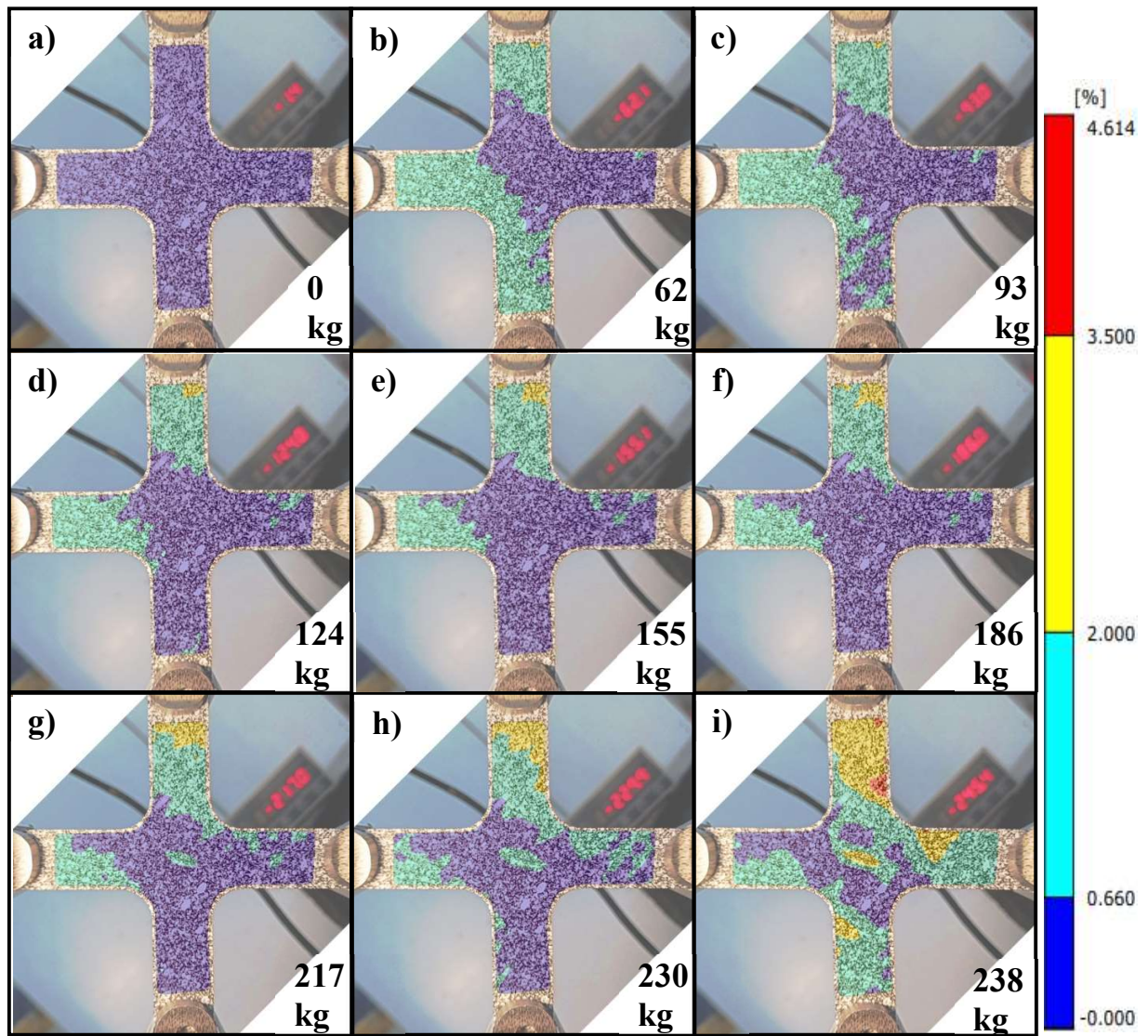


Figura 112. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 15°, prueba EL15AL07, en la fuerza; a) 0 kg, b) 62 kg, c) 93 kg, d) 124 kg, e) 155 kg, f) 186 kg, g) 217 kg, h) 230 kg, i) 238 kg.



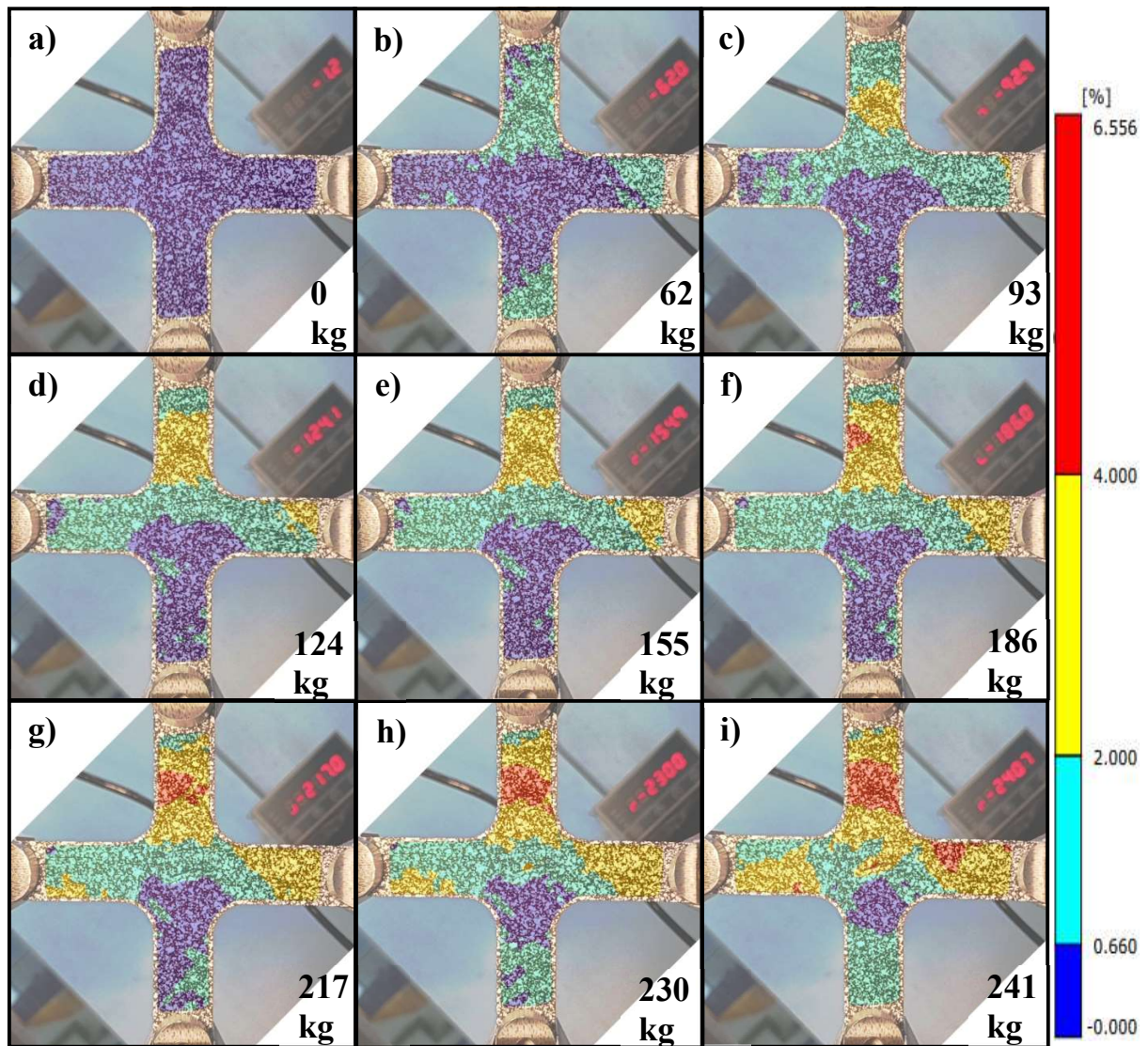


Figura 113. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 20°, prueba EL20AL04, en la fuerza; a) 0 kg, b) 62 kg, c) 93 kg, d) 124 kg, e) 155 kg, f) 186 kg, g) 217 kg, h) 230 kg, i) 241 kg.

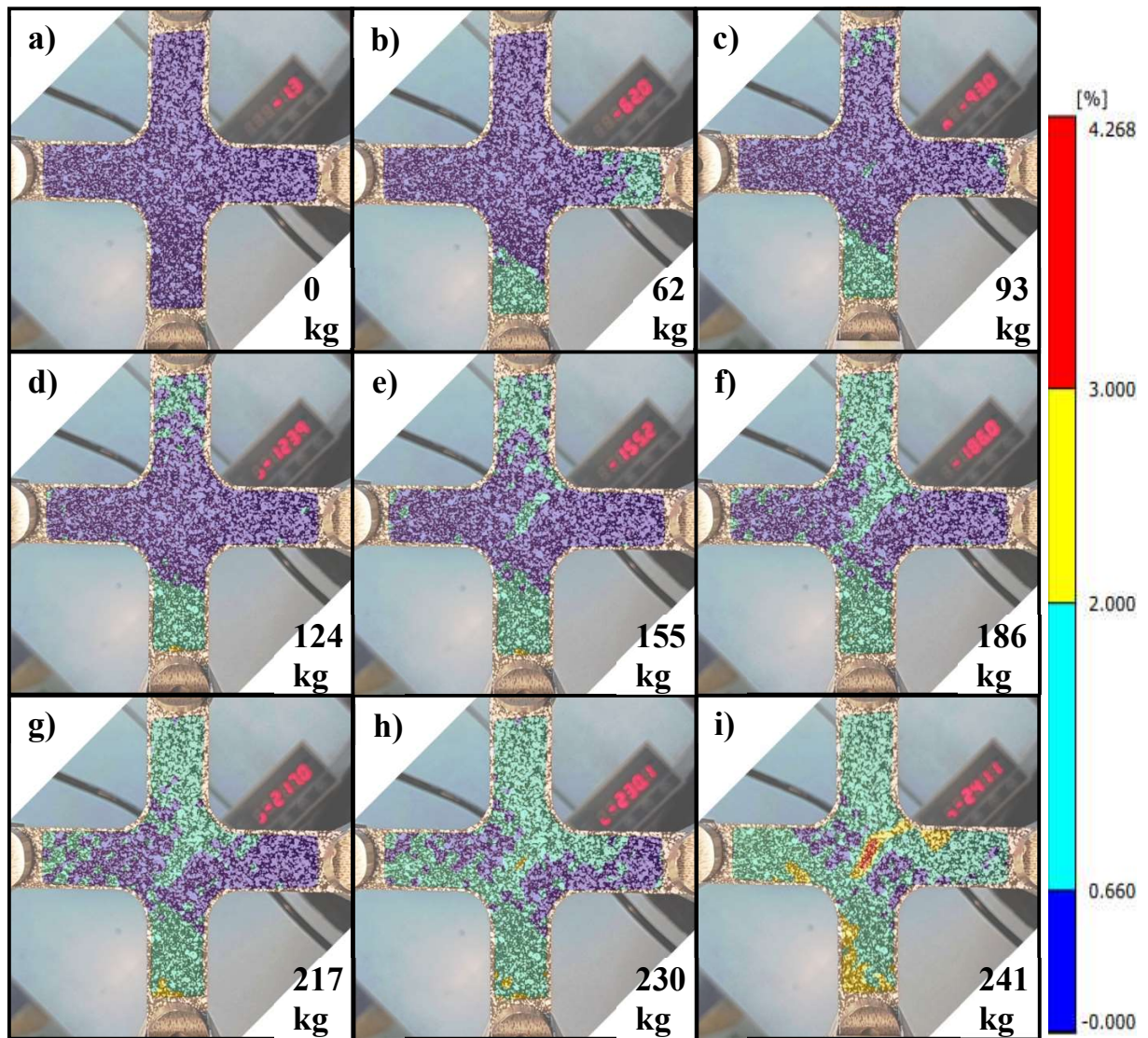


Figura 114. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 25°, prueba EL25AL06, en la fuerza; a) 0 kg, b) 62 kg, c) 93 kg, d) 124 kg, e) 155 kg, f) 186 kg, g) 217 kg, h) 230 kg, i) 241 kg.



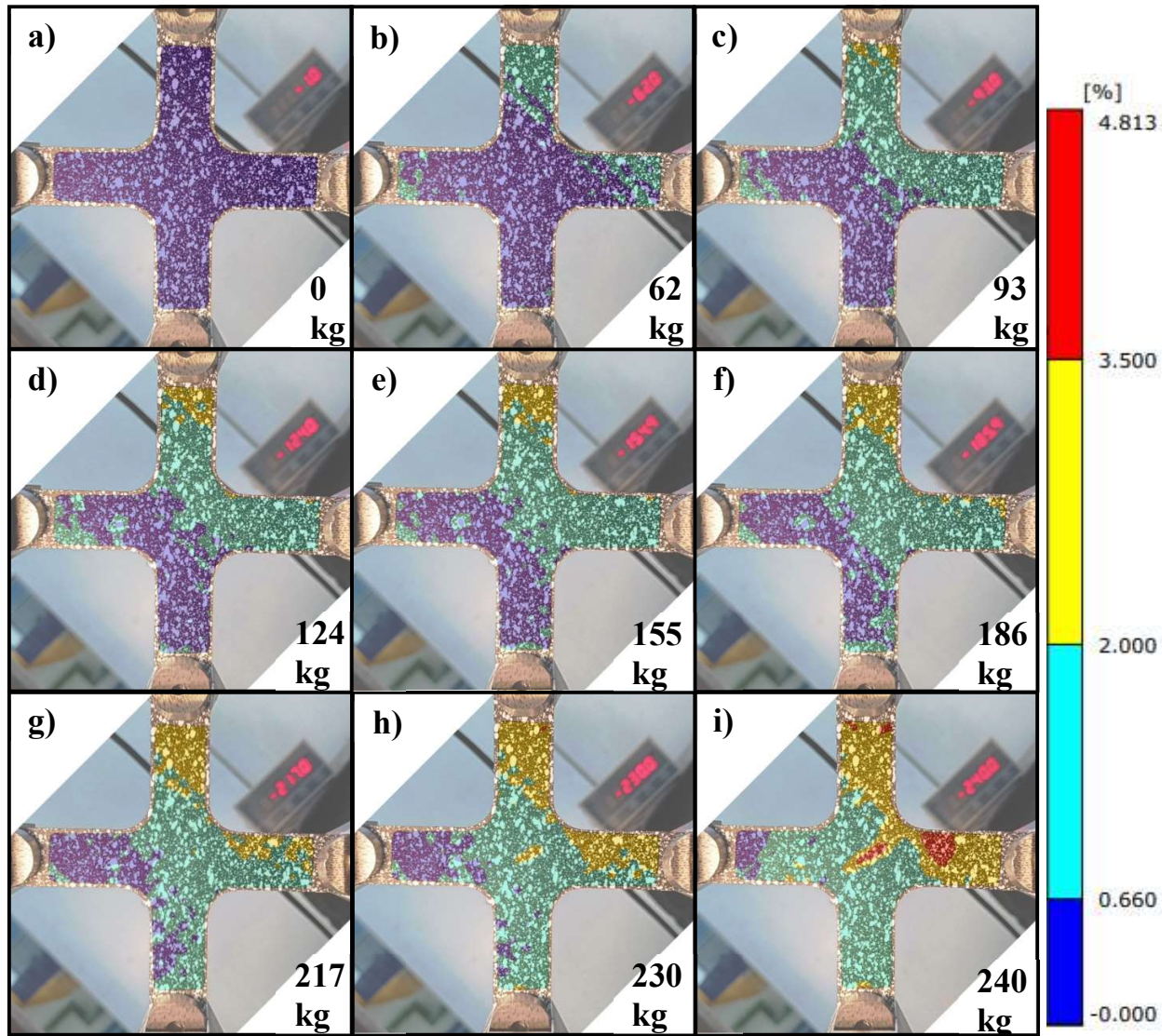


Figura 115. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 30°, prueba EL30AL06, en la fuerza; a) 0 kg, b) 62 kg, c) 93 kg, d) 124 kg, e) 155 kg, f) 186 kg, g) 217 kg, h) 230 kg, i) 240 kg.

