



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL CRECIMIENTO DE GRIETA A FATIGA EN ELEMENTOS MECÁNICOS

Alumno: Antonio Torres Expósito

Tutor: D. José Manuel Vasco Olmo
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2016



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

D.José Manuel Vasco Olmo, tutor del Trabajo Fin de Grado titulado ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL CRECIMIENTO DE GRIETA A FATIGA EN ELEMENTOS MECÁNICOS, y realizado por Antonio Torres Expósito, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, SEPTIEMBRE de 2016

El alumno:

Los tutores:

ANTONIO TORRES EXPÓSITO

JOSÉ MANUEL VASCO OLMO

Índice General

Figuras	3
Agradecimientos.....	7
Resumen.....	8
1. Motivaciones y objetivos.....	9
2. Antecedentes y fundamentos teóricos.....	9
3. Caracterización del material a carga monotónicas	15
3.1.Introducción.....	15
3.2.Metodología experimental del ensayo de tracción	17
3.3.Resultados obtenidos	27
3.4.Resumen resultados obtenidos	28
4. Análisis del crecimiento de grieta a fatiga.....	30
4.1.Introducción.....	30
4.2.Geometría de la probeta.....	31
4.3.Material	32
4.4. Metodología experimental	32
5. Resultados y discusiones	43
5.1. Gráfica $a-N$	43
5.2. Ley de Paris nominal.....	45
5.3.Trazas de COD: Carga de apertura de grieta (P_{op})	51
5.4. Ley de Paris efectiva	65
6. Conclusiones.....	69
7. Trabajo futuro.....	72
8. Referencias.....	73
9. ANEXO I: GRÁFICAS DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	75
9.1. Dirección de laminado longitudinal	75
9.1.1. Velocidad de 0.2 mm/min	75
9.1.2. Velocidad de 0.3 mm/min	77
9.1.3. Velocidad de 0.4 mm/min	79
9.1.4. Velocidad de 0.5 mm/min	81
9.2. Dirección de laminado transversal	83
9.2.1. Velocidad de 0.2 mm/min	83
9.2.2. Velocidad de 0.3 mm/min	85
9.2.3. Velocidad de 0.4 mm/min	87
9.2.4. Velocidad de 0.5 mm/min	89

Índice de Figuras

Figura 2.1. Deformación vs ciclos para el fallo	11
Figura 2.2. Probeta de un material elástico con una longitud de grieta $2a$	13
Figura 3.1. Probeta utilizada para el ensayo monotónico de tracción	16
Figura 3.2. Dirección de laminado longitudinal (a) y transversal (b).....	16
Figura 3.3. Speckle en probeta de ensayo de tracción (a) y speckle ampliado (b).....	17
Figura 3.4. Marcas en la probeta del ensayo monotónico de tracción	18
Figura 3.5. Depósito de agua que refrigera el aceite a través del equipo	19
Figura 3.6. Bomba.....	20
Figura 3.7. Ensayo monotónico de tracción montado (a) y probeta ajustada en las mordazas (b).....	21
Figura 3.8. Extensómetro longitudinal	23
Figura 3.9. Extensómetro transversal	24
Figura 3.10. Probetas rotas	25
Figura 3.11. Probeta rota en mordaza	26
Figura 3.12. Cálculo del límite de elasticidad según norma ASTM 647 – 00 [24].....	28
Figura 4.1. Ciclo de ensayo a fatiga	31
Figura 4.2. Probeta compact-tension (CT) para los ensayos a fatiga. Espesor de 2 mm	31
Figura 4.3. Speckle en probeta CT	33
Figura 4.4. Mordazas de probeta CT con bulones	34
Figura 4.5. Cámara delantera y trasera	36
Figura 4.6. Extensómetro	38
Figura 4.7. Ranura para extensómetro en probeta CT	39
Figura 4.8. Equipo montado	39
Figura 4.9. Grieta en probeta CT	40
Figura 4.10. Nacimiento y crecimiento de grieta en probeta CT	42
Figura 5.1. Representación del tamaño de grieta a_n frente al número de ciclos N	43
Figura 5.2. Diferencia entre a_n y a	44

Figura 5.3. Gráfica normalizada de la longitud de grieta frente al número de ciclos	44
Figura 5.4. Dimensiones de probeta CT según norma ASTM 647-00.....	46
Figura 5.5. Ley de Paris para distintos ensayos	47
Figura 5.6. Ley de Paris para distintos R -ratios	47
Figura 5.7. Ley de Paris ensayo $R= 0.5$	49
Figura 5.8. Ley de Paris ensayo $R= 0.33$	49
Figura 5.9. Ley de Paris ensayo $R= 0.1$	50
Figura 5.10. Ley de Paris ensayo $R= 0$	50
Figura 5.11. Región efectiva de la ley de Paris.....	52
Figura 5.12. Gráfica fuerza desplazamiento para el calculo de la fuerza de apertura según norma ASTM 647 – 00 [24]	52
Figura 5.13.Cálculo del cierre de grieta (a) y ampliacion de la zona de cierre de grieta (b) ..	53
Figura 5.14.Determinación de la fuerza de apertura usando el método OFFSET	54
Figura 5.15. Ejemplo de cálculo de fuerza de apertura (a) y ejemplo ampliado (b).....	54
Figura 5.16. Cálculo de cierre de grieta (a) y OFFSET nulo para ensayo con $R=0.5$ (b)	55
Figura 5.17. Cálculo de cierre de grieta (a) y OFFSET nulo para ensayo con $R=0.33$ (b).....	55
Figura 5.18. Fuerza de apertura P_{op} frente a la longitud de grieta	56
Figura 5.19. Fuerza de apertura P_{op} frente a la longitud de grieta. $R= 0.1$	57
Figura 5.20. Fuerza de apertura P_{op} frente a la longitud de grieta. $R= 0$	57
Figura 5.21. Vic-2D 2009.....	59
Figura 5.22. Selección de la región de interés.....	60
Figura 5.23.Calibración de la imagen	61
Figura 5.24. Campo de desplazamientos en probeta CT	62
Figura 5.25. Archivo EXCEL obtención COD por método DIC.....	63
Figura 5.26. Cálculo de la fuerza de apertura P_{op} mediante DIC ($R= 0$)	63
Figura 5.27. Cálculo de la fuerza de apertura P_{op} mediante DIC ($R= 0.1$)	64
Figura 5.28. Ley de Paris efectiva para ensayo de $R= 0.5$	65
Figura 5.29. Ley de Paris efectiva para ensayo de $R= 0.33$	66
Figura 5.30. Ley de Paris efectiva para ensayo de $R= 0.1$	66
Figura 5.31. Comparación entre la ley de Paris nominal y efectiva. $R= 0.1$	67
Figura 5.32. Ley de Paris efectiva para ensayo de $R= 0$	67
Figura 5.33. Comparación entre la ley de Paris nominal y efectiva. $R= 0$	68
 Figura 6.1. Trayectoria de la grieta.....	 70

Figura 9.1. Gráfica tensión – deformación para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.2 mm/min.....	75
Figura 9.2. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.2 mm/min	75
Figura 9.3. Evaluación del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.2 mm/min.....	76
Figura 9.4. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.2 mm/min	76
<u>Figura 9.5. Gráfica tensión – deformación para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.3 mm/min.....</u>	<u>77</u>
<u>Figura 9.6. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.3 mm/min</u>	<u>77</u>
<u>Figura 9.7. Evaluación del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.3 mm/min.....</u>	<u>78</u>
<u>Figura 9.8. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.3 mm/min</u>	<u>78</u>
<u>Figura 9.9. Gráfica tensión – deformación para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.4 mm/min.....</u>	<u>79</u>
<u>Figura 9.10. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.4 mm/min.....</u>	<u>79</u>
<u>Figura 9.11. Evaluación del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.4 mm/min.....</u>	<u>80</u>
<u>Figura 9.12. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.4 mm/min</u>	<u>80</u>
<u>Figura 9.13. Gráfica tensión – deformación para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.5 mm/min.....</u>	<u>81</u>
<u>Figura 9.14. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.5 mm/min.....</u>	<u>81</u>
<u>Figura 9.15. Evaluación del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.5 mm/min.....</u>	<u>82</u>
<u>Figura 9.16. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.5 mm/min</u>	<u>82</u>
<u>Figura 9.17. Gráfica tensión – deformación para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.2 mm/min.....</u>	<u>83</u>
<u>Figura 9.18. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.2 mm/min.....</u>	<u>83</u>
<u>Figura 9.19. Evaluación del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.2 mm/min</u>	<u>84</u>
<u>Figura 9.20. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.2 mm/min</u>	<u>84</u>

<u>Figura 9.21. Gráfica tensión – deformación para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.3 mm/min.....</u>	<u>85</u>
<u>Figura 9.22. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.3 mm/min.....</u>	<u>85</u>
<u>Figura 9.23. Evaluación del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.3 mm/min</u>	<u>86</u>
<u>Figura 9.24. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.3 mm/min</u>	<u>86</u>
<u>Figura 9.25. Gráfica tensión – deformación para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.4 mm/min.....</u>	<u>87</u>
<u>Figura 9.26. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.4 mm/min.....</u>	<u>87</u>
<u>Figura 9.27. Evaluación del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.4 mm/min</u>	<u>88</u>
<u>Figura 9.28. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.4 mm/min</u>	<u>88</u>
<u>Figura 9.29. Gráfica tensión – deformación para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.5 mm/min.....</u>	<u>89</u>
<u>Figura 9.30. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.5 mm/min.....</u>	<u>89</u>
<u>Figura 9.31. Evaluación del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.5 mm/min</u>	<u>90</u>
<u>Figura 9.32. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.5 mm/min</u>	<u>90</u>

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer el apoyo tanto económico como moral de mis padres en esta etapa, por todos estos años de sufrimiento y alegrías compartidas. Al igual que el resto de mi familia y de mis amigos, también sufridores de mi etapa que siempre han estado cuando los he necesitado.