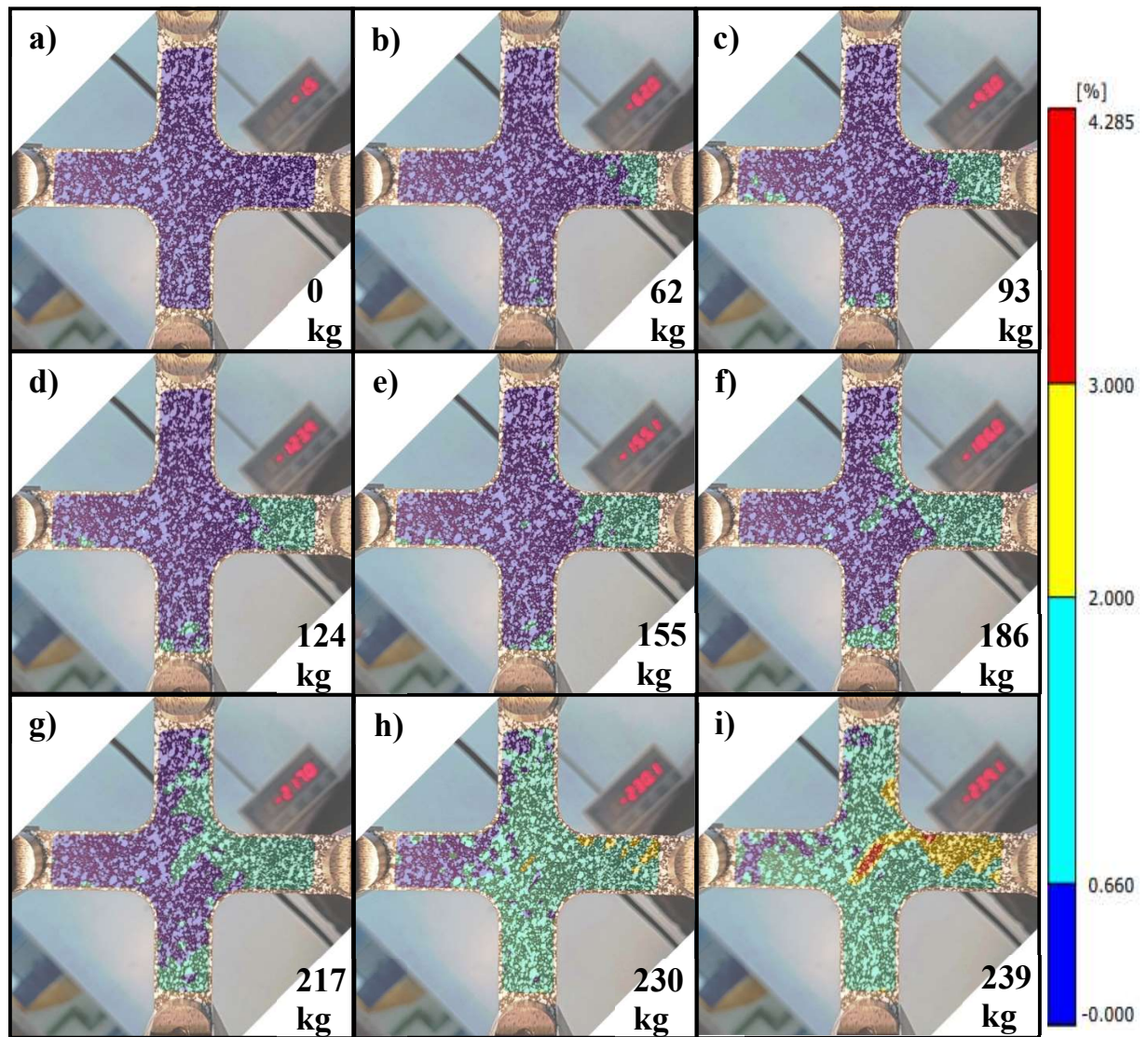


Figura 116. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 35°, prueba EL35AL07, en la fuerza; a) 0 kg, b) 62 kg, c) 93 kg, d) 124 kg, e) 155 kg, f) 186 kg, g) 217 kg, h) 230 kg, i) 239 kg.



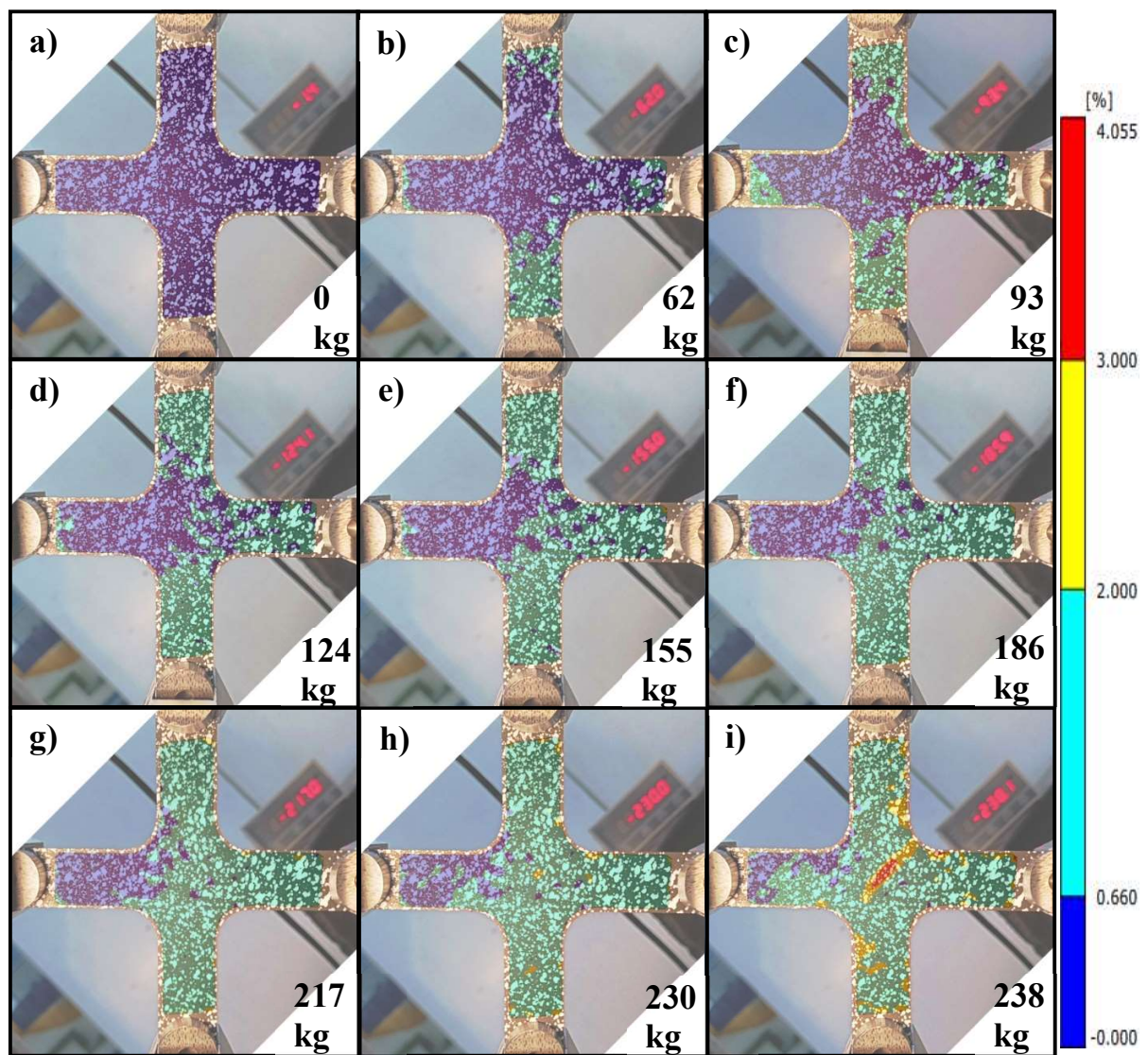


Figura 117. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 40°, prueba EL40AL06, en la fuerza; a) 0 kg, b) 62 kg, c) 93 kg, d) 124 kg, e) 155 kg, f) 186 kg, g) 217 kg, h) 230 kg, i) 238 kg.

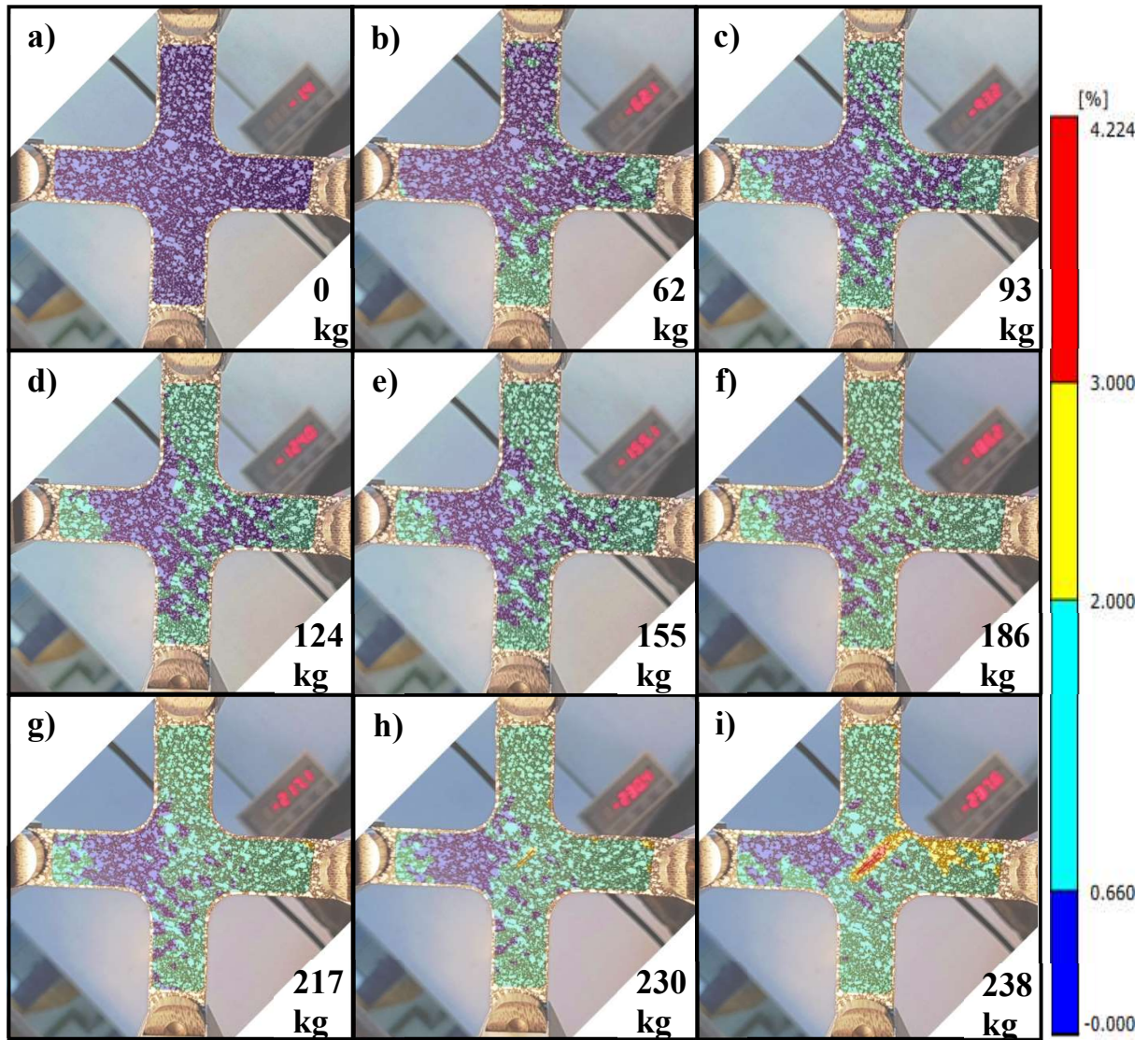


Figura 118. Transición y evolución de la deformación elástica a plástica para probeta con muesca orientada en 20°, prueba EL45AL07, en la fuerza; a) 0 kg, b) 62 kg, c) 93 kg, d) 124 kg, e) 155 kg, f) 186 kg, g) 217 kg, h) 230 kg, i) 238 kg.

Se comparan las fuerzas máximas alcanzadas en las pruebas experimentales y numéricas para las diferentes orientaciones que se presentan, siendo el valor numérico único al máximo permitido en la simulación para cada caso, y en las pruebas experimentales se promediaron los valores obtenidos, en la gráfica únicamente se promedian los valores de las pruebas realizadas donde se tuvo una falla en la fisura de manera experimental.

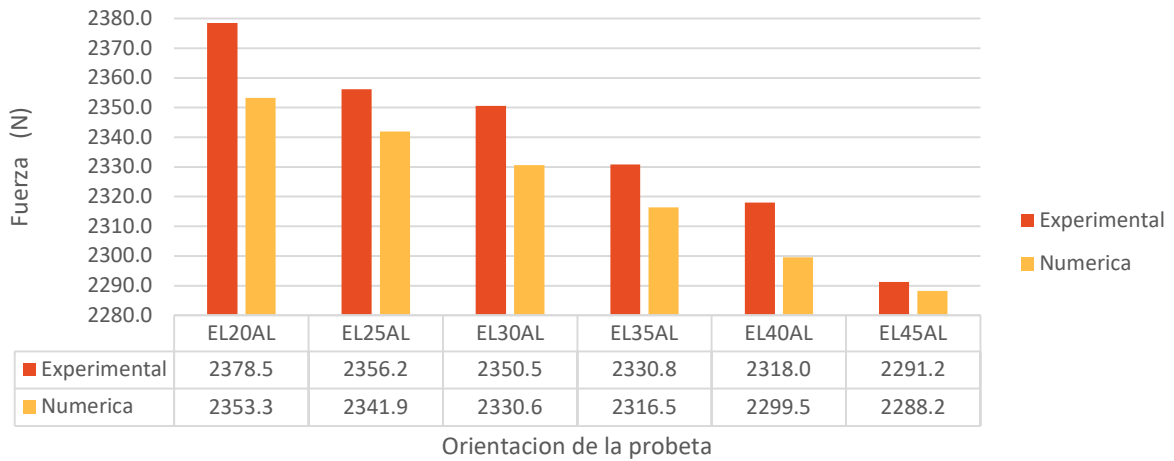


Figura 119. Comparación de fuerza máxima entre pruebas numéricas y experimentales.

Se grafica el error relativo presente entre ambos procedimientos obteniendo como resultado la gráfica de la figura 120.

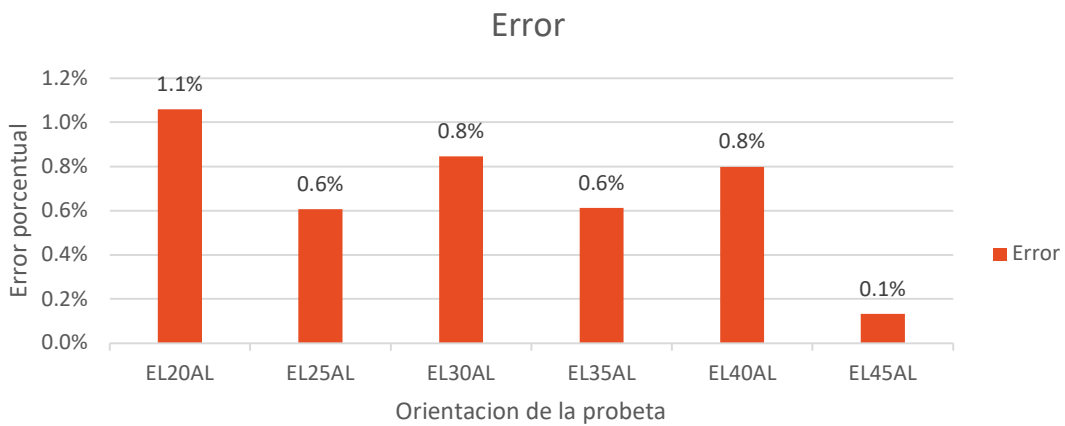


Figura 120. Error relativo en la diferencia de fuerzas máximas entre pruebas numéricas y experimentales.

## Conclusiones

La elección de una geometría óptima para la probeta a ensayar experimentalmente, se establece en las limitaciones de carga y geométricas que el o los dispositivos permitirán considerar, por lo cual el uso de herramientas de simulación permitió ayudar a definir los parámetros adecuadamente.

Las condiciones iniciales ideales de la simulación, distan al comprobar experimentalmente la equiaxialidad de las pruebas, sin embargo, esta variación en la magnitud de las fuerzas en los extremos ortogonales de la probeta se vuelve despreciable.

El moteado de las probetas es determinante al procesamiento de las pruebas, así como la cantidad de datos a procesar, obteniendo gráficas con menor cantidad variación en las pruebas que se hacían en un promedio de 10 minutos, así como un moteado más homogéneo.

Se comprueba que, en un estado biaxial de esfuerzos, el modo predominante de fallo por intensificación de esfuerzos es el modo I (apertura).

En una disposición biaxial ubicando los brazos de la probeta como centro de los ejes, y la posición inicial a  $0^\circ$  como la colinealidad de la fisura a alguno de los ejes elegidos como horizontal o eje 'x', se tendrán los valores de mayor ponderación para  $K_I$  a  $45^\circ$ , mientras que el comportamiento de la curva del intensificador de esfuerzos  $K_{II}$  nos ofrece su mayor valor a 22.5.

Las pruebas realizadas experimentalmente en las orientaciones de  $0^\circ$  a  $15^\circ$  de la grieta no obtuvieron resultados concluyentes al analizar los intensificadores de esfuerzos, demostrando que a partir de una orientación de  $20^\circ$  el valor crítico de Intensificador de esfuerzo se alcanza.



## Referencias

- [1] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, «Introducción a la mecánica de la fractura,» de *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, México, D.F., McGraw-Hill / Interamericana editores, S.A. de C.V., 2012, pp. 229-238.
- [2] Mirasayar, M.M., «Three dimensional Investigation of mode I stress intensity factor variations in crack front using finite element method,» *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, pp. 11-16, 2015.
- [3] A. Boulenouar, N. Benseddiq y M. Mazari, «Two-dimensional numerical estimation of stress intensity factors and crack propagation in linear elastic analysis,» *Eng. Technol. Appl. Sci. Res*, vol. 3, n° 5, pp. 506-510, 2013.
- [4] Ehsan Hedayati y Mohammad Vahedi, «Using extended finite element method for computation of the stress intensity factor, crack growth simulation and predicting fatigue crack growth in a slant cracked plate of 6061-T651 Aluminum,» *World journal of mechanics*, vol. 4, pp. 24-30, 2014.
- [5] Mingming WANG, Ming YAN y Xiangjun ZHU, «Stress Intensity Factor of different position plates with eccentric crack,» *Applied Mechanics and Materials*, vol. 376, pp. 173-176, 2013.
- [6] X.Ji, F.Zhu y P.F.He, «Determination of stress intensity factor with direct stress approach using finite element analysis,» *Acta Mech. Sin.*, n° 33, p. 879–885, 2017.
- [7] Xian-Kui Zhu, «Numerical determination of stress intensity factor using ABAQUS,» *Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference.*, pp. 1-8, 2014.
- [8] Manjeet Singh y Satyendra Singh, «Estimation of stress intensity factor of a central cracked plate,» *International journal of mechanical engineering and technology (IJMET)*, vol. 3, n° 2, pp. 310-316, 2011.
- [9] C. Calí, R. Citarella y M. Perrella, «Three-Dimensional crack growth: numerical evaluations and experimental test,» de *Biaxial / Multiaxial Fatigue and Fracture*, Lisbon, Elsevier Science Ltd. and ESIS, 2001, pp. 341-360.
- [10] R. Guzmán Nogales, «Metodología para la obtención del factor de intensidad de esfuerzos durante la operación de ejes fisurados,» *Instituto Tecnológico de Pachuca*, 2014.

- [11] M. D. Castillo Sanchez, M. d. J. Velázquez Vázquez y J. Garcia Lira, «Análisis simulado de esfuerzos en una placa con agujero elíptico sometida a esfuerzos biaxiales a tensión,» de *Memorias de la Sexta Conferencia Iberoamericana de Complejidad, Informática y Cibernética*, Ciudad de México, 2016.
- [12] David Chambers, «A robust optical method for tracking mechanism components,» de *Digital Image Correlation Advanced Methods and Applications*, Albuquerque, Nova Science Publishers, Inc., 2017, p. 67.
- [13] J. L. Cuevas Hernández, «Influencia de los esfuerzos residuales en la morfología del crecimiento de grieta por fatiga en AL6061-T6,» *Instituto Tecnológico de Pachuca*, 2017.
- [14] L. Luciano, L. Ming-Tzer, C. Furlong, C. Sciammarella, P. L. Reu y M. A. Sutton, *Advancement of Optical Methods & Digital Image Correlation in Experimental Mechanics*, Volume 3, vol. 3, Cham: Springer, 2018.
- [15] J. E. Resendiz Hernández, «Medición Experimental de factor de intensificador de esfuerzo en placas agrietadas utilizando correlacion de imagenes digitales,» *Instituto Tecnológico de Pachuca*, 2018.
- [16] E. M. Rodriguez Viguera, J. A. Moctezuma Camargo, L. M. Palacios Pineda y A. Elías Zuñiga, «Diseño de un dispositivo mecánico de pruebas biaxiales,» de *Memorias XXV Congreso internacional anual de la SOMIM*, Mazatlan, 2019.
- [17] D. Castillo Monterrubio, «Determinación de los intensificadores de esfuerzos en fisuras en materiales poliméricos sujetos a una condicion biaxial de esfuerzos,» *Instituto Tecnológico de Pachuca*, 2020.
- [18] J. A. Moctezuma Camargo, «Evolución del intensificador de esfuerzos en fisuras sujetas a condiciones de carga biaxial,» *Instituto Tecnológico de Pachuca*, 2020.
- [19] D. A. Vera Cieza, «La técnica de correlacion de imágenes digitales aplicada a ensayos de materiales,» *Pontificia Univeridad Católica del Perú*, 2020.
- [20] N. Perez, *Fracture Mechanics*, New York: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [21] D. R. Askeland, «Tenacidad a la fractura,» de *Ciencia e ingeniería de los materiales*, México D.F., International Thomson Editores, S.A. de C.V., 1998, pp. 147-150.
- [22] J. Newell, «Fracturas Mecánicas,» de *Ciencia de materiales. Aplicaciones en Ingeniería*, México D.F., Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., 2010, pp. 91-94.



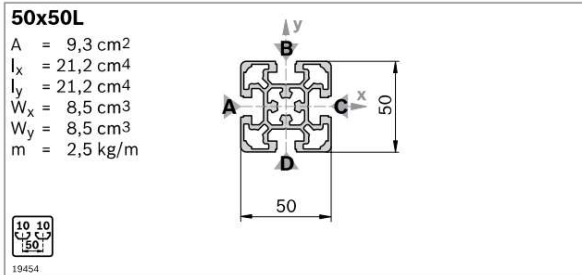
- [23] A. Güemes Gordo y N. Martín Piris, «Tenacidad de fractura,» de *Ciencia de materiales para ingenieros*, Madrid, Pearson Educación. S.A., 2012, pp. 30-32.
- [24] T. Anderson, *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*, Florida: CRC Press LLC, 1995.
- [25] E. Gdoutos, *Fracture Mechanics an Introduction*, Dordrecht: Springer, 2005.
- [26] J. F. Shackelford, «Tenacidad de Fractura,» de *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*, Madrid, Pearson Educación, S.A., 2005, pp. 266-270.
- [27] P. Wriggers, *Nonlinear Finite Element Methods*, Hannover: Springer, 2008.
- [28] I. Correlated Solutions, «Digital Image Correlation: Overview of principles and Software,» [En línea]. Available: <http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/condensed-shortcourse.pdf>

## Anexos

### Anexo A: Datos técnicos de elementos que constituyen la fabricación del dispositivo pruebas biaxiales

#### Resistencia de la ranura del perfil

Valores límite de carga estática de la ranura (inicio de la deformación plástica) **en empalmadores con la mayor rosca**



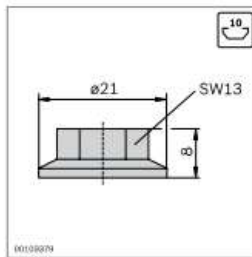
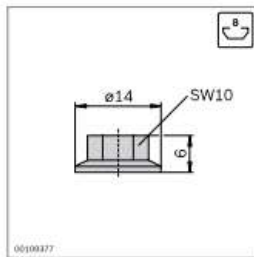
		$F_{max}$ Tornillo de cabeza de martillo	$F_{max}$ Tuerca de martillo	$F_{max}$ Tornillo central	$F_{max}$ Bloque ranurado giratorio	$F_{max}$ Bloque ranurado
	 20x20, 20x20R 10x40 20x40, 20x60 20x40x40	1700 N	1700 N	2000 N	—	3000 N
	 30x30, 30x30R 30x30°, 30x45°, 30x60° 11x20, 15x120 30x45, 30x60, 30x60x60 30x90, 30x120	4000 N	4000 N	5000 N	2200 N	6000 N
	 90x90SL 40x40L, 40x40L R 40x30°, 40x45°, 40x60° 40x80L, 40x120L, 40x160L 40x80x80L 80x80L 80x120L, 80x160L 45x45L, 45x45L R 45x30°, 45x45°, 45x60° 15x22,5, 15x180, 22,5x45 45x90L, 45x90x90L 50x50L, 50x50L R 50x100L, 50x150L 100x100L, 100x200L 60x60L	6000 N 7000 N	6000 N 7000 N	9000 N 10000 N	8000 N 9000 N	11000 N 12000 N
	45x45 60x60 90x90L 22,5x180 45x60 45x90, 45x180 90x180L	12000 N	12000 N	15000 N	13000 N	17000 N
	45x270 60x90 90x90 90x180 90x360	18000 N	18000 N	22000 N	18000 N	24000 N

19

Bosch Rexroth AG, 3 842 540 395 (2017-08)