También, agradecer a mi tutor D. José Manuel Vasco Olmo todas las horas que me ha dedicado, tanto en tutorías como en el laboratorio, ayudándome, aconsejándome y aportándome una serie de conocimientos no adquiridos a lo largo del Grado en Ingeniería Mecánica.

Jaén, septiembre de 2016

RESUMEN

En el presente trabajo final de grado se estudia el crecimiento de grieta debido a procesos de fatiga en probetas entalladas. Para ello, inicialmente, se lleva a cabo la caracterización del material a carga monotónica (ensayo de tracción) para obtener sus propiedades mecánicas más importantes.

Seguidamente, se someten las probetas entalladas a ensayos a fatiga a distintos niveles de carga para evaluar las diferencias que se pueden dar en ensayos realizados a distintos R -ratios

Por último, se evalúa la carga de apertura de grieta (P_{op}) a través del análisis del Crack Opening Displacement (COD), empleando para ello tanto la técnica de correlación digital de imágenes (DIC) como los datos aportados por un extensómetro, analizando la concordancia entre resultados.

1. Motivaciones y objetivos

El objetivo de este trabajo final de grado es el estudio del crecimiento de grieta a fatiga en elementos mecánicos entallados. Este estudio resulta de gran importancia porque el fallo a fatiga está muy presente en la vida actual de elementos que sufren cargas repetitivas.

La principal motivación para la realización de este trabajo es el afán por parte del alumno por seguir aprendiendo y superarse, además de su afán por el manejo de máquinas y porque la rama de la ingeniería relacionada con el análisis experimental es la que presenta mayor interés para el alumno.

2. Antecedentes y fundamentos teóricos

Si aplicamos cargas variables cíclicas a un elemento mecánico o a una estructura, éste puede llegar a romperse con el paso del tiempo, aunque no veamos un daño visible. Incluso esto puede llegar a ocurrir cuando las cargas utilizadas son mucho más pequeñas que las correspondientes a la rotura del material. Este fenómeno es conocido como fatiga y fue de real interés a mediados del siglo XIX debido a la aparición de vehículos de transporte y distintos tipos de maquinaria. En 1829, W. Albert [1] hizo los primeros ensayos aplicando cargas variables cíclicas. En este periodo se explicaba que debido a la aplicación de cargas cíclicas el material sufría un proceso de cristalización, que suponía una fragilización del material y conllevaba el fallo.

En 1871, August Wöhler [2] construyó la primera máquina de ensayos de flexión rotativa para realizar ensayos sobre los ejes de las ruedas de los ferrocarriles y llegó a la conclusión de que el fallo se debía a la alternabilidad de las tensiones en los mismos y la resistencia a fatiga dependía del número de ciclos y no del tiempo de aplicación empleado. Además, introdujo la curva S-N (tensión frente al número de ciclos) y el concepto de límite a fatiga, que se asocia a la tensión máxima aplicada por debajo de la cual no surge ninguna grieta en el material.

Sin embargo, este concepto de límite a fatiga cambia radicalmente cuando se descubre que, para tensiones aplicadas inferiores a este límite, aparecen micro

grietas incapaces de propagarse y que por lo tanto no causan rotura. Son las conocidas “grietas no propagantes”. Así, lo que determina la resistencia a fatiga no es la nucleación de una grieta, sino la capacidad que tiene una grieta de crecer sin detenerse a través del material, estudiando qué es lo que afecta a la propagación de la grieta desde su aparición hasta que se produce la rotura del material

Posteriormente, Soderberg [3], [4], Gerber [5] y Goodman [6] estudiaron el efecto de las tensiones medias, introduciendo las reglas para obtener la resistencia a fatiga cuando la tensión media es distinta de cero.

$$\text{Soderber: } \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n} \quad (2.1)$$

$$\text{Gerber: } \frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_{ult}}\right)^2 = \frac{1}{n} \quad (2.2)$$

$$\text{Goodman: } \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ult}} = \frac{1}{n} \quad (2.3)$$

Siendo n el coeficiente de seguridad a fatiga, S_{ult} la tensión última, S_y la tensión de fluencia, S_e el límite de resistencia a la fatiga, y σ_m y σ_a la tensión media y alternante, las cuales se definen como sigue:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{m}n}}{2} \quad (2.4) \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{m}n}}{2} \quad (2.5)$$

A principios del siglo XX, con la aparición de las turbinas de vapor y los motores de combustión interna, aumentó el interés en los procesos de fatiga. Además, con el uso del microscopio en los ensayos de fatiga, se observó una deformación plástica justo antes de la aparición de la grieta.

Durante la primera mitad del siglo XX, se obtuvieron muchos datos que relacionaban la resistencia a fatiga con factores como la geometría y el tamaño de la pieza, condiciones ambientales y acabado superficial, que es lo que se denomina actualmente como Métodos Clásicos de diseño a fatiga.

En los años 50, hubo un gran avance en fatiga debido a la aparición de las primeras máquinas electrohidráulicas, permitiendo obtener la curva tensión-deformación para materiales sometidos a cargas cíclicas.

A principio de los años 60, Coffin y Manson [7], [8] publicaron de manera independiente la relación entre la amplitud de deformación plástica y el número de ciclos que se utiliza en la curva ε - N del material.

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.6)$$

Siendo ε'_f el coeficiente de ductilidad a la fatiga y c el exponente de ductilidad a la fatiga

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad (2.7)$$

Y como:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} \quad (2.8)$$

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (2.9)$$

Esta relación se muestra en el siguiente gráfico en el que se representa la deformación frente al número de ciclos para que se produzca el fallo.

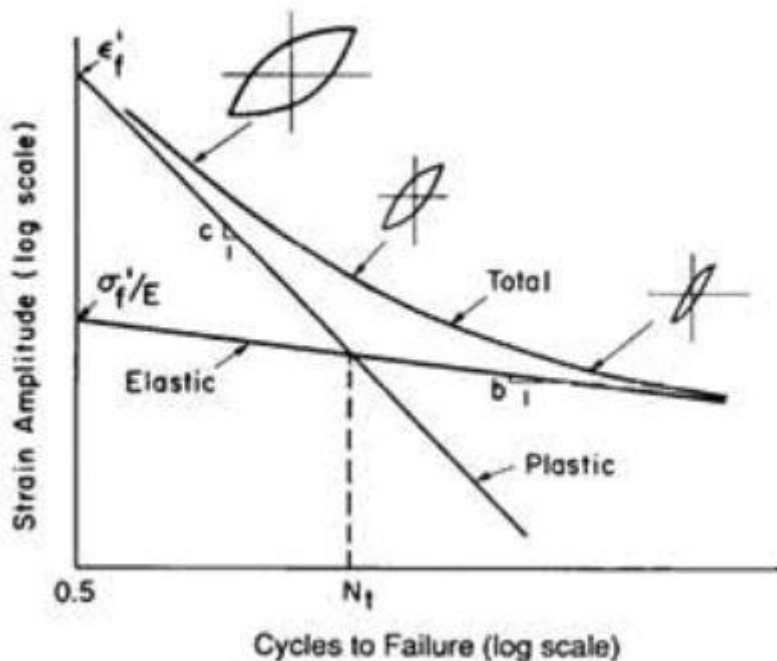


Figura 2.1. Deformación vs ciclos para el fallo

Durante años, se ha considerado que el proceso de fatiga constaba de 2 fases: nucleación de la grieta y propagación de la misma [9]. Se consideraba que la grieta estaba en la fase de nucleación cuando tenía un tamaño que no podía ser detectado con las técnicas usuales de inspección. Actualmente, sin embargo, se tiende a considerar que el periodo de nucleación no existe o tiene una duración muy corta y se supone que la grieta empieza a crecer desde el primer ciclo de carga. Esto hace que el término límite a fatiga ya definido cambie de significado. Si anteriormente el límite a fatiga era considerado como la tensión por debajo la cual las grietas no crecían, ahora se define como la tensión por debajo la cual las grietas son incapaces de crecer y propagarse.

Además, es necesario conocer el significado de “entalla” o “materiales entallados”. Un material entallado es el que presenta discontinuidades geométricas debido al proceso de fabricación. Discontinuidades tales como poros, ranuras, cambios de sección, agujeros, marcas del mecanizado, etc. Estas discontinuidades hacen que las tensiones que se forman alrededor de ellas sean mucho más elevadas que las soportadas por el resto de la pieza. Por este motivo, estas discontinuidades son conocidas como “concentradores de tensión”, las cuales, al someter al elemento a una carga variable, puede provocar el fallo de la misma de forma prematura.

Las teorías modernas de fractura encuentran su origen en los trabajos de Griffith [10] en 1921, quién formuló criterios para la extensión inestable de una grieta en un sólido frágil en términos de equilibrio entre los cambios en las energías mecánicas y las energías de superficie. Griffith considera una grieta de longitud $2a$ situada en el centro de una placa de espesor B , que se somete a un esfuerzo de tracción (**Figura 2.2.**). Además, postula que para que se produzca la extensión de la grieta debida a la tensión aplicada, la disminución de la energía potencial del sistema y el cambio de energía elástica almacenada debe ser igual al aumento de la energía superficial debido a la propagación de la grieta. Usando el análisis de tensión de Inglis [11] (1913) para un agujero elíptico en una placa, Griffith dedujo el cambio neto de energía potencial como:

$$Wp = - \frac{\pi a^2 \sigma^2 B}{E'} \quad (2.10)$$

Siendo $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$ para deformación plana y $E' = E$ para tensión plana, siendo E el módulo de Young y ν el módulo de Poisson.