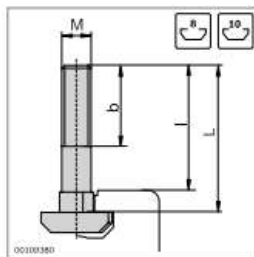
		Ranura					
	20/20	6	3 Nm	700 N	6 Nm	25 Nm	-
	20/40	6	3 Nm	1400 N	15 Nm	50 Nm	8 Nm
	30/30	8	10 Nm	1250 N	25 Nm	75 Nm	-
	30/60	8	10 Nm	2500 N	100 Nm	170 Nm	25 Nm
	30/120	8	10 Nm	3750 N	100 Nm		47 Nm
	60/60-8	8	10 Nm	5000 N	320 Nm	370 Nm	110 Nm
	60/60-10	10	25 Nm	3000 N	125 Nm	150 Nm	-
	40/40	10	25 Nm	3000 N	55 Nm	145 Nm	35 Nm
	40/80	10	25 Nm	6000 N	180 Nm	400 Nm	60 Nm
	40/160	10	25 Nm	9000 N	250 Nm		60 Nm
	80/80	10	25 Nm	14000 N	500 Nm	1000 Nm	400 Nm
	45/45	10	25 Nm	3000 N	60 Nm	160 Nm	-
	45/90	10	25 Nm	6000 N	180 Nm	400 Nm	60 Nm
	45/180	10	25 Nm	9000 N	250 Nm		65 Nm
	90/90	10	25 Nm	12000 N	370 Nm	800 Nm	200 Nm
	43x42	10	25 Nm	2000 N	-	160 Nm	-
	50/50	10	25 Nm	4000 N	125 Nm	250 Nm	38 Nm
	50/100	10	25 Nm	7500 N	300 Nm	600 Nm	73 Nm
	100/100	10	25 Nm	15000 N	550 Nm	1100 Nm	480 Nm

Escuadra (pág. 3-17)



Tuerca con collar	Ranura	M	ESD	N.º
	8	M6	100	3 842 523 925
	10	M8	100	3 842 345 081

Material: Acero; galvanizado



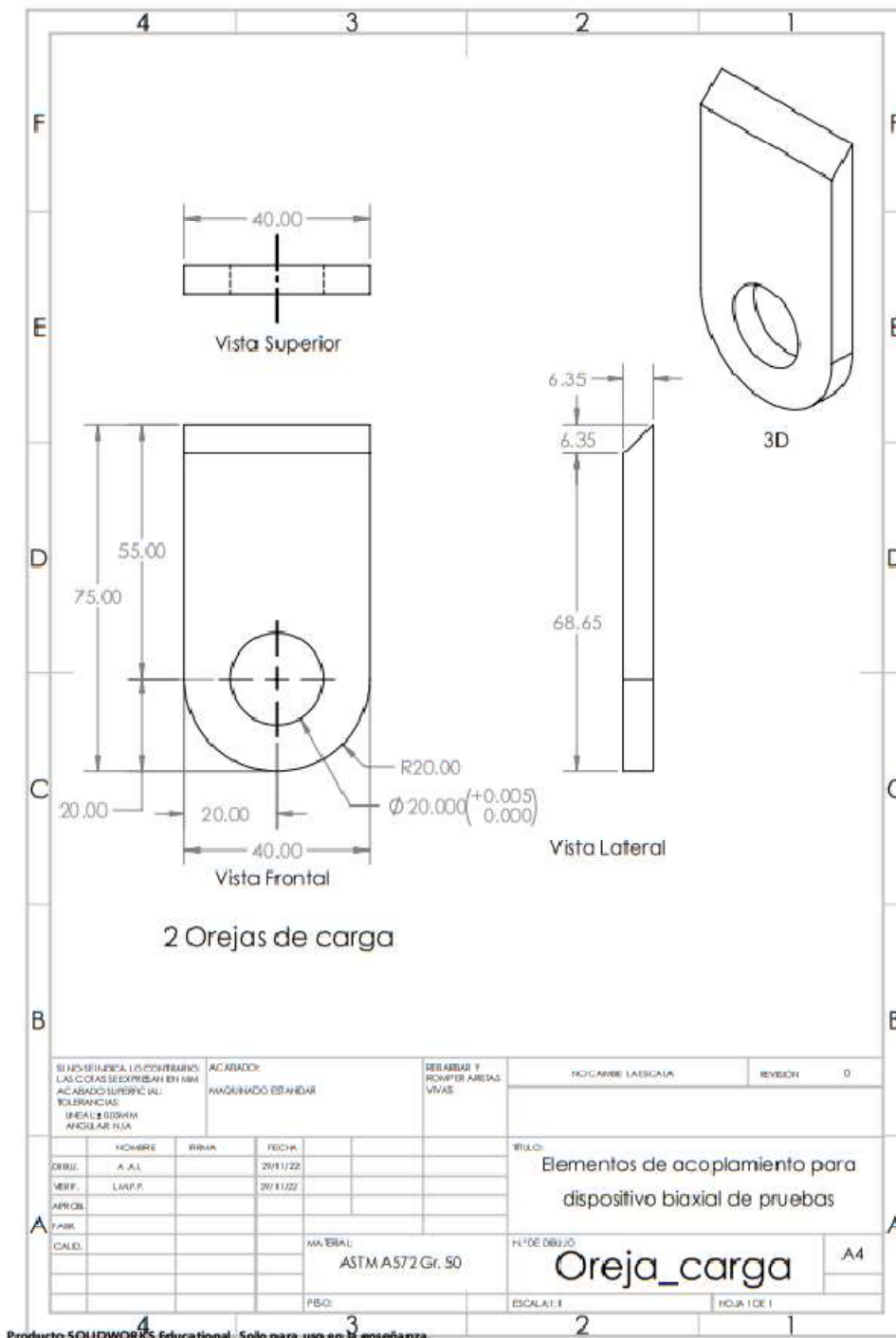
Ranura	
8	4000 N
10	6000 ... 18000 N <sup>1)</sup>

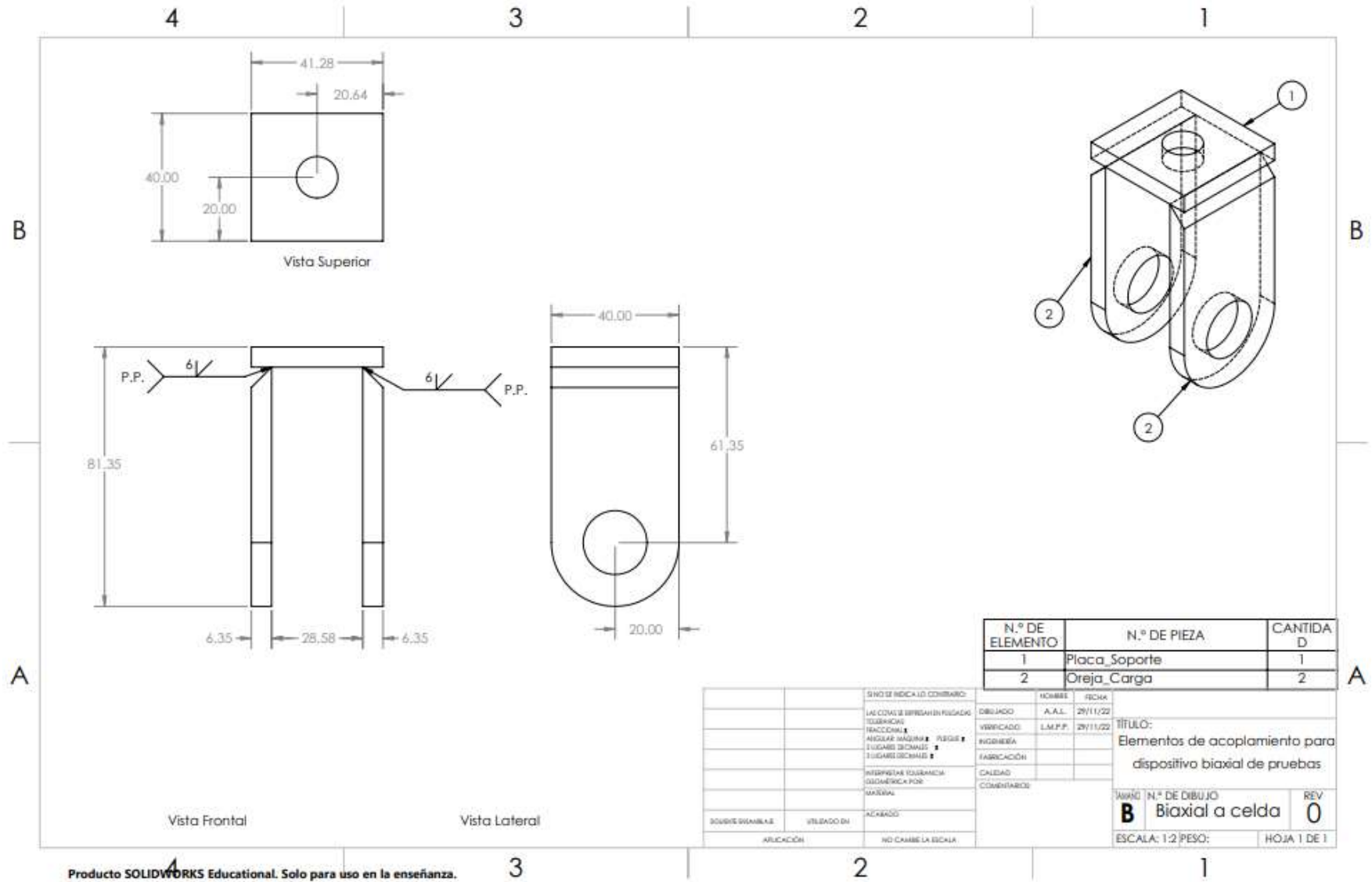
<sup>1)</sup> En función del perfil  
(pág. 19-5)

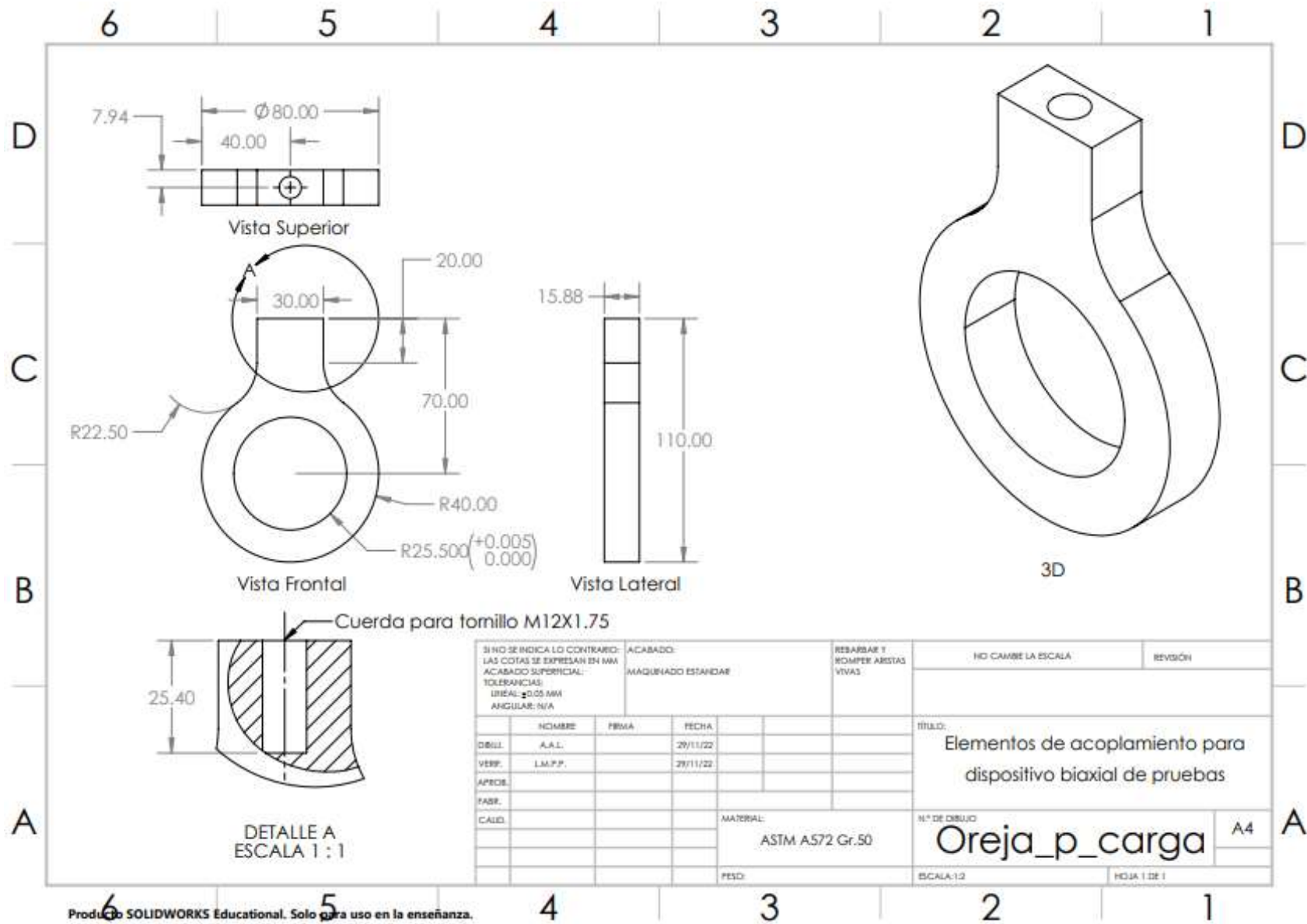
Tornillo de cabeza de martillo	Ranura	MxL	b (mm)	l (mm)	ESD	N.º
8	M6x16	10	14	100	3 842 523 920	
	M6x20	14	18	100	3 842 523 921	
	M6x25	18	23	100	3 842 523 922	
10	M8x20	14	14	100	3 842 528 715	
	M8x25	19	19	100	3 842 528 718	
	M8x30	24	24	100	3 842 528 721	
	M8x40	22	34	100	3 842 528 724	
	M8x50	22	44	100	3 842 528 727	
	M8x60	22	54	100	3 842 528 730	

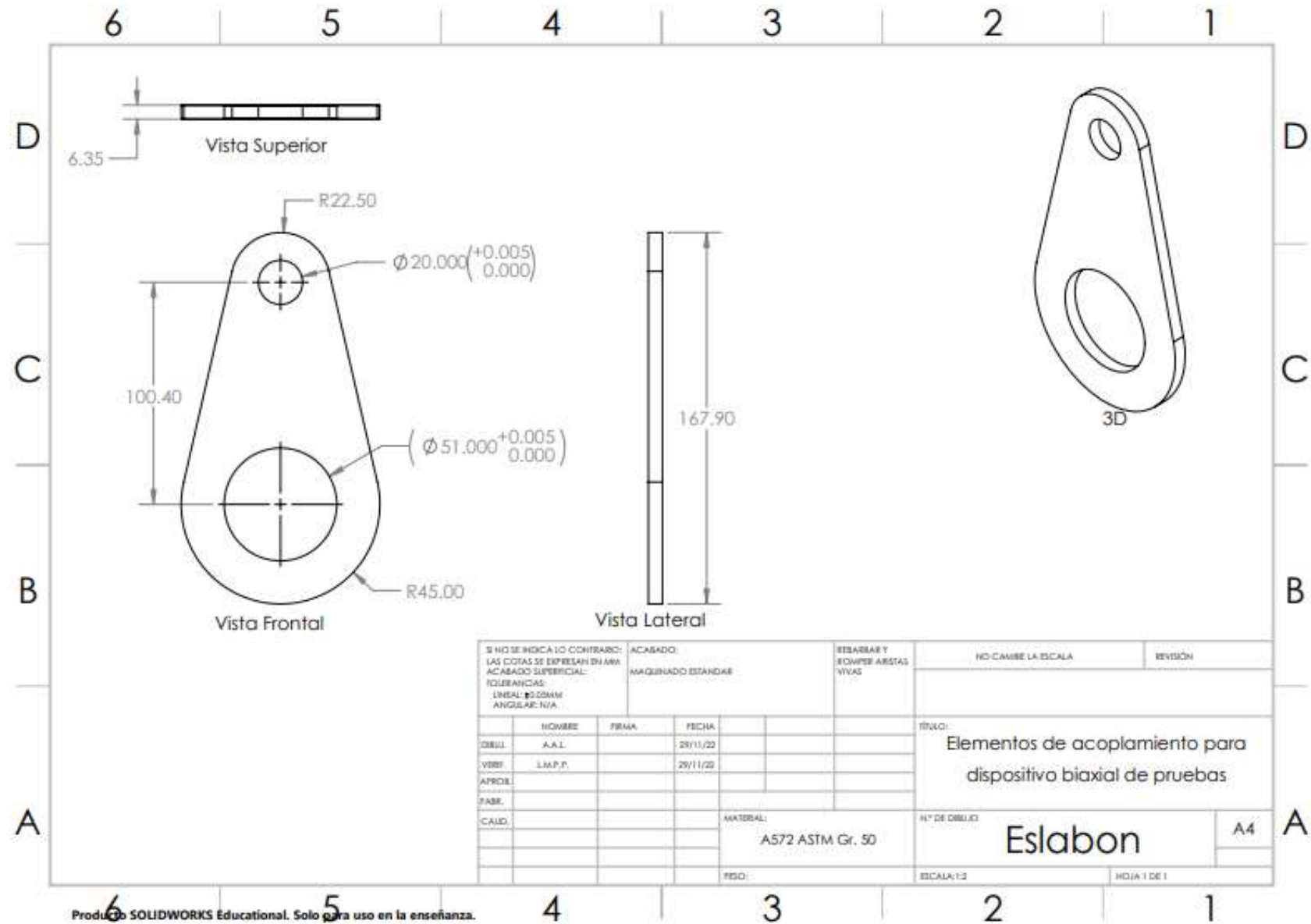
Material: Acero; galvanizado

## Anexo B: Dibujos de detalle de sistema de acoplamiento entre Dispositivo de pruebas biaxiales y maquina universal de ensayos









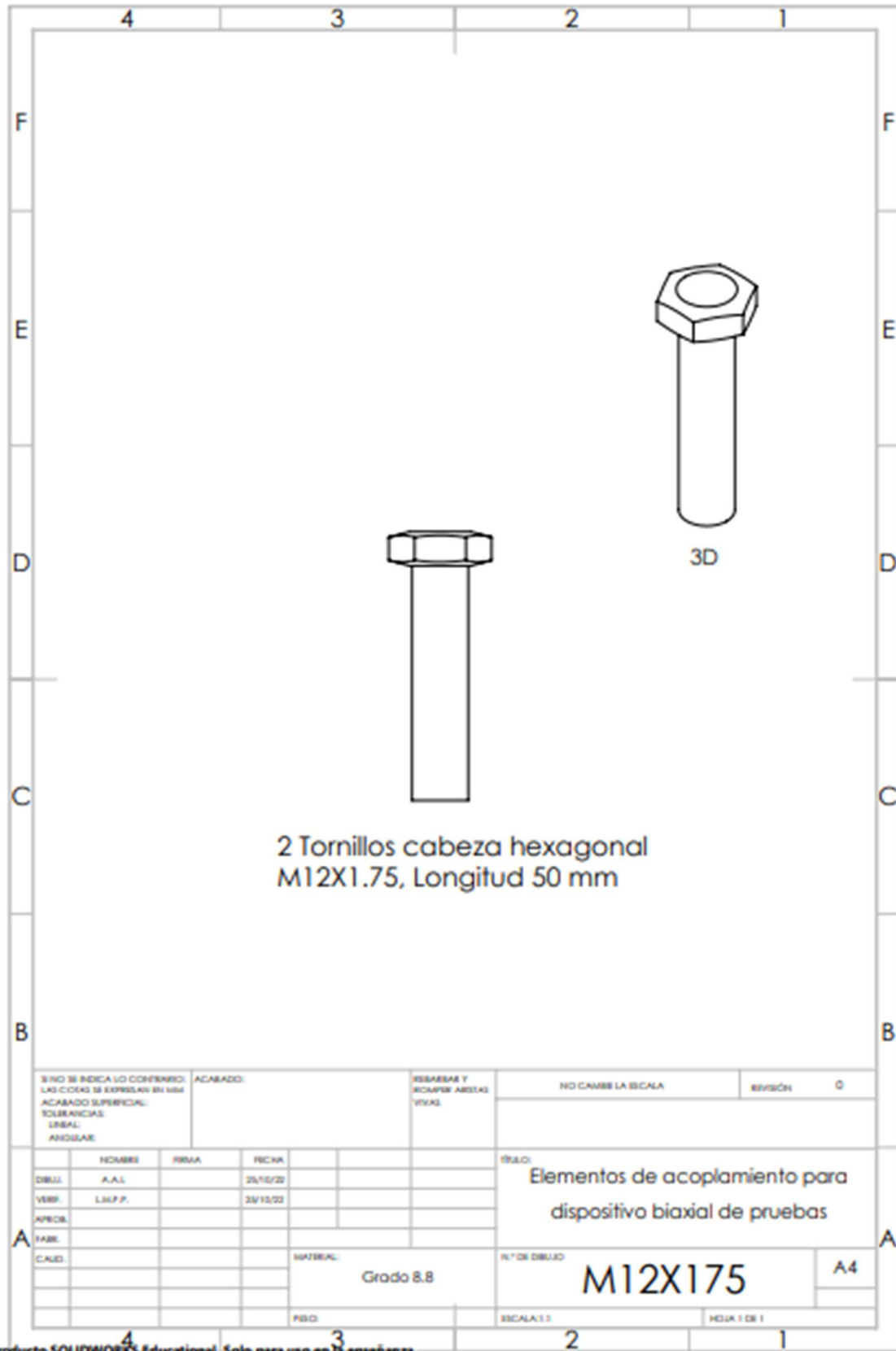


2 Tornillos hexagonal estructural A325  
de 3/4 x 2-1/2" con tuerca hexagonal

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE ESPESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA.	REVISIÓN 0																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DRG.</td> <td>A.A.L.</td> <td></td> <td>26/10/20</td> </tr> <tr> <td>VER.</td> <td>L.M.F.F.</td> <td></td> <td>26/10/20</td> </tr> <tr> <td>APRO.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FAB.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CHD.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			NOMBRE	FIRMA	FECHA	DRG.	A.A.L.		26/10/20	VER.	L.M.F.F.		26/10/20	APRO.				FAB.				CHD.				MATERIAL: Tornillo Grado Estructural A325		TÍTULO: Elementos de acoplamiento para dispositivo biaxial de pruebas  N.º DE DIBUJO: <b>ASTM_A325_19</b> A4	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA																										
DRG.	A.A.L.		26/10/20																										
VER.	L.M.F.F.		26/10/20																										
APRO.																													
FAB.																													
CHD.																													
		FECH.	ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1																									

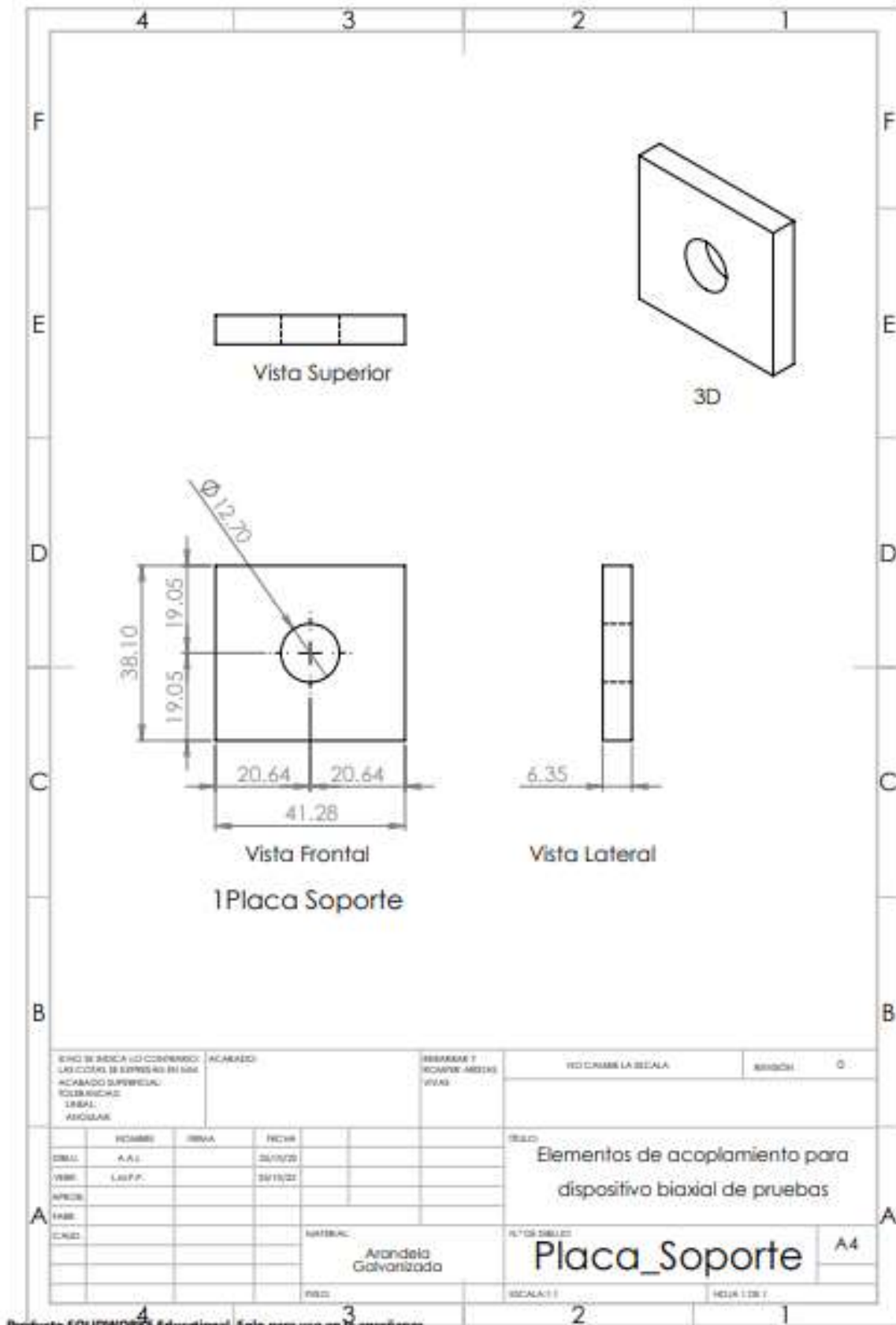
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