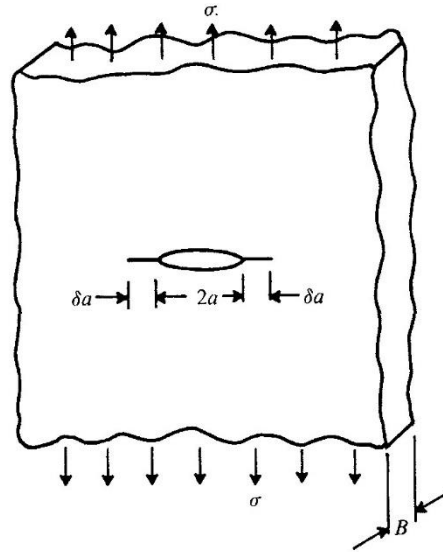


Figura 2.2. Probeta de un material elástico con una longitud de grieta $2a$

La energía de superficie de la grieta es $W_s = 4aB\gamma_s$ (2.11).

Donde γ_s es la energía de superficie libre por unidad de área.

La energía total del sistema viene dada por:

$$U = W_p + W_s = - \frac{\pi a^2 \sigma^2 B}{E'} + 4aB\gamma_s \quad (2.12)$$

Griffith observó que la condición crítica para el inicio de crecimiento de grieta es:

$$\frac{dU}{dA} = \frac{dW_p}{dA} + \frac{dW_s}{dA} = - \frac{\pi a \sigma^2}{E'} + 2\gamma_s = 0 \quad (2.13)$$

Donde $A = 2aB$ es el área de la grieta y dA denota un incremento adicional en el área de la grieta. Teniendo en cuenta que la superficie total de las dos caras de la grieta es $2A$, la tensión crítica resultante para la iniciación de la fractura es:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E'\gamma_s}{\pi a}} \quad (2.14)$$

El modelo idealizado de Griffith para materiales frágiles considera grietas agudas para las cuales las tensiones cerca de la punta de la grieta exceden la fuerza de cohesión del material. En los materiales de ingeniería comunes, se producen deformaciones no lineales cerca de la punta de la grieta bajo la influencia de la tensión aplicada. Por lo tanto, aunque el concepto de Griffith sentó las bases de la física de la fractura, sus consideraciones del balance de energía no se pueden aplicar directamente a la mayoría de los sólidos de la ingeniería. Orowan [12] (1952) extendió el concepto de fractura frágil de Griffith a los metales simplemente añadiendo el término de energía de disipación plástica:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E'(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a}} \quad (2.15)$$

Además, se va a utilizar una técnica conocida como Correlación Digital de Imágenes (DIC) para caracterizar el cierre de grieta. La correlación digital de imágenes es una técnica innovativa sin contacto basada en la visión por ordenador. Inicialmente, DIC fue implementado en los años 80 en los laboratorios de la Universidad de Carolina del Sur con el objetivo de medir en el plano los desplazamientos de una superficie [13] - [15]. Posteriormente, DIC se aplicó a la mecánica de la fractura y a la fatiga. En los primeros trabajos, publicados por Sutton y Riddell [16], [17], DIC fue empleado para medir los niveles de apertura de grietas mediante el seguimiento de los desplazamientos relativos. En los siguientes documentos [18], [19], se desplazó la atención en la región de la punta de la grieta: las fuerzas que impulsan la propagación de la grieta eran extraídas del campo de desplazamiento medido alrededor de la punta de la grieta mediante el ajuste de desplazamientos experimentales con el campo analítico singular. Este enfoque fue empleado con éxito incluso para materiales que presentan un comportamiento anisotrópico, tales como cristales individuales [20], [21].

Para la realización de esta técnica, es necesario pintar las probetas con una capa lisa de blanco y otra capa de “puntitos” negros formando lo que se conoce como *speckle*, que se puede ver en posteriores figuras.

3. Caracterización del material a carga monotónica

3.1. Introducción

La caracterización de un material permite analizar las propiedades físicas, químicas, mecánicas, ópticas, térmicas y magnéticas. Los materiales son usados a diario por lo que obtener sus propiedades es de gran interés.

En todas las ramas de ingeniería se pretende mejorar las propiedades de los materiales que se usan. Así, por ejemplo, los ingenieros eléctricos y electrónicos necesitan circuitos integrados que funcionen correctamente, interruptores que actúen de forma instantánea y de materiales aislantes que soporten altas temperaturas y altos voltajes. Los ingenieros civiles y los arquitectos necesitan materiales estéticos y resistentes a la corrosión para construir estructuras sólidas. Los ingenieros petroleros necesitan tuberías resistentes a la corrosión y a la abrasión. Los ingenieros de automóviles necesitan de materiales resistentes, pero de poco peso. Los ingenieros aeroespaciales quieren materiales ligeros soportando tanto temperaturas altas como bajas.

El material empleado en el presente trabajo es Aluminio 2024-T351 [22], obteniendo sus propiedades mecánicas a través de distintos ensayos de tracción, comparándolas con las recogidas en prontuarios.

Todo lo relacionado con el ensayo de tracción en materiales metálicos (realización, geometría de probeta, equipos, etc.) se encuentra descrito en la norma ASTM E 8M “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials” [23].

La geometría de probeta utilizada es la que se muestra en la siguiente figura (**Figura 3.1.**), siendo el espesor de la misma de 2 mm:

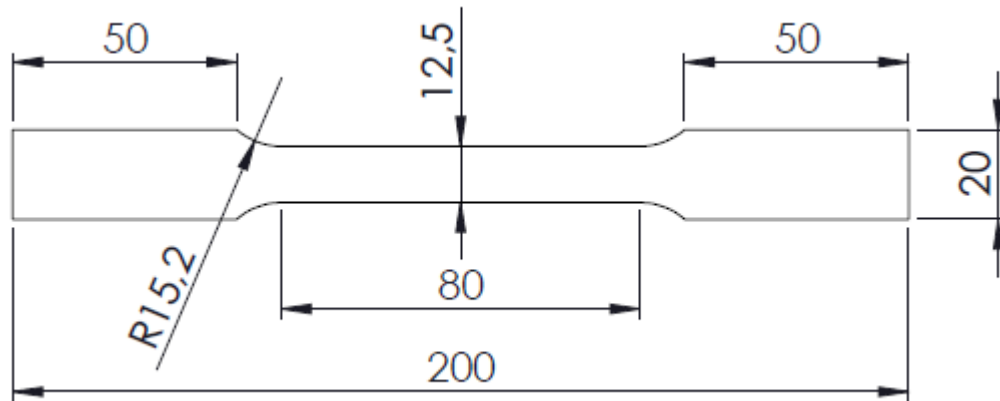


Figura 3.1. Probeta utilizada para el ensayo monotónico de tracción

Según la norma indicada anteriormente, la velocidad de la máquina de ensayos deberá estar comprendida entre 0.05 y $0.5 \text{ mm}/\text{min}$.

Además, como se puede observar en la siguiente figura (**Figura 3.2.**), se va a estudiar si pudiera haber diferencias en las propiedades mecánicas entre probetas cortadas con la dirección de laminado longitudinal y probetas cortadas con dirección de laminado transversal:

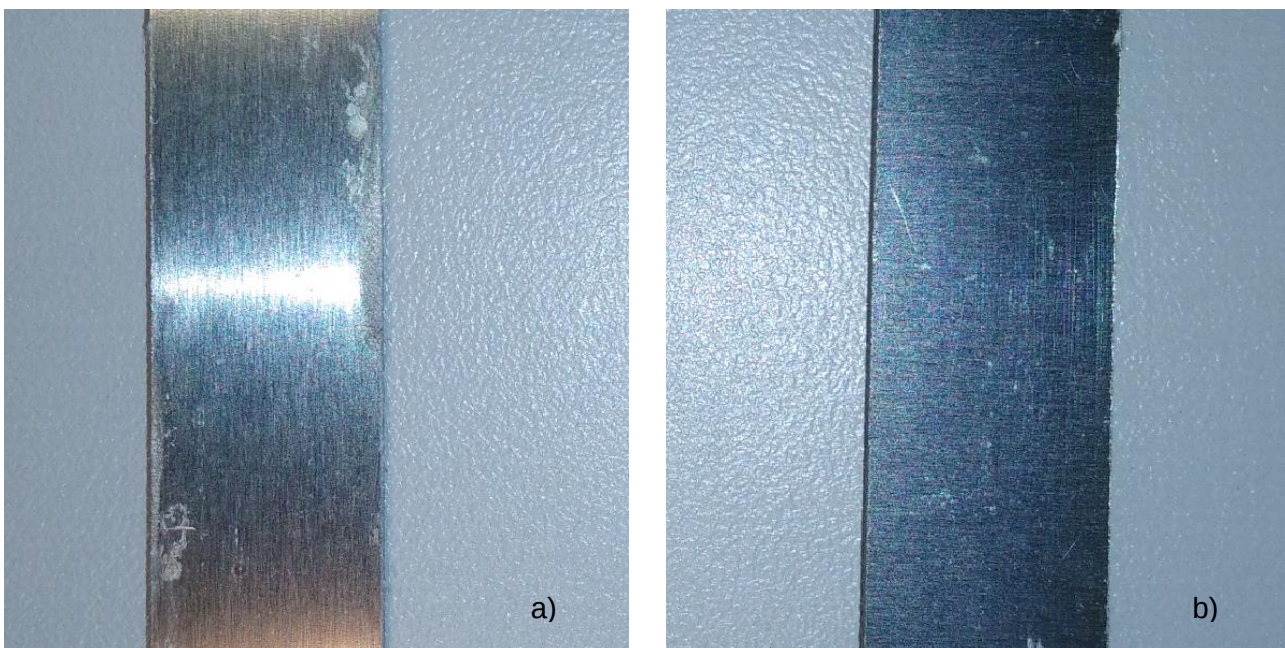


Figura 3.2. Dirección de laminado longitudinal (a) y transversal (b)

3.2. Metodología experimental para el ensayo de tracción

Los pasos a seguir para la realización del ensayo de tracción son los siguientes:

1. Lo primero es limpiar la superficie de la probeta y pintarla dándole 2 capas de pintura: una primera capa de blanco entera y una segunda capa generando un moteado negro sobre el fondo blanco, lo que se conoce como el speckle. El resultado lo podemos ver en la **Figura 3.3**.