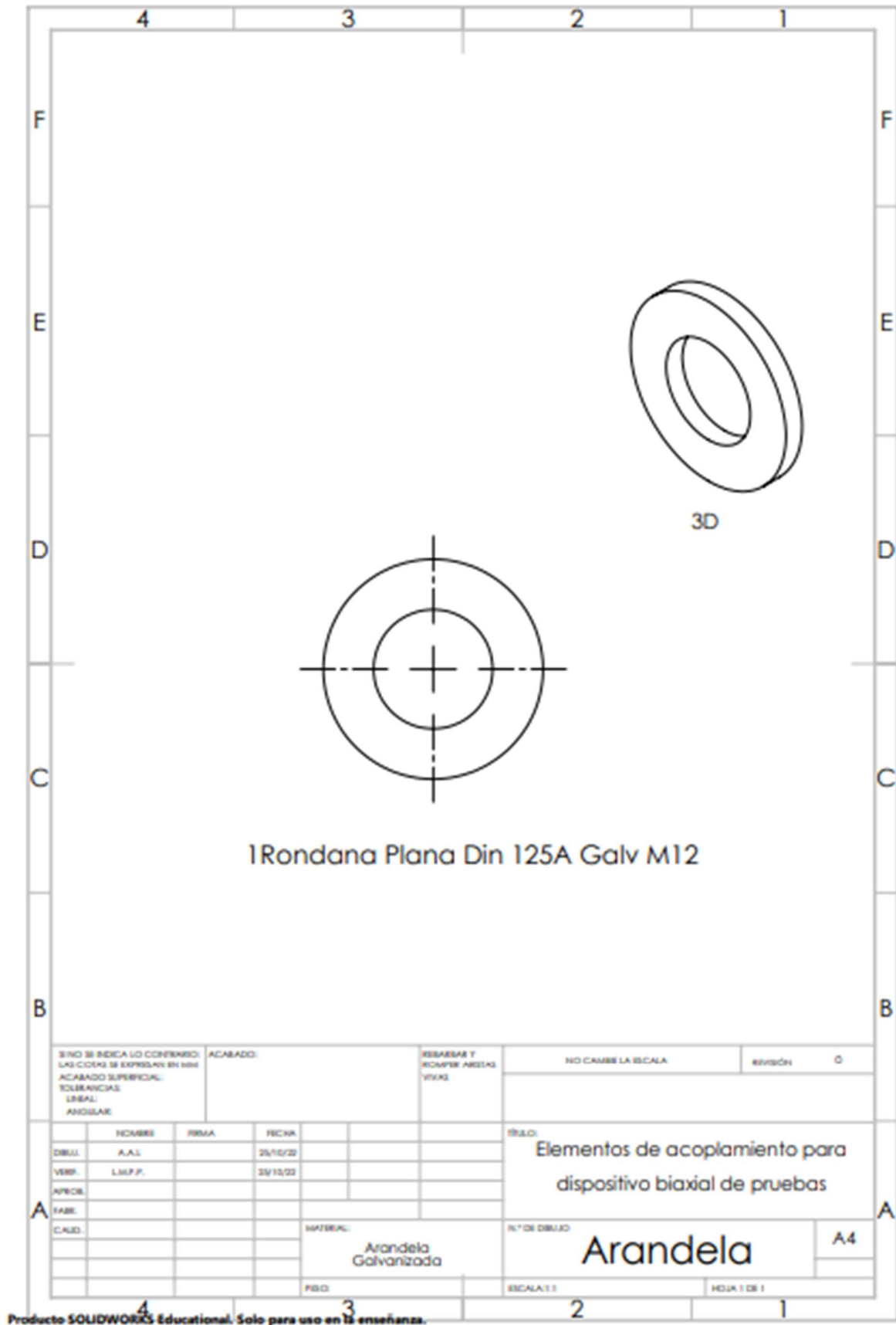




Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

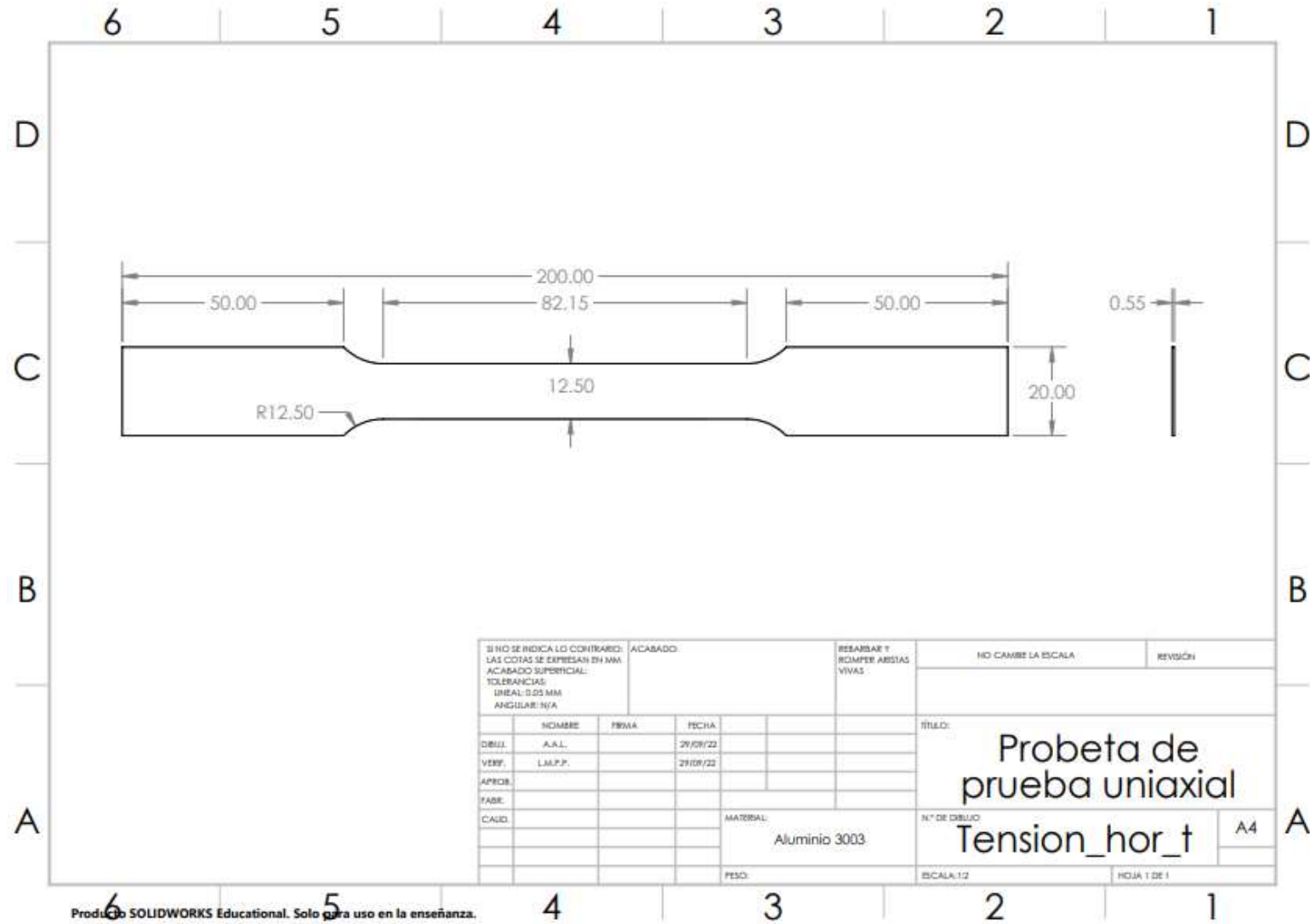






Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

**Anexo C: Dibujos de detalle de probeta de geometría seleccionada para pruebas experimentales uniaxiales**





Anexo E: Datos técnicos en factura de material



**Líder en la Distribución de Metales y Plásticos de Ingeniería**

AVE DIEGO DIAZ DE BERLANGA 95A  
COL INDUSTRIAL NOGALAR  
SAN NICOLAS, NUEVO LEON, MEX

Tel: 0155-5569-9422, 0155-5569-7981  
METALES DIAZ SA DE CV  
RFC: MDI8508139K8 CP: 66484

Lugar de expedición:  
Sucursal SANTA CLARA  
VIA MORELOS

ECATEPEC  
MEX  
MEX  
CP: 55310  
Tels: 0155-5569-9422, 0155-5569-7981

Folio Fiscal - UUID:  
BC484DA9-5945-45E9-9AA3-0D443CB3E442

Fecha y hora de certificación:  
2022-09-13T12:07:04

No de Serie del Certificado del CSD:  
00001000000505211379

No de Serie del Certificado del SAT:  
00001000000505211379

Id. comprobante: 1933689

Tipo de comprobante: I - Ingresos

CFDI Versión 3.3

www.metalesdiaz.com.mx

Facturar a:

Cte: # 000007332 Nom: TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO/INSTITUTO TECNOLÓGI Dir: AV UNIVERSIDAD NO.1200 QUINTO PISO COL.XOCO BENITO JUÁREZ Cd: COYDACAN, MEX, MEX CP: 03330 RFC: TNM140723GFA Uso CFDI: G03-GASTOS EN GENERAL NumRegIdTrib:	Enviar a: Dir: Col: Cd: Tels:	Fecha Factura: 13-09-2022 Vendedor: MOB# 11 Página 1 de 1 Condiciones de pago: Contado Pedido: MOB-412406-1 Orden de compra: Folio Control: 408211426 Fecha Emisión: 13-09-2022 Hora Emisión: 12:07:01 Fecha Impresión: 13-09-2022 Hora Impresión: 12:07:13
---	---	--

Cantidad	Cve Unidad	Unidad Medida	Clave ProdServ	Codigo	Descripción	P. Unitario	Desc	Impuestos	Loc	Importe
3.05	MTR	MT	30102006	3400A	4.209 KG LAM LISA HOJA AL 3003 0.56 X 914 X 3050 MM CAL 24	246.1968	902 IVA	120.1440		758.90



Cadena Original del complemento de certificación digital del SAT:  
 1.1|BC484DA9-5945-45E9-9AA3-0D443CB3E442|2022-09-13T12:07:04|INT020124V62|BUZDGedYF17puzqAWOXmRIQqizrU58UJn6gXGcivL5h6g7nZUI8pkOjVGVsuBdGlnB  
 Smjdt5OPEIXikgl7EytjVZ5GyF9wdVOsDb|Fvo5n4Rbp|2lDwJvDsD7bvucGqLQyUJIRkVky6sGpMCSYaE+0SsxtPIKhetAD7DFh/qhK6LYcUArgoMM8sGZ+qDqvNWBnebN  
 LX3Sg/VbOjg|SLLE1J54bsENHNcodJ060j8eyamTABrAgD0i3KE8v3WfbKGZnSDi0DAXeyvNY6g58Y9UluazjV+UzZa4DgyZLJj+0k4O6Warym0c+GtA6DWLqXfWxaYA==|0



Sello SAT:  
 PPFNyqTkiL6JwOhfCct1wsEvcYwJe9+IA03iBLChqyoC4JO3us45Mf5/K+|08K1YcnCOLPeTnyk5wUJ7Gy8032CxfGfsDVtmsmrE9Hgj154SPi  
 cACqTjSSkVhQmpS4JBI32ahHPCID7v0qMgg2Klxy9qOvbWBypvzxo8oH3pk+afZ3pMV4V1JGktaA0q62aL2M+ESDZHWr3x8aGNMvbxEEJ

Sello Digital del CFDI:  
 BUZDGedYF17puzqAWOXmRIQqizrU58UJn6gXGcivL5h6g7nZUI8pkOjVGVsuBdGlnBsmjdt5OPEIXikgl7EytjVZ5GyF9wdVOsDb|Fvo5n4R  
 bp|2lDwJvDsD7bvucGqLQyUJIRkVky6sGpMCSYaE+0SsxtPIKhetAD7DFh/qhK6LYcUArgoMM8sGZ+qDqvNWBnebN|LX3Sg/VbOjg|SL

Observaciones : Regimen fiscal: 601		Moneda: MXN-PESO MEXICANO		Importe	750.90
Forma de pago: 01-EFECTIVO	Clave confirmación:	Tipo de Cambio: 1	Descuento	0.00	
Numero de Cuenta:			Subtotal	750.90	
Tipo relación:			I.V.A. 16%	120.14	
CFDI Relacionado:			I.V.A. Retenido 16%	0.00	
Kilogramos calculados			Total	871.04	

**Total con Letra:**  
 \*\*\*OCHOCIENTOS SETENTA Y UN PESOS 04/100 M.N.\*\*\*

**Pagaré.** BUENO POR \$ **871.04** En SAN NICOLAS, NUEVO LEON, a **13 de SEPTIEMBRE de 2022**  
 Debo y pagaré incondicionalmente por este Pagaré a la vista a la orden de METALES DIAZ SA DE CV, en AVE DIEGO DIAZ DE BERLANGA 95A COL INDUSTRIAL NOGALAR,  
 SAN NICOLAS, NUEVO LEON

La cantidad de: **\*\*\*OCHOCIENTOS SETENTA Y UN PESOS 04/100 M.N.\*\*\***

Valor recibido a entera satisfacción. Este pagaré está sujeto a la condición de que, al no pagarse a su vencimiento será exigible, además desde la fecha de vencimiento hasta el día de su liquidación, causará intereses moratorios al tipo de 5% mensual, pagadero en esta ciudad juntamente con el principal.

El Suscriptor: Nombre(s) Firma(s):

## **Anexo F: Procedimiento para la creación geométrica en APDL (Por sus siglas en ingles “ANSYS PARAMETRIC DESIGN LANGUAGE”)**

Para la generación de un análisis usando APDL es importante considerar los siguientes puntos

1. La definición del espacio geométrico, los tipos de elemento que se usaran para la discretización, las opciones del tipo de análisis, las condiciones bajo las cuales se realizara el análisis, el tipo de material definido en su Modulo de Young, así como su coeficiente de poisson. Todas estas características se realizan dentro del módulo de preproceso, por lo cual es importante previo a designar a través de un comando, referirle al programa que utilizaremos este módulo a través del comando **/PREP7**.

Si el elemento se realizara de manera bidimensional, asignar un espesor a la geometría que se va a generar.

2. La generación geométrica del elemento de análisis, Tener presente que los comandos para la creación de elementos se realizan en el preproceso, por lo cual antes de introducir cualquier elemento es necesario decirle al programa **/PREP7** con lo cual indicamos que trabajaremos en esta sección si es que previamente no se ha activado.
  - a. Por medio del uso de ecuaciones matemáticas, o utilizando la ayuda de un CAD (por sus siglas en ingles Computer Aided Design) se obtiene el espacio geométrico a utilizar para el planteamiento de nuestro problema delimitado por puntos, se recomienda tener claro el origen de nuestro elemento, así como previamente delimitar si utilizaremos la ayuda de planos de simetría, se recomienda utilizar algún programa que permita tener registro tabular de nuestra captura de datos, así como ser ordenado en la continuidad numérica asignada a cada punto, teniendo en cuenta un punto claro de referencia para el inicio y fin de nuestra secuencia de puntos. Para la asignación de puntos en un espacio plano tendremos la definición por medio de coordenadas lineales ubicadas en un lugar del plano xy.



- i. La estructura a introducir es la siguiente: **K,X,Y**.
  1. **K** (letra que indica que se introducirá un punto (KEYPOINT))
  2. **X** (Coordenada de distancia para el eje de X, valor introducido en metros)
  3. **Y** (Coordenada de distancia para el eje de Y, valor introducido en metros)
  
- ii. El otro camino para introducir un punto (KEYPOINT) es a través del menú principal, Seleccionamos Preprocessor\_Modeling\_Create\_Keyoints, y tenemos una amplia gama de posibilidades para la creación de los mismos.
- b. Asignaremos la secuencia de estos puntos definidos en un trazo (utilizando rectas y curvas), se sugiere también tener un registro tabular asignando un número secuencial a cada trazo a realizar, así como tener un orden en la preparación de cada línea y también tener en cuenta el inicio y fin de la misma.
  - i. La estructura para introducir una línea recta es la siguiente: **L,A,B**.
    1. **L** (letra que indica que se introducirá una línea recta)
    2. **A** (número del punto (Keypoint) de inicio de la línea)
    3. **B** (número del punto (Keypoint) donde finaliza la línea)
  - ii. La estructura para introducir un arco definido por tres puntos es:  
**LARC,A,B,C**
    1. **LARC** (Letras que definen que se introducirá un arco por 3 puntos)
    2. **A** (número del punto (Keypoint) de inicio del arco)
    3. **B** (número del punto (Keypoint) donde finaliza el arco)
    4. **C** (número del punto (Keypoint) intermedio del arco)
  - iii. Por otro lado, para introducir el trazo entre keypoints utilizando el menú, Seleccionamos Preprocessor\_Modeling\_Create\_Lines, y a partir de aquí depende de las necesidades del trazo, el programa nos permite trazar líneas simples (Lines), arcos (Arcs), y líneas segmentadas basadas en incrementos (Splines), por lo cual se recomienda tener una idea clara de la malla futura que se definirá.