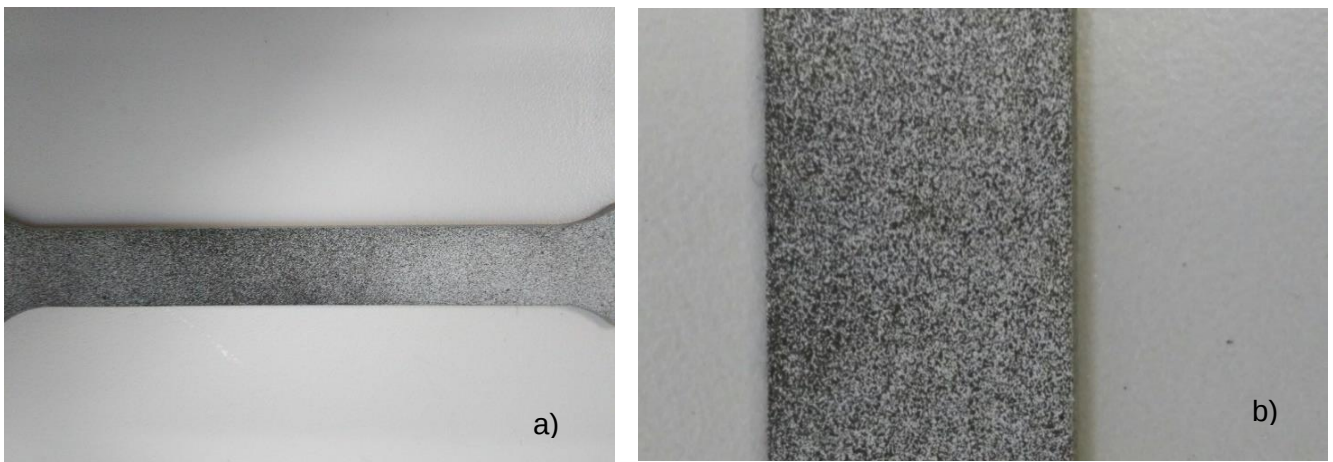


Figura 3.3. Speckle en probeta de ensayo de tracción (a) y speckle ampliado (b)

2. Según la norma ASTM E 8M [23], la longitud de galga es de 50 mm. Como se va a utilizar galgas virtuales, se va a hacer 3 marcas en la probeta: una justa en el centro de la probeta, y las otras 2 a 25 mm del centro de la probeta a la izquierda y otra a la derecha. El resultado se ver en la **Figura 3.4**.
3. Los ensayos de tracción se realizaron empleando una máquina servohidráulica con una capacidad de carga de 100 kN. Para la refrigeración del agua que se emplea para enfriar el aceite que circula a través de las mangueras que conectan la máquina con el grupo hidráulico se ha de encender una enfriadora que refrigera el agua concentrada en un depósito localizado en el laboratorio (**Figura 3.5**).

4. A continuación, se ha de encender el controlador y el software que controla el funcionamiento del equipo hidráulico y la máquina.

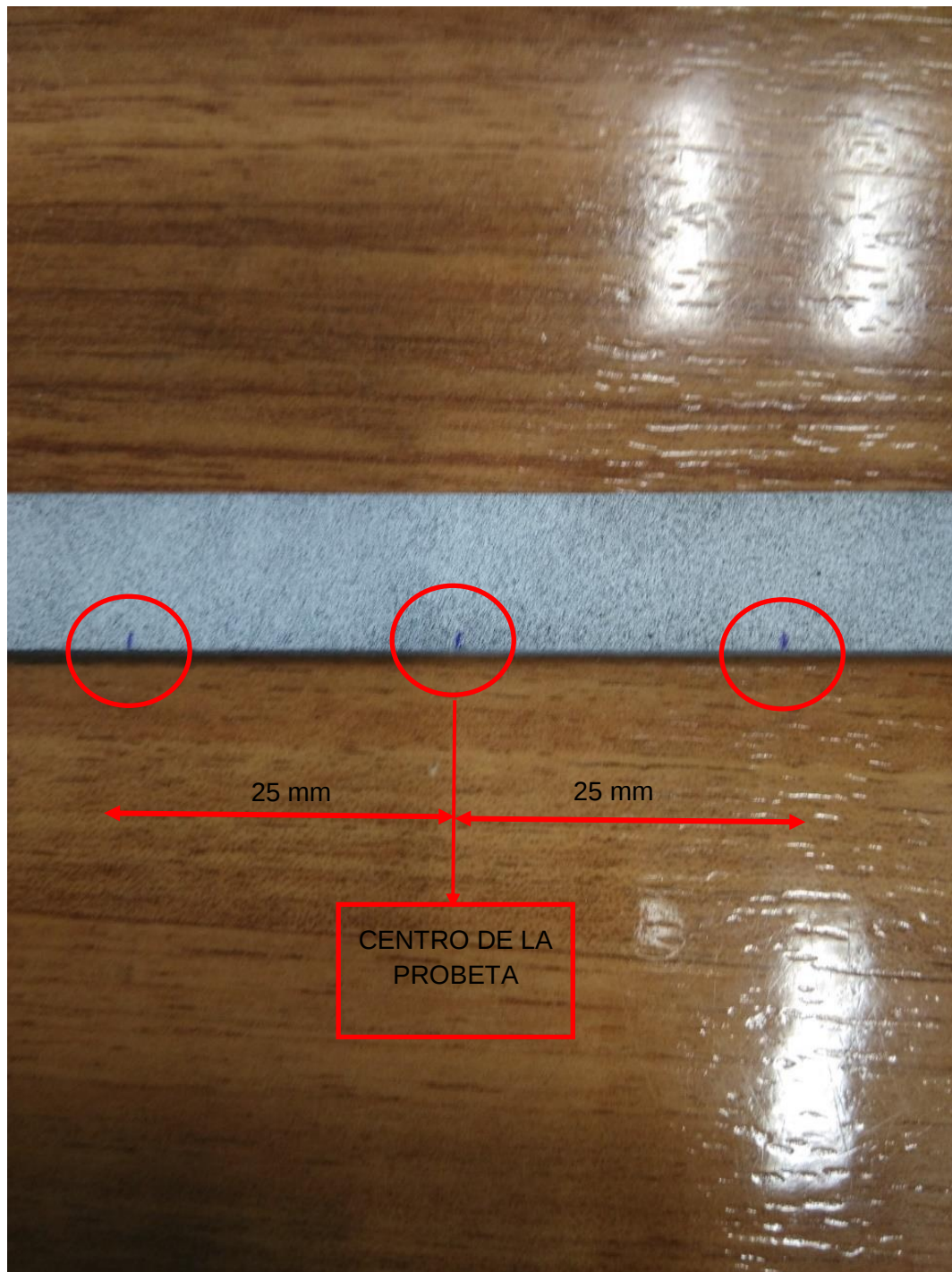


Figura 3.4. Marcas en la probeta del ensayo monotónico de tracción



Figura 3.5. Depósito de agua que refrigera el aceite a través del equipo

5. El siguiente paso es encender la bomba (**Figura 3.6.**) para hacer que el aceite circule desde el grupo hidráulico hasta la máquina de ensayos.



Figura 3.6. Bomba

6. Así, una vez realizado todo esto, hay que ajustar las mordazas superior e inferior para posicionar la probeta, llevando a cabo su sujeción cerrando las mordazas. Normalmente, el cierre de las mordazas genera pequeñas cargas de compresión, por lo que antes de iniciar el ensayo se aplica una precarga de 50 N para evitar así tensiones de compresión. El resultado sería el de la **Figura 3.7. Ensayo monotónico de tracción montado (a) y probeta ajustada en mordazas (b)**



Figura 3.7. Ensayo monotónico de tracción montado (a) y probeta ajustada en mordazas (b)

7. Una vez realizado el posicionamiento de la probeta, a continuación, se lleva a cabo la configuración del equipo necesario para la implementación de la técnica de DIC. El software empleado se denomina “Vic Gauge 2D”. Por otra parte, una vez ya ajustado esto, se tiene que conectar la caja DIC (Digital Image Correlation) al portátil, al igual que la tarjeta de la cámara. A su vez, la caja DIC se enchufa a la controladora.
8. El software empleado para obtener las deformaciones a lo largo del ensayo se denomina “Vic Gauge 2D”. Para ello, se ha de colocar una cámara perfectamente perpendicular a la superficie de interés de la probeta.
9. Cuando ya se encuentra ajustada la cámara en una posición óptima (hay que visualizar las 3 marcas realizadas anteriormente en la probeta y un poco más para cuando esta se deforme seguir visualizándolas), se enfoca la cámara para ver la imagen con nitidez.
10. Así, una vez ajustada la cámara y enfocada, el programa “Vic Gauge 2D” permite la colocación de galgas y extensómetros virtuales para la medición de deformaciones. Para posteriormente calcular el módulo de Poisson, debemos tener un extensómetro longitudinal y otro transversal. Para formar un extensómetro, se coge una galga y se arrastra encima de la otra. Para formar el extensómetro longitudinal, se ha de posicionar una galga en las marcas superior e inferior de la probeta (separadas ambas marcas por 50 mm como dice la norma) y se une tal y como podemos ver en la **Figura 3.8**.

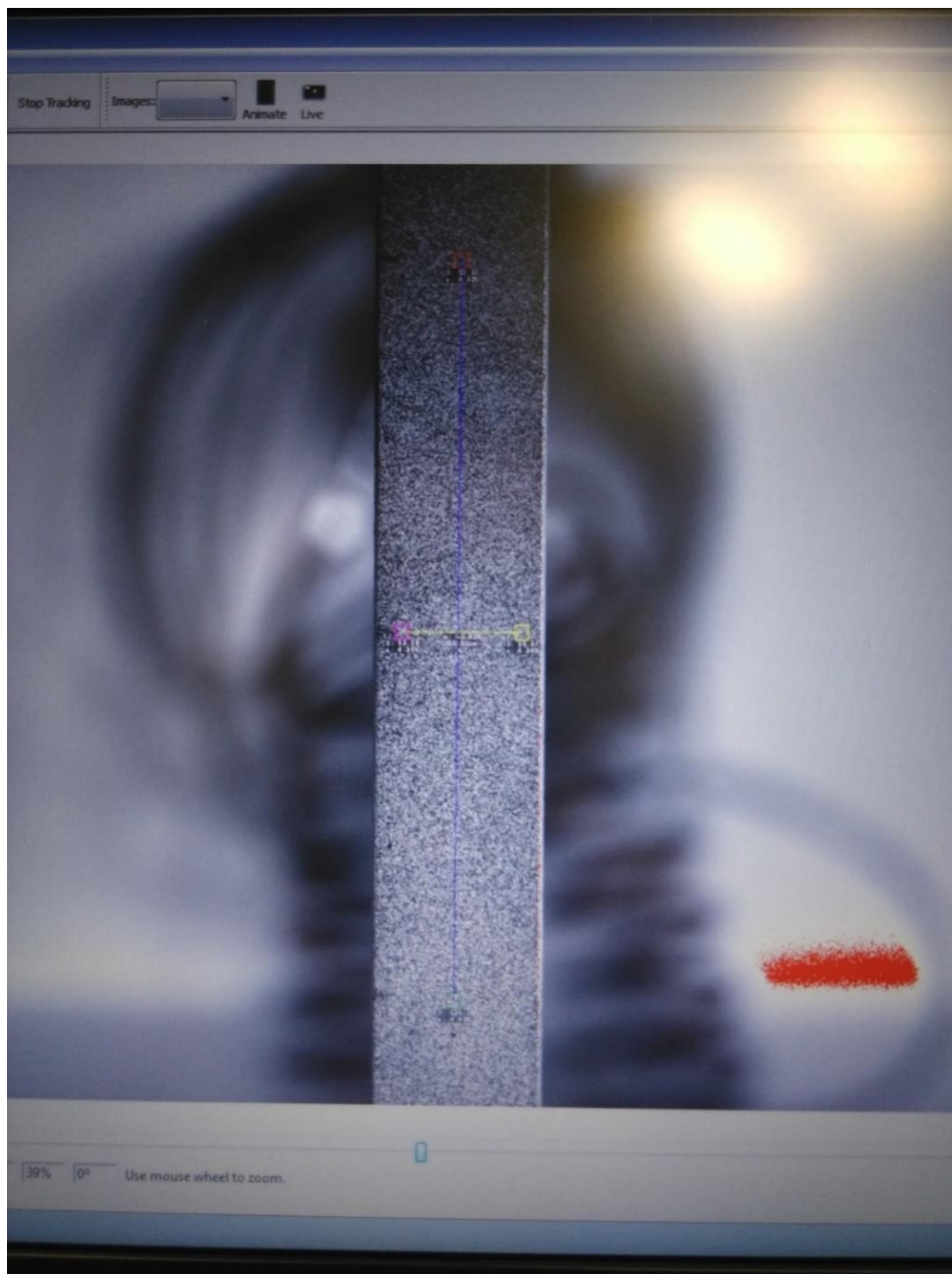


Figura 3.8. Extensómetro longitudinal

11. Al igual, hay que poner 2 galgas en la marca del centro de la probeta y se unen para formar el extensómetro que permita conocer la deformación transversal como vemos en la **Figura 3.9**.

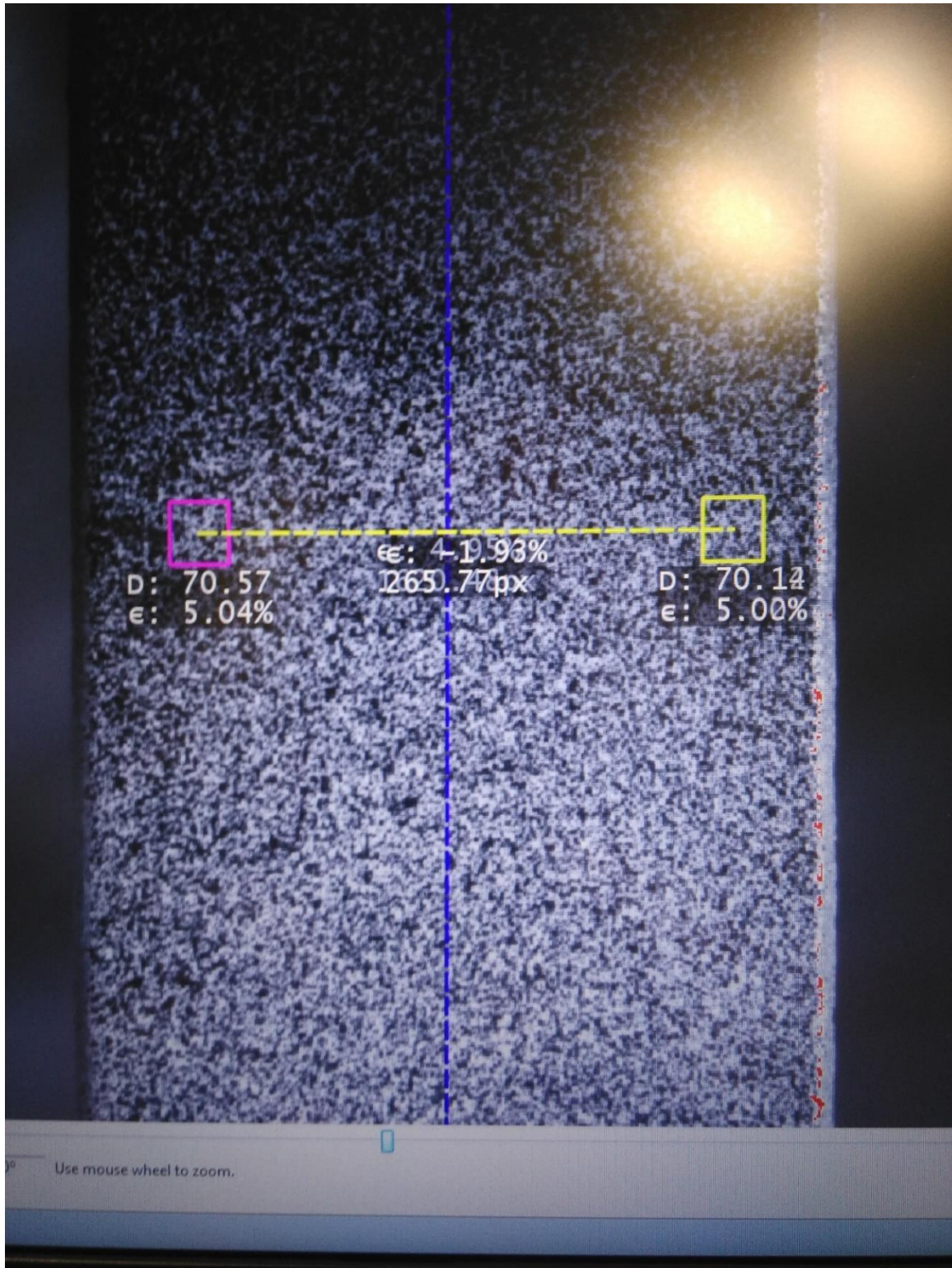


Figura 3.9. Extensómetro transversal

12. El siguiente paso es abrir con el ordenador el programa “Multipurpose Elite” y definir el ensayo, definiendo la velocidad en mm/min y la frecuencia de muestreo de datos en Hz.

Una vez todo ha sido ajustado y configurado, se está en disposición de realizar el ensayo e ir recogiendo los datos a lo largo de su ejecución ya que el equipo de DIC se encuentra perfectamente sincronizado con el controlador de la máquina servohidráulica.

Cuando el ensayo termine, la probeta se romperá como se puede observar en la **Figura 3.10.** y en la **Figura 3.11.**, obteniendo los resultados en un archivo .txt y un archivo Excel, con los que vamos a trabajar y obtener el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, el límite elástico, la tensión máxima y la tensión de rotura.