- c. En la creación de áreas tendremos como principal enfoque las áreas creadas a partir de líneas, estas pueden definirse de manera grafica a través de la selección de opciones del menú definido en la ruta

Preprocessor\_Modeling\_Create\_Areas\_Arbitrary\_By Lines de aquí se despliega un menú flotante que nos sirve de referencia al momento de la selección de las líneas que delimitan el área.

- i. En la parte programada se puede definir lo previo realizado a través del comando descrito como:  $AL,A,....N$

1. **AL** (letras que indican que se introducirá un área delimitada por líneas)
2. **A** (numero de la primera línea que define el área)
3. **N** (designación para la línea número “n” secuencial del área)

**Anexo G: Código en APDL para la simulación de probeta biaxial elegida para pruebas experimentales**

“Prueba a 0°”	“Prueba a 5°, hasta 40°”	“Prueba a 45°”
/PREP7	/PREP7	/PREP7
dis=0.01242893	dis=0.01242893	dis=0.01242893
a=0.005	a=0.005	a=0.005
pi=3.14159265358979	pi=3.14159265358979	pi=3.14159265358979
alfa=0	alfa=5	alfa=45
ET,1,PLANE183	ET,1,PLANE183	ET,1,PLANE183
KEYOPT,1,1,0	KEYOPT,1,1,0	KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,3	KEYOPT,1,3,3	KEYOPT,1,3,3
KEYOPT,1,6,0	KEYOPT,1,6,0	KEYOPT,1,6,0
R,1,0.00054,	R,1,0.00054,	R,1,0.00054,
MPTEMP,,,,,,,,	MPTEMP,,,,,,,,	MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0	MPTEMP,1,0	MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,337E2	MPDATA,EX,1,,337E2	MPDATA,EX,1,,337E2
MPDATA,PRXY,1,,0.33	MPDATA,PRXY,1,,0.33	MPDATA,PRXY,1,,0.33
K,1,0.075,0	K,1,0.075,0	K,1,0.075,0
K,2,0.07221751,0.00671751	K,2,0.07221751,0.00671751	K,2,0.07221751,0.00671751
K,3,0.0655,0.0095	K,3,0.0655,0.0095	K,3,0.0655,0.0095
K,4,0.0505,0.0095	K,4,0.0505,0.0095	K,4,0.0505,0.0095
K,5,0.0195,0.0095	K,5,0.0195,0.0095	K,5,0.0195,0.0095
K,6,0.01567317,0.0102612	K,6,0.01567317,0.0102612	K,6,0.01567317,0.0102612
K,7,0.01242893,0.01242893	K,7,0.01242893,0.01242893	K,7,0.01242893,0.01242893
K,8,0.0102612,0.01567317	K,8,0.0102612,0.01567317	K,8,0.0102612,0.01567317
K,9,0.0095,0.0195	K,9,0.0095,0.0195	K,9,0.0095,0.0195
K,10,0.0095,0.0505	K,10,0.0095,0.0505	K,10,0.0095,0.0505
K,11,0.0095,0.0655	K,11,0.0095,0.0655	K,11,0.0095,0.0655
K,12,0.00671751,0.07221751	K,12,0.00671751,0.07221751	K,12,0.00671751,0.07221751
K,13,0,0.075	K,13,0,0.075	K,13,0,0.075

K,14,- 0.00671751,0.07221751	K,14,- 0.00671751,0.07221751	K,14,- 0.00671751,0.07221751
K,15,-0.0095,0.0655	K,15,-0.0095,0.0655	K,15,-0.0095,0.0655
K,16,-0.0095,0.0505	K,16,-0.0095,0.0505	K,16,-0.0095,0.0505
K,17,-0.0095,0.0195	K,17,-0.0095,0.0195	K,17,-0.0095,0.0195
K,18,-0.0102612,0.01567317	K,18,-0.0102612,0.01567317	K,18,-0.0102612,0.01567317
K,19,- 0.01242893,0.01242893	K,19,- 0.01242893,0.01242893	K,19,- 0.01242893,0.01242893
K,20,-0.01567317,0.0102612	K,20,-0.01567317,0.0102612	K,20,-0.01567317,0.0102612
K,21,-0.0195,0.0095	K,21,-0.0195,0.0095	K,21,-0.0195,0.0095
K,22,-0.0505,0.0095	K,22,-0.0505,0.0095	K,22,-0.0505,0.0095
K,23,-0.0655,0.0095	K,23,-0.0655,0.0095	K,23,-0.0655,0.0095
K,24,- 0.07221751,0.00671751	K,24,- 0.07221751,0.00671751	K,24,- 0.07221751,0.00671751
K,25,-0.075,0	K,25,-0.075,0	K,25,-0.075,0
K,26,-0.07221751,- 0.00671751	K,26,-0.07221751,- 0.00671751	K,26,-0.07221751,- 0.00671751
K,27,-0.0655,-0.0095	K,27,-0.0655,-0.0095	K,27,-0.0655,-0.0095
K,28,-0.0505,-0.0095	K,28,-0.0505,-0.0095	K,28,-0.0505,-0.0095
K,29,-0.0195,-0.0095	K,29,-0.0195,-0.0095	K,29,-0.0195,-0.0095
K,30,-0.01567317,-0.0102612	K,30,-0.01567317,-0.0102612	K,30,-0.01567317,-0.0102612
K,31,-0.01242893,- 0.01242893	K,31,-0.01242893,- 0.01242893	K,31,-0.01242893,- 0.01242893
K,32,-0.0102612,-0.01567317	K,32,-0.0102612,-0.01567317	K,32,-0.0102612,-0.01567317
K,33,-0.0095,-0.0195	K,33,-0.0095,-0.0195	K,33,-0.0095,-0.0195
K,34,-0.0095,-0.0505	K,34,-0.0095,-0.0505	K,34,-0.0095,-0.0505
K,35,-0.0095,-0.0655	K,35,-0.0095,-0.0655	K,35,-0.0095,-0.0655
K,36,-0.00671751,- 0.07221751	K,36,-0.00671751,- 0.07221751	K,36,-0.00671751,- 0.07221751
K,37,0,-0.075	K,37,0,-0.075	K,37,0,-0.075

K,38,0.00671751,- 0.07221751	K,38,0.00671751,- 0.07221751	K,38,0.00671751,- 0.07221751
K,39,0.0095,-0.0655	K,39,0.0095,-0.0655	K,39,0.0095,-0.0655
K,40,0.0095,-0.0505	K,40,0.0095,-0.0505	K,40,0.0095,-0.0505
K,41,0.0095,-0.0195	K,41,0.0095,-0.0195	K,41,0.0095,-0.0195
K,42,0.0102612,-0.01567317	K,42,0.0102612,-0.01567317	K,42,0.0102612,-0.01567317
K,43,0.01242893,- 0.01242893	K,43,0.01242893,- 0.01242893	K,43,0.01242893,- 0.01242893
K,44,0.01567317,-0.0102612	K,44,0.01567317,-0.0102612	K,44,0.01567317,-0.0102612
K,45,0.0195,-0.0095	K,45,0.0195,-0.0095	K,45,0.0195,-0.0095
K,46,0.0505,-0.0095	K,46,0.0505,-0.0095	K,46,0.0505,-0.0095
K,47,0.0655,-0.0095	K,47,0.0655,-0.0095	K,47,0.0655,-0.0095
K,48,0.07221751,- 0.00671751	K,48,0.07221751,- 0.00671751	K,48,0.07221751,- 0.00671751
LARC,1,3,2	LARC,1,3,2	LARC,1,3,2
L,3,4	L,3,4	L,3,4
L,4,5	L,4,5	L,4,5
LARC,5,7,6	LARC,5,7,6	LARC,5,7,6
LARC,7,9,8	LARC,7,9,8	LARC,7,9,8
L,9,10	L,9,10	L,9,10
L,10,11	L,10,11	L,10,11
LARC,11,13,12	LARC,11,13,12	LARC,11,13,12
LARC,13,15,14	LARC,13,15,14	LARC,13,15,14
L,15,16	L,15,16	L,15,16
L,16,17	L,16,17	L,16,17
LARC,17,19,18	LARC,17,19,18	LARC,17,19,18
LARC,19,21,20	LARC,19,21,20	LARC,19,21,20
L,21,22	L,21,22	L,21,22
L,22,23	L,22,23	L,22,23
LARC,23,25,24	LARC,23,25,24	LARC,23,25,24
LARC,25,27,26	LARC,25,27,26	LARC,25,27,26

L,27,28	L,27,28	L,27,28
L,28,29	L,28,29	L,28,29
LARC,29,31,30	LARC,29,31,30	LARC,29,31,30
LARC,31,33,32	LARC,31,33,32	LARC,31,33,32
L,33,34	L,33,34	L,33,34
L,34,35	L,34,35	L,34,35
LARC,35,37,36	LARC,35,37,36	LARC,35,37,36
LARC,37,39,38	LARC,37,39,38	LARC,37,39,38
L,39,40	L,39,40	L,39,40
L,40,41	L,40,41	L,40,41
LARC,41,43,42	LARC,41,43,42	LARC,41,43,42
LARC,43,45,44	LARC,43,45,44	LARC,43,45,44
L,45,46	L,45,46	L,45,46
L,46,47	L,46,47	L,46,47
LARC,47,1,48	LARC,47,1,48	LARC,47,1,48
L,46,4	L,46,4	L,46,4
L,45,5	L,45,5	L,45,5
L,29,21	L,29,21	L,29,21
L,28,22	L,28,22	L,28,22
L,16,10	L,16,10	L,16,10
L,17,9	L,17,9	L,17,9
L,33,41	L,33,41	L,33,41
L,34,40	L,34,40	L,34,40
$K,49,a*\cos(\pi*\alpha/180),a*\sin(\pi*\alpha/180)$	$K,49,a*\cos(\pi*\alpha/180),a*\sin(\pi*\alpha/180)$	$K,49,a*\cos(\pi*\alpha/180),a*\sin(\pi*\alpha/180)$
$K,50,a*0.5*\cos(\pi*\alpha/180),a*0.5*\sin(\pi*\alpha/180)$	$K,50,a*0.5*\cos(\pi*\alpha/180),a*0.5*\sin(\pi*\alpha/180)$	$K,50,a*0.5*\cos(\pi*\alpha/180),a*0.5*\sin(\pi*\alpha/180)$
K,51,0,0	K,51,0,0	K,51,0,0
$K,52,-a*0.5*\cos(\pi*\alpha/180),-a*0.5*\sin(\pi*\alpha/180)$	$K,52,-a*0.5*\cos(\pi*\alpha/180),-a*0.5*\sin(\pi*\alpha/180)$	$K,52,-a*0.5*\cos(\pi*\alpha/180),-a*0.5*\sin(\pi*\alpha/180)$

$K,53,-a*\cos(\pi*alfa/180),-a*\sin(\pi*alfa/180)$	$K,53,-a*\cos(\pi*alfa/180),-a*\sin(\pi*alfa/180)$	$K,53,-a*\cos(\pi*alfa/180),-a*\sin(\pi*alfa/180)$
$K,54,dis,(dis*\tan(\pi*alfa/180))$	$K,54,dis,(dis*\tan(\pi*alfa/180))$	$K,54,a*0.5*\cos(\pi*alfa/180),a*0.5*\sin(\pi*alfa/180)$
$K,55,-(dis*\tan(\pi*alfa/180)),dis$	$K,55,-(dis*\tan(\pi*alfa/180)),dis$	$K,55,0,0$
$K,56,-dis,-(dis*\tan(\pi*alfa/180))$	$K,56,-dis,-(dis*\tan(\pi*alfa/180))$	$K,56,-a*0.5*\cos(\pi*alfa/180),-a*0.5*\sin(\pi*alfa/180)$
$K,57,(dis*\tan(\pi*alfa/180)),-dis$	$K,57,(dis*\tan(\pi*alfa/180)),-dis$	$L,7,19$
$K,58,a*0.5*\cos(\pi*alfa/180),a*0.5*\sin(\pi*alfa/180)$	$K,58,a*0.5*\cos(\pi*alfa/180),a*0.5*\sin(\pi*alfa/180)$	$L,19,31$
$K,59,0,0$	$K,59,0,0$	$L,31,43$
$K,60,-a*0.5*\cos(\pi*alfa/180),-a*0.5*\sin(\pi*alfa/180)$	$K,60,-a*0.5*\cos(\pi*alfa/180),-a*0.5*\sin(\pi*alfa/180)$	$L,43,7$
$L,54,7$	$L,54,7$	$L,49,7$
$L,7,55$	$L,7,55$	$L,53,31$
$L,55,19$	$L,55,19$	$L,51,19$
$L,19,56$	$L,19,56$	$L,55,43$
$L,56,31$	$L,56,31$	$L,49,50$
$L,31,57$	$L,31,57$	$L,50,51$
$L,57,43$	$L,57,43$	$L,51,52$
$L,43,54$	$L,43,54$	$L,52,53$
$L,49,50$	$L,49,50$	$L,49,54$
$L,50,51$	$L,50,51$	$L,54,55$
$L,51,52$	$L,51,52$	$L,55,56$
$L,52,53$	$L,52,53$	$L,56,53$
$L,49,54$	$L,49,54$	$AL,1,2,33,31,32$
$L,51,55$	$L,51,55$	$AL,3,34,30,33$
$L,53,56$	$L,53,56$	$AL,4,44,29,34$



L,59,57	L,59,57	AL,13,35,20,42
L,49,58	L,49,58	AL,14,36,19,35
L,58,59	L,58,59	AL,15,16,17,18,36
L,59,60	L,59,60	AL,9,10,37,7,8
L,60,53	L,60,53	AL,11,38,6,37
AL,1,2,33,31,32	AL,1,2,33,31,32	AL,12,41,5,38
AL,3,34,30,33	AL,3,34,30,33	AL,21,39,28,43
AL,4,41,48,29,34	AL,4,41,48,29,34	AL,22,40,27,39
AL,13,35,20,44,45	AL,13,35,20,44,45	AL,23,24,25,26,40
AL,14,36,19,35	AL,14,36,19,35	AL,45,41,47,50,49
AL,15,16,17,18,36	AL,15,16,17,18,36	AL,46,42,47,51,52
AL,9,10,37,7,8	AL,9,10,37,7,8	AL,46,43,48,55,56
AL,11,38,6,37	AL,11,38,6,37	AL,45,44,48,54,53
AL,12,43,42,5,38	AL,12,43,42,5,38	KSCON,49,a/16,1,8,0,
AL,21,39,28,46,47	AL,21,39,28,46,47	KSCON,53,a/16,1,8,0,
AL,22,40,27,39	AL,22,40,27,39	FLST,2,4,5,ORDE,4
AL,23,24,25,26,40	AL,23,24,25,26,40	FITEM,2,1
AL,41,42,54,50,49,53	AL,41,42,54,50,49,53	FITEM,2,6
AL,54,43,44,55,52,51	AL,54,43,44,55,52,51	FITEM,2,-7
AL,45,46,56,59,60,55	AL,45,46,56,59,60,55	FITEM,2,12
AL,56,47,48,53,57,58	AL,56,47,48,53,57,58	AESIZE,P51X,0.002,
KSCON,49,a/16,1,8,0,	KSCON,49,a/16,1,8,0,	FLST,2,4,5,ORDE,4
KSCON,53,a/16,1,8,0,	KSCON,53,a/16,1,8,0,	FITEM,2,2
FLST,2,4,5,ORDE,4	FLST,2,4,5,ORDE,4	FITEM,2,5
FITEM,2,1	FITEM,2,1	FITEM,2,8
FITEM,2,6	FITEM,2,6	FITEM,2,11
FITEM,2,-7	FITEM,2,-7	AESIZE,P51X,0.0015,
FITEM,2,12	FITEM,2,12	FLST,2,8,5,ORDE,6
AESIZE,P51X,0.002,	AESIZE,P51X,0.002,	FITEM,2,3
FLST,2,4,5,ORDE,4	FLST,2,4,5,ORDE,4	FITEM,2,-4
FITEM,2,2	FITEM,2,2	FITEM,2,9

FITEM,2,5	FITEM,2,5	FITEM,2,-10
FITEM,2,8	FITEM,2,8	FITEM,2,13
FITEM,2,11	FITEM,2,11	FITEM,2,-16
AESIZE,P51X,0.0015,	AESIZE,P51X,0.0015,	AESIZE,P51X,0.001,
FLST,2,8,5,ORDE,6	FLST,2,8,5,ORDE,6	MSHKEY,0
FITEM,2,3	FITEM,2,3	FLST,5,16,5,ORDE,2
FITEM,2,-4	FITEM,2,-4	FITEM,5,1
FITEM,2,9	FITEM,2,9	FITEM,5,-16
FITEM,2,-10	FITEM,2,-10	CM,_Y,AREA
FITEM,2,13	FITEM,2,13	ASEL, , , P51X
FITEM,2,-16	FITEM,2,-16	CM,_Y1,AREA
AESIZE,P51X,0.001,	AESIZE,P51X,0.001,	CHKMSH,'AREA'
MSHKEY,0	MSHKEY,0	CMSEL,S,_Y
FLST,5,16,5,ORDE,2	FLST,5,16,5,ORDE,2	AMESH,_Y1
FITEM,5,1	FITEM,5,1	CMDELE,_Y
FITEM,5,-16	FITEM,5,-16	CMDELE,_Y1
CM,_Y,AREA	CM,_Y,AREA	CMDELE,_Y2
ASEL, , , P51X	ASEL, , , P51X	NSEL,ALL
CM,_Y1,AREA	CM,_Y1,AREA	NSEL,S,LOC,X,0.05,0.08
CHKMSH,'AREA'	CHKMSH,'AREA'	CM,Force_X_Nodes,NODE
CMSEL,S,_Y	CMSEL,S,_Y	CMSEL,A,Force_X_Nodes
AMESH,_Y1	AMESH,_Y1	NSEL,ALL
CMDELE,_Y	CMDELE,_Y	NSEL,S,LOC,Y,0.05,0.08
CMDELE,_Y1	CMDELE,_Y1	CM,FORCE_Y_NODES,NODE
CMDELE,_Y2	CMDELE,_Y2	CMSEL,A,FORCE_Y_NODES
NSEL,ALL	NSEL,ALL	NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,0.05,0.08	NSEL,S,LOC,X,0.05,0.08	/REPLOT
CM,Force_X_Nodes,NODE	CM,Force_X_Nodes,NODE	NPLOT
CMSEL,A,Force_X_Nodes	CMSEL,A,Force_X_Nodes	FLST,2,1,5,ORDE,1

NSEL,ALL	NSEL,ALL	FITEM,2,6
NSEL,S,LOC,Y,0.05,0.08	NSEL,S,LOC,Y,0.05,0.08	DA,P51X,UX,0
CM,FORCE_Y_NODES,NO DE	CM,FORCE_Y_NODES,NO DE	FLST,2,1,5,ORDE,1
CMSEL,A,FORCE_Y_NODES	CMSEL,A,FORCE_Y_NODES	FITEM,2,12
NSEL,ALL	NSEL,ALL	DA,P51X,UY,0
/REPLOT	/REPLOT	FLST,2,1,9,ORDE,1
NPLOT	NPLOT	FITEM,2,1
FLST,2,1,5,ORDE,1	FLST,2,1,5,ORDE,1	F,P51X,FX,2.5902140672E-06
FITEM,2,6	FITEM,2,6	FLST,2,1,9,ORDE,1
DA,P51X,UX,0	DA,P51X,UX,0	FITEM,2,2
FLST,2,1,5,ORDE,1	FLST,2,1,5,ORDE,1	F,P51X,FY,2.767973856E-06
FITEM,2,12	FITEM,2,12	NSEL,S,LOC,X,a*cos(pi*alfa/180)
DA,P51X,UY,0	DA,P51X,UY,0	NSEL,R,LOC,Y,a*sin(pi*alfa/180)
FLST,2,1,9,ORDE,1	FLST,2,1,9,ORDE,1	CM,CRACK,NODE
FITEM,2,1	FITEM,2,1	NSEL,ALL
F,P51X,FX,2.5902140672E-06	F,P51X,FX,2.5902140672E-06	CS,11,0,11116,11117,11654,1,1,
FLST,2,1,9,ORDE,1	FLST,2,1,9,ORDE,1	CSYS,11,
FITEM,2,2	FITEM,2,2	CINT,NEW,1
F,P51X,FY,2.767973856E-06	F,P51X,FY,2.767973856E-06	CINT,CTNC,CRACK
NSEL,S,LOC,X,a*cos(pi*alfa/180)	NSEL,S,LOC,X,a*cos(pi*alfa/180)	CINT,TYPE,SIFS
NSEL,R,LOC,Y,a*sin(pi*alfa/180)	NSEL,R,LOC,Y,a*sin(pi*alfa/180)	CINT,NORMAL,11,2
CM,CRACK,NODE	CM,CRACK,NODE	CINT,NCONTOUR,20
NSEL,ALL	NSEL,ALL	CINT,SYMM,OFF

CINT,NEW,1	CS,11,0,9732,9746,10092,1,1 ,	OUTRES,CINT
CINT,CTNC,CRACK	CSYS,11,	FINISH
CINT,TYPE,SIFS	CINT,NEW,1	/SOL
CINT,NCONTOUR,20	CINT,CTNC,CRACK	/STATUS,SOLU
CINT,SYMM,OFF	CINT,TYPE,SIFS	SOLVE
OUTRES,CINT	CINT,NORMAL,11,2	FINISH
FINISH	CINT,NCONTOUR,20	/POST1
/SOL	CINT,SYMM,OFF	SET,LAST
/STATUS,SOLU	OUTRES,CINT	RSYS,11
SOLVE	FINISH	AVPRIN,0
FINISH	/SOL	AVRES,2,
/POST1	/STATUS,SOLU	/EFACET,1
SET,LAST	SOLVE	LAYER,0
PRCINT,1,,K1	FINISH	FORCE,TOTAL
PRCINT,1,,K2	/POST1	PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
	SET,LAST	PRCINT,1,,K1
	RSYS,11	PRCINT,1,,K2
	AVPRIN,0	
	AVRES,2,	
	/EFACET,1	
	LAYER,0	
	FORCE,TOTAL	
	PLNSOL, S,EQV, 0,1.0	
	PRCINT,1,,K1	
	PRCINT,1,,K2	

**Anexo H: Código en MATLAB para el suavizado de curvas experimentales**

```
clc
clear

UAD1P06 = xlsread('UAD1P06','Hoja1');

epsilon_D106 = UAD1P06(:,1)/100;
esfuerzo_D106 = UAD1P06(:,2);

filter_D106 = smooth(epsilon_D106,esfuerzo_D106,0.07,'rloess');

UAD1P07 = xlsread('UAD1P07','Hoja1');

epsilon_D107 = UAD1P07(:,1)/100;
esfuerzo_D107 = UAD1P07(:,2);

filter_D107 = smooth(epsilon_D107,esfuerzo_D107,0.06,'rloess');

UAD1P08 = xlsread('UAD1P08','Hoja1');

epsilon_D108 = UAD1P08(:,1)/100;
esfuerzo_D108 = UAD1P08(:,2);

filter_D108 = smooth(epsilon_D108,esfuerzo_D108,0.07,'rloess');

UAD1P09 = xlsread('UAD1P09','Hoja1');

epsilon_D109 = UAD1P09(:,1)/100;
esfuerzo_D109 = UAD1P09(:,2);

filter_D109 = smooth(epsilon_D109,esfuerzo_D109,'moving');

UAD1P10 = xlsread('UAD1P10','Hoja1');

epsilon_D110 = UAD1P10(:,1)/100;
esfuerzo_D110 = UAD1P10(:,2);

filter_D110 = smooth(epsilon_D110,esfuerzo_D110,9,'rloess');

UAD2P06 = xlsread('UAD2P06','Hoja1');

epsilon_D206 = UAD2P06(:,1)/100;
esfuerzo_D206 = UAD2P06(:,2);

filter_D206 = smooth(epsilon_D206,esfuerzo_D206,0.07,'rloess');

UAD2P07 = xlsread('UAD2P07','Hoja1');
```

```
epsilon_D207 = UAD2P07(:,1)/100;
esfuerzo_D207 = UAD2P07(:,2);

filter_D207 = smooth(epsilon_D207,esfuerzo_D207,0.1,'rloess');

UAD2P08 = xlsread('UAD2P08','Hoja1');

epsilon_D208 = UAD2P08(:,1)/100;
esfuerzo_D208 = UAD2P08(:,2);

filter_D208 = smooth(epsilon_D208,esfuerzo_D208,0.07,'rloess');

UAD2P09 = xlsread('UAD2P09','Hoja1');

epsilon_D209 = UAD2P09(:,1)/100;
esfuerzo_D209 = UAD2P09(:,2);

filter_D209 = smooth(epsilon_D209,esfuerzo_D209,0.09,'rloess');

UAD2P10 = xlsread('UAD2P10','Hoja1');

epsilon_D210 = UAD2P10(:,1)/100;
esfuerzo_D210 = UAD2P10(:,2);

filter_D210 = smooth(epsilon_D210,esfuerzo_D210,6,'rloess');

figure(1);

plot(epsilon_D106,esfuerzo_D106)
hold on

plot(epsilon_D107,esfuerzo_D107)
hold on

plot(epsilon_D108,esfuerzo_D108)
hold on

plot(epsilon_D109,esfuerzo_D109)
hold on

plot(epsilon_D110,esfuerzo_D110)
hold on

plot(epsilon_D206,esfuerzo_D206)
hold on

plot(epsilon_D207,esfuerzo_D207)
hold on
```

```
plot(epsilon_D208,esfuerzo_D208)
hold on

plot(epsilon_D209,esfuerzo_D209)
hold on

plot(epsilon_D210,esfuerzo_D210)
hold off

xlim([0 0.33])
ylim([0 170])
title('Grafica esfuerzo-deformación');
xlabel('\epsilon (mm/mm)');
ylabel('\sigma (MPa)');
label1 = 'UAD1P06';
label2 = 'UAD1P07';
label3 = 'UAD1P08';
label4 = 'UAD1P09';
label5 = 'UAD1P10';
label6 = 'UAD2P06';
label7 = 'UAD2P07';
label8 = 'UAD2P08';
label9 = 'UAD2P09';
label10 = 'UAD2P10';

legend(label1,label2,label3,label4,label5,...
label6,label7,label8,label9,label10)

figure(2);
plot(epsilon_D106,filter_D106)
hold on

plot(epsilon_D107,filter_D107)
hold on

plot(epsilon_D108,filter_D108)
hold on

plot(epsilon_D109,filter_D109)
hold on

plot(epsilon_D110,filter_D110)
hold on

plot(epsilon_D206,filter_D206)
hold on
```



```
plot(epsilon_D207,filter_D207)
hold on

plot(epsilon_D208,filter_D208)
hold on

plot(epsilon_D209,filter_D209)
hold on

plot(epsilon_D210,filter_D210)
hold off

xlim([0 0.33])
ylim([0 170])
title('Grafica esfuerzo-deformación modificada');
xlabel('\epsilon (mm/mm)');
ylabel('\sigma (MPa)');

label11 = 'UAD1P06';
label12 = 'UAD1P07';
label13 = 'UAD1P08';
label14 = 'UAD1P09';
label15 = 'UAD1P10';
label16 = 'UAD2P06';
label17 = 'UAD2P07';
label18 = 'UAD2P08';
label19 = 'UAD2P09';
label20 = 'UAD2P10';

legend(label11,label12,label13,label14,label15,...
label16,label17,label18,label19,label20)
```