Figura 3.10. Probeta rota

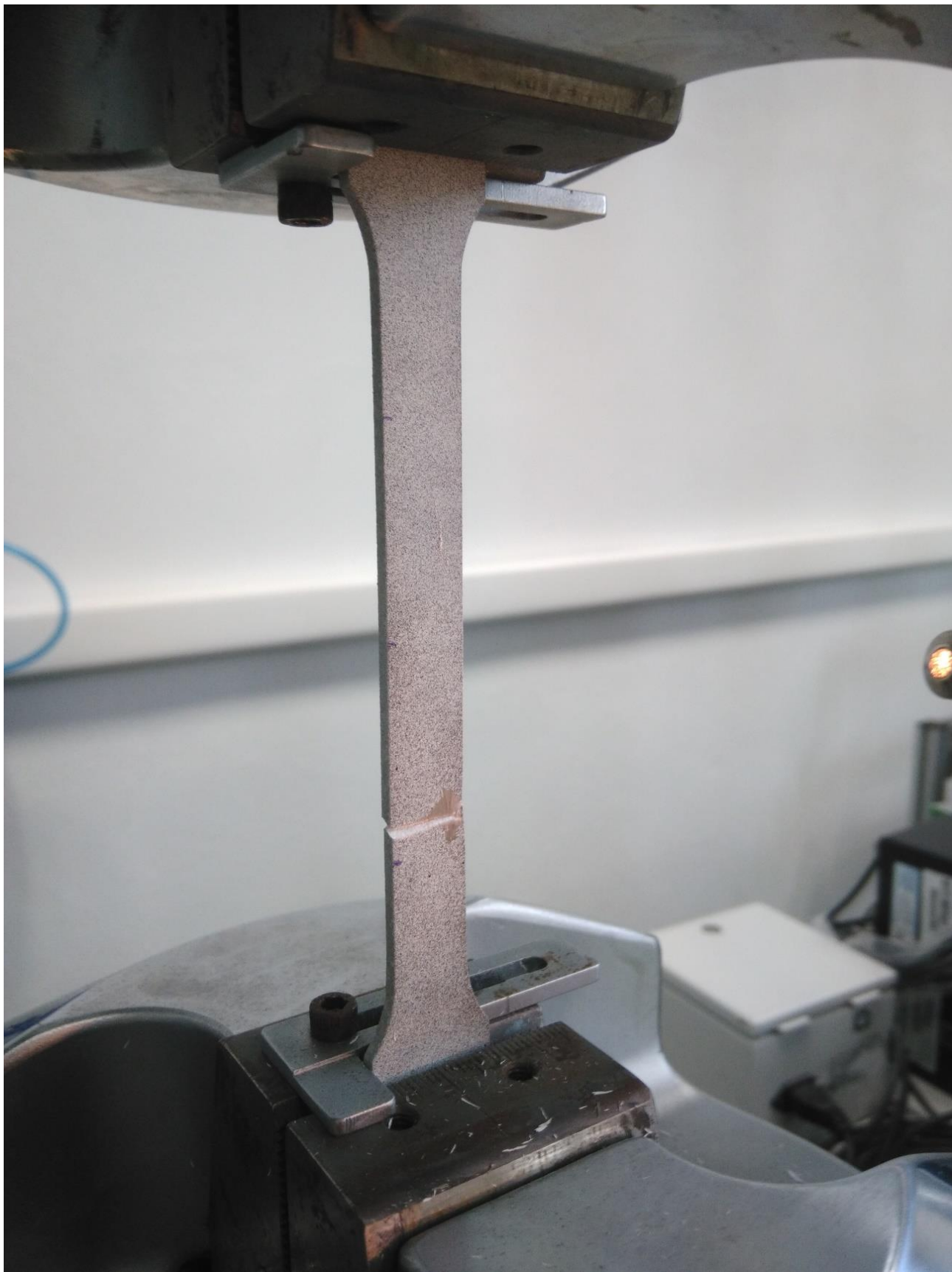


Figura 3.11. Probeta rota en mordaza

3.3. RESULTADOS OBTENIDOS

Se realizaron 8 ensayos diferentes combinando la dirección de laminado de la probeta con distintas velocidades de ensayo y se comprueba si las propiedades mecánicas son iguales o varían según la dirección de laminado o debido a la velocidad a la que se somete el ensayo de tracción:

- Laminado longitudinal: Velocidades de 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5 mm/min
- Laminado transversal: Velocidades de 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5 mm/min

Para calcular la curva tensión-deformación se toman los datos de fuerza recogidos por la máquina y los correspondientes a las deformaciones medidas por los extensómetros virtuales empleados sobre la superficie de la probeta.

Para calcular el módulo de elasticidad, se calcula la pendiente de la zona elástica de la curva tensión-deformación.

También se ha representado el módulo de Poisson frente a la deformación para ver hacia qué valor tiende éste. Se calcula como el valor negativo de la deformación transversal que sufre la probeta dividido entre la deformación longitudinal que sufre la misma. A la deformación transversal se le debe añadir el signo negativo debido a que esta deformación es de contracción, y la deformación longitudinal es positiva debido a que como la pieza se estira, la deformación es positiva. Ambas deformaciones se consiguen con el extensómetro virtual creado a partir de la unión de 2 galgas en el programa "Vic Gauge 2D".

$$\nu = \frac{-\text{deformación transversal}}{\text{deformación longitudinal}} \quad (3.1)$$

Se debe calcular el límite de elasticidad según la norma ASTM E 8M "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials" [23] por el método Offset. El offset utilizado es del 0.2%, es decir, se traza la recta "mn" que es paralela a la recta "OA", teniendo como punto inicial una tensión igual a 0 y una deformación de 0.002, tal y como se ve en la **Figura 3.12**.

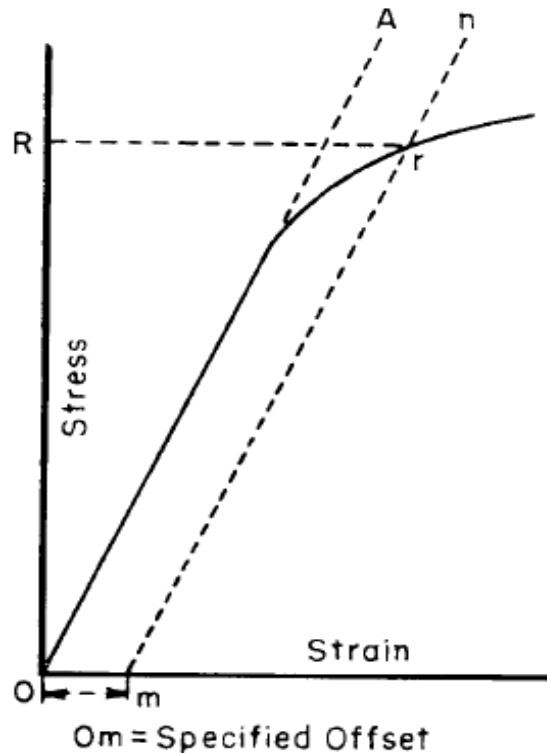


Figura 3.12. Cálculo del límite de elasticidad según norma ASTM E 647 – 00 [24]

Para calcular la tensión máxima y la tensión de rotura solo basta con mirar los datos de tensión obtenidos. El valor más alto coincide con el valor de tensión máxima. Después de este valor máximo, la tensión empieza a decrecer hasta que llega un valor que justo después de ese valor la tensión sufre un cambio brusco hasta 0 porque la probeta se rompe. Ese valor justo antes de que se rompa la probeta se conoce como tensión de rotura.

3.4. RESUMEN RESULTADOS OBTENIDOS

Para el cálculo de los resultados finales, se ha representado las siguientes gráficas:

- Gráfica tensión – deformación.
- Gráfica tensión – deformación en la zona elástica.
- Gráfica módulo de Poisson – deformación.

- Gráfica tensión – deformación más la recta paralela a la zona elástica para el cálculo del límite de elasticidad.

Todas estas gráficas se encuentran recogidas en el anexo I.

En las siguientes tablas se muestran los valores obtenidos en la caracterización del material tanto para la dirección longitudinal como transversal.

Dirección de laminado <u>LONGITUDINAL</u>						
VELOCIDAD (mm/min)	Módulo de Elasticidad	Coeficiente de Poisson	Límite elástico	Tensión máxima	Tensión de rotura o resistencia a la tracción	Deformación final
	E (MPa)	ν	S_{sy} (MPa)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	σ_{rotura} (MPa)	ϵ
0,2	72552	0,3906	369,1442	511,856	484,496	0,108851
0,3	69786	0,3703	359,4178	511,068	502,52	0,124282
0,4	73288	0,4029	358,4182	518,04	493,836	0,14362
0,5	72263	0,3774	362,588	516,328	501,464	0,14445
MEDIA	71972,25	0,3853	362,4171	514,323	495,579	0,1303

Dirección de laminado <u>TRANSVERSAL</u>						
VELOCIDAD (mm/min)	Módulo de Elasticidad	Coeficiente de Poisson	Límite elástico	Tensión máxima	Tensión de rotura o resistencia a la tracción	Deformación final
	E (MPa)	ν	S_{sy} (MPa)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	σ_{rotura} (MPa)	ϵ
0,2	72497	0,3610	329,4633	491,204	470,948	0,128759
0,3	71482	0,3527	333,9743	493,836	474,108	0,138328
0,4	71271	0,3525	335,2897	492,388	472,528	0,135354
0,5	71375	0,3512	335,159	487,26	451,48	0,100816
MEDIA	71656,25	0,3544	333,4716	491,172	467,2735	0,1258

Se aprecia como los valores del módulo de elasticidad y la deformación final se aproximan en la dirección de laminado longitudinal y en la transversal. Sin embargo, los valores del coeficiente de Poisson, el límite elástico, la tensión máxima y la tensión de rotura difieren respecto a los citados laminados.

4. Análisis del crecimiento de grieta a fatiga

4.1. Introducción

El ensayo de fatiga es un método que nos sirve para determinar el comportamiento de los materiales bajo cargas fluctuantes. Para ello sometemos a una determinada frecuencia a una probeta a esfuerzos variables en magnitud y sentido registrando el número de ciclos requeridos para producir el fallo (rotura) de la probeta. El objetivo de este ensayo es el de conocer la forma de minimizar los fallos de los componentes o el de intentar prevenirlos.

Generalmente, los ensayos de fatiga se realizan sobre varias probetas idénticas con distintas cargas fluctuantes. En nuestro caso, se va a realizar un ensayo de fatiga con cargas axiales.

El fenómeno de fatiga es muy común ya que muchos de los componentes de máquinas o elementos de las estructuras sufren cargas variables frecuentes, tal es el caso como los ejes, bielas, muelles, árboles de levas, puentes, alas de aviones, barcos, etc.

Debido a estas cargas cíclicas, las piezas o elementos se pueden romper, incluso cuando estas cargas son inferiores a las cargas de rotura. Además, esta rotura es muy peculiar, ya que esta rotura ocurre sin previo aviso, lo que hace que las roturas por fatiga sean muy peligrosas. Por este motivo, los ensayos de fatiga son realmente importantes.

Los datos que obtenemos de los ensayos de fatiga se representan en un diagrama S-N, es decir, un diagrama que representa la amplitud de la carga (diferencia entre la carga mayor y la carga menor) y el número de ciclos hasta provocar el fallo.

En la **Figura 4.1. Ciclo de ensayo a fatiga** **Figura 4.1.** se puede observar el ciclo de un ensayo a fatiga siendo $\sigma_{m\acute{a}x}$ la tensión máxima, $\sigma_{m\acute{i}n}$ la tensión mínima, σ_{med} la tensión media (siendo la tensión media la media de la tensión máxima y la tensión mínima) y $\Delta\sigma$ la diferencia entre la tensión máxima y la tensión mínima.

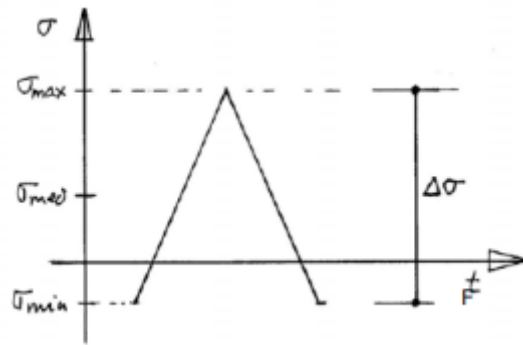


Figura 4.1. Ciclo de ensayo a fatiga

4.2. Geometría de la probeta

La geometría de probeta seleccionada para llevar a cabo la caracterización a fatiga del material es una geometría ampliamente empleada dentro de la comunidad científica (**Figura 4.2.**). Se trata de una configuración denominada compact-tension (CT), la cual viene estandarizada por la norma ASTM E 647 – 00 [24]. El espesor empleado para dichas probetas es el mismo que el utilizado para las probetas de tracción ya que fueron fabricadas a partir de la misma plancha de material.

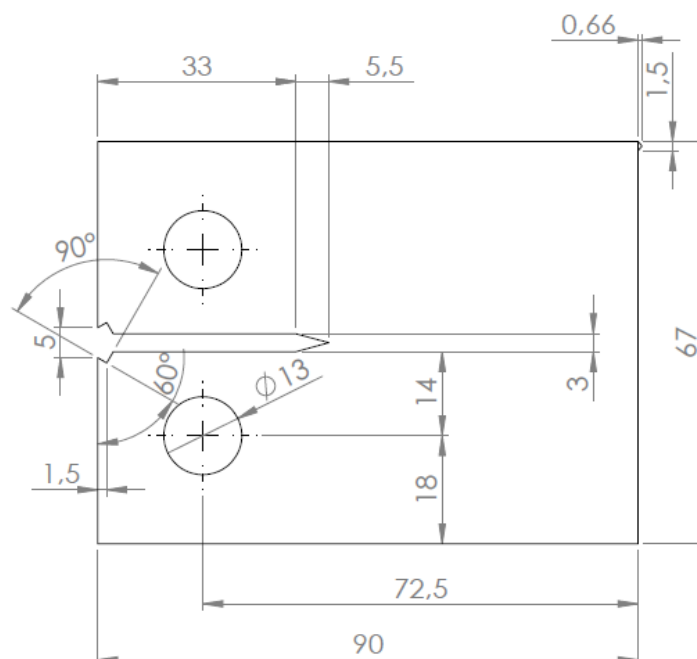


Figura 4.2. Probeta compact-tension (CT) para los ensayos a fatiga. Espesor de 2 mm

4.3. Material

El material seleccionado para la fabricación de las probetas es un material ampliamente utilizado en el sector industrial, aluminio 2024-T351. Esta aleación que pertenece al grupo de los duraluminios, con elevada resistencia mecánica (comparable con los aceros al carbono) y alta resistencia a fatiga, cuya principal aplicación es el de la industria aeronáutica y militar, obtención de tornillos, pernos y remaches.

Este tipo de aluminio no puede ser soldado y tiene una maquinabilidad media, con poca resistencia a la corrosión, por lo que a menudo es revestido para protegerlo, aunque esto puede disminuir la resistencia a fatiga.

4.4. Definición del ensayo de crecimiento de grieta a fatiga

Los pasos que se siguen para la realización del ensayo de crecimiento de grieta a fatiga son los siguientes:

1. En primer lugar, se ha de pintar la probeta como se comentó anteriormente, dándole una capa lisa blanca y otra de puntos negros, formando lo que se conoce como “speckle”. Se puede observar el speckle en la probeta CT en la **Figura 4.3**.
2. Los preparativos de encendido de enfriadora, puesta en marcha del grupo hidráulico y encendido de bomba para la circulación del aceite son los mismos que los indicados anteriormente para el ensayo de tracción.

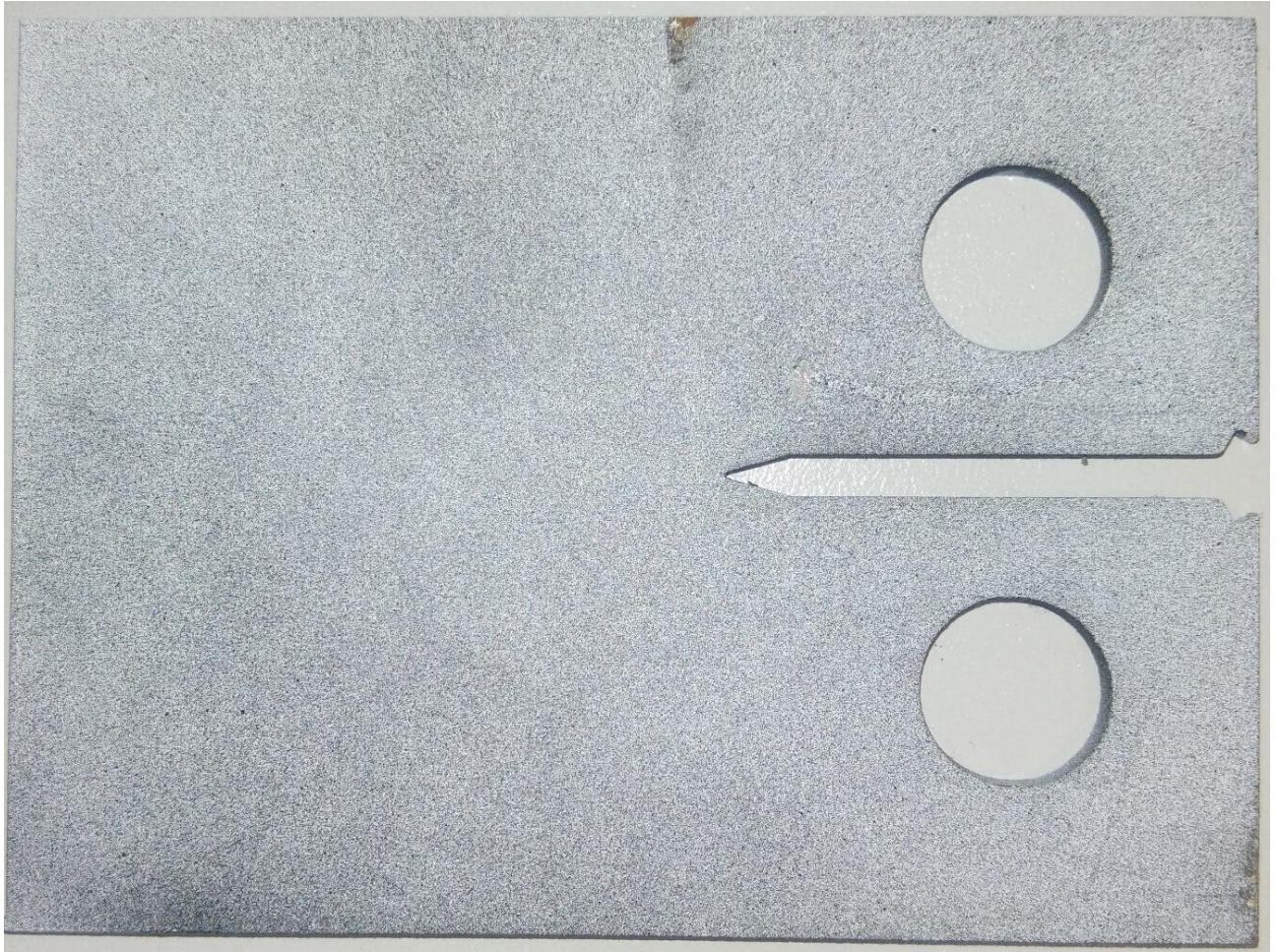


Figura 4.3. Speckle en probeta CT

3. A diferencia del ensayo de tracción, para los ensayos de crecimiento de grieta a fatiga se empleó una máquina servohidráulica de 25 kN de capacidad de carga. Además, para la correcta realización de los ensayos se han de emplear mordazas estandarizadas para las probetas CT de fractura, por lo que las mordazas hidráulicas se han de cambiar por dichas mordazas (**Figura 4.4.**).

4. Una vez que se han dispuesto las mordazas de fractura, se coloca la probeta introduciendo unos bulones entre la probeta y las mordazas para asegurar el agarre de la probeta, tal y como podemos ver en la **Figura 4.4.**

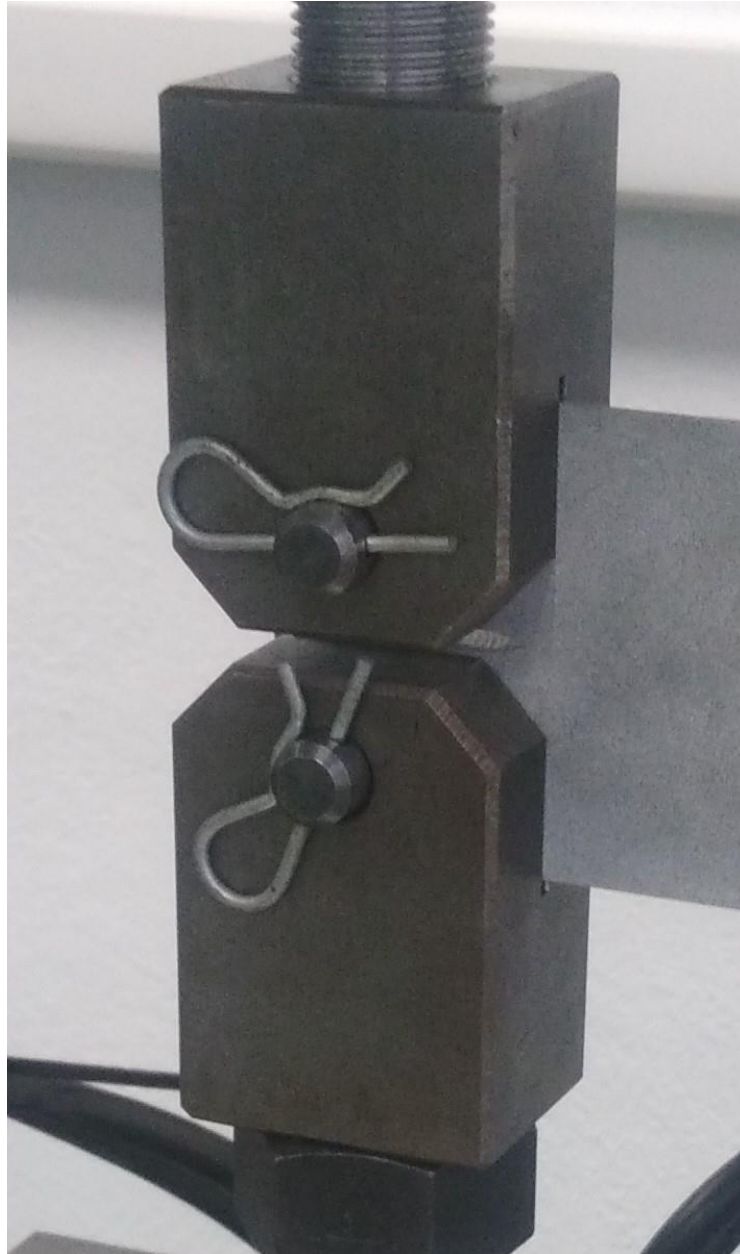


Figura 4.4. Mordazas de probeta CT con bulones

5. Para la realización de los ensayos se ha de definir el punto medio (“target set point”), la amplitud de la onda y la frecuencia de ciclado. Se van a definir cuatro ensayos a distintos valores de *R-ratio*, manteniendo la misma amplitud de carga (600 N), estos parámetros serían:

➤ Entre 600 y 1200 N ($R = 0.5$):

- Punto medio = 900 N
- Amplitud = 300 N

- Frecuencia = 10 Hz
- Entre 300 y 900 N ($R= 0.33$):
- Punto medio = 600 N
 - Amplitud = 300 N
 - Frecuencia = 10 Hz
- Entre 70 y 670 N ($R= 0.1$):
- Punto medio = 370 N
 - Amplitud = 300 N
 - Frecuencia = 10 Hz
- Entre 5 y 605 N ($R= 0$):
- Punto medio = 305 N
 - Amplitud = 300 N
 - Frecuencia = 10 Hz
6. Hay que tener en cuenta que a medida que la grieta va creciendo, la rigidez de la misma va disminuyendo, entonces la máquina servohidráulica no consigue alcanzar los picos de la fuerza establecida. Por ejemplo, si el ensayo es entre 600 y 1200 N, la máquina no alcanza estos picos, por lo que hay que modificar la ganancia para que la máquina consiga alcanzar los picos. A medida que la grieta crece, hay que ir aumentando la ganancia.
7. Establecer un número de ciclos y empezar a ciclar.
8. Por otro lado, se emplean dos cámaras distintas para diferentes tareas. Una de ellas se dispone perpendicularmente a la superficie pintada de speckle para la implementación de la técnica de DIC, mientras que la otra cámara se dispone en la parte trasera de la probeta para el seguimiento del vértice de la grieta. En la **Figura 4.5. Cámara delantera y trasera** se observa la probeta con las 2 cámaras.

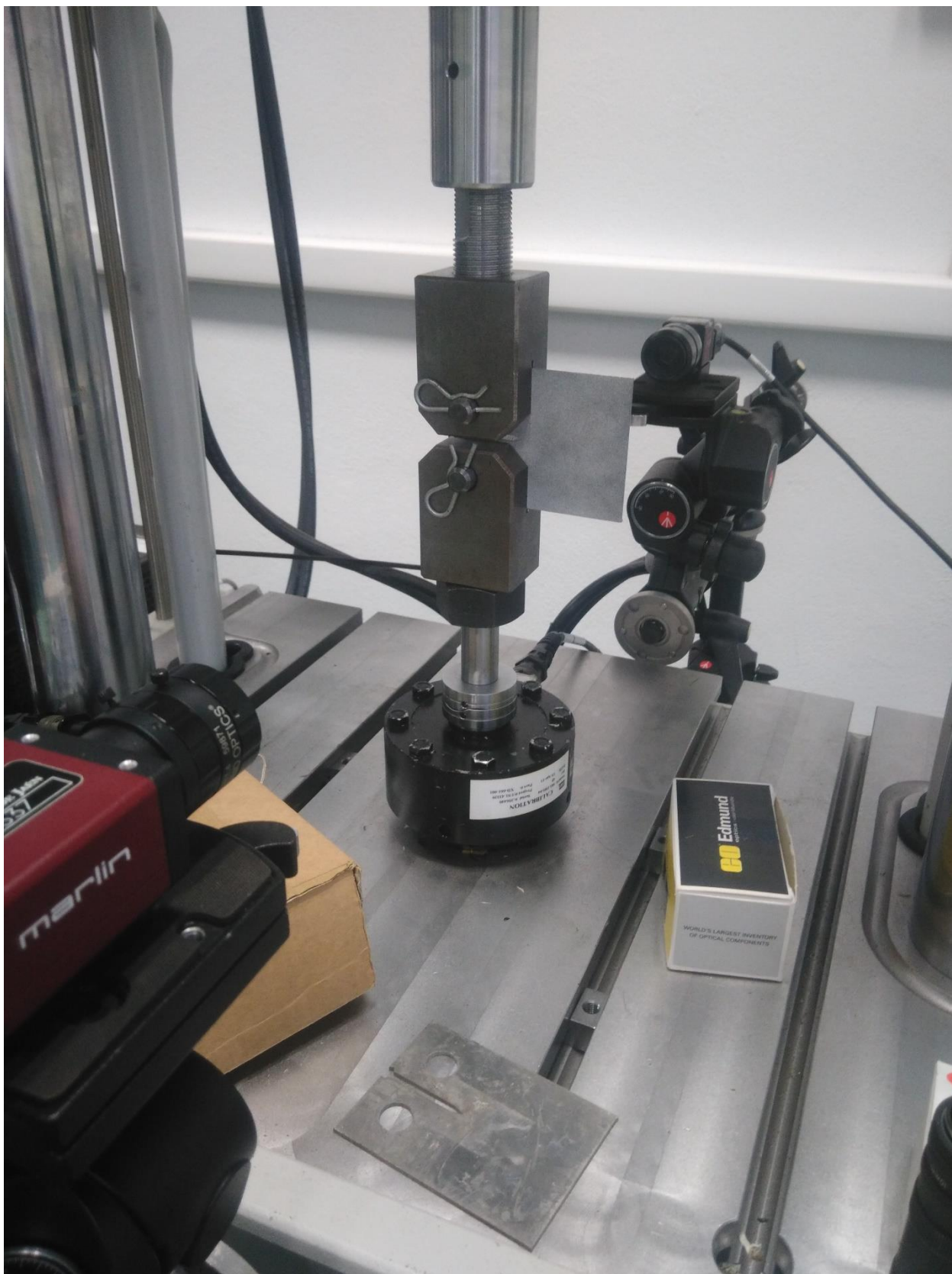


Figura 4.5. Cámara delantera y trasera

9. Una vez conectadas las cámaras, abrir el programa AVT_Smart View, abrir las 2 cámaras y pulsar el icono “Play” para ver las cámaras en directo.
10. Cuando la máquina realice el número de ciclos que se ha determinado, tomar una imagen con la cámara trasera para ir siguiendo el crecimiento de la grieta y con la cámara delantera se tiene que guardar una secuencia de imágenes, variando la fuerza ejercida de la máquina desde 0 N hasta el valor máximo de fuerza del ensayo que se esté realizando, variando la fuerza de 10 en 10 N. Con esto se consigue posteriormente calcular la deformación de la probeta con Correlación de Imágenes.
11. Además, para calcular el COD (“Crack Opening Displacement”), se va a colocar un extensómetro en el extremo de la entalla de la probeta y con el programa “Multipurpose Elite” se va a realizar un ensayo entre 0 N hasta el valor máximo de fuerza de nuestro ensayo. El extensómetro se puede observar en la **Figura 4.6**. Se aprecia perfectamente como en la punta de las patillas del extensómetro hay un anclaje, este anclaje sirve para colocarlo en la probeta, en una especie de ranura que tiene la misma tal y como podemos ver en la **Figura 4.7**.
12. Una vez realizado todo esto, volver a poner un número de ciclos y volver a ciclar la probeta.

En los ensayos realizados, se va a estudiar el crecimiento de la grieta hasta 20 mm, realizando los cálculos que se verán en el apartado siguiente. En la **Figura 4.8**. **Equipo montado** se puede ver el equipo completo montado con un monitor para controlar la máquina servohidráulica, otro monitor para visualizar la probeta gracias a las cámaras, un ordenador portátil para recoger los datos y la máquina servohidráulica trabajando.



Figura 4.6. Extensómetro



Figura 4.7. Ranura para extensómetro en probeta CT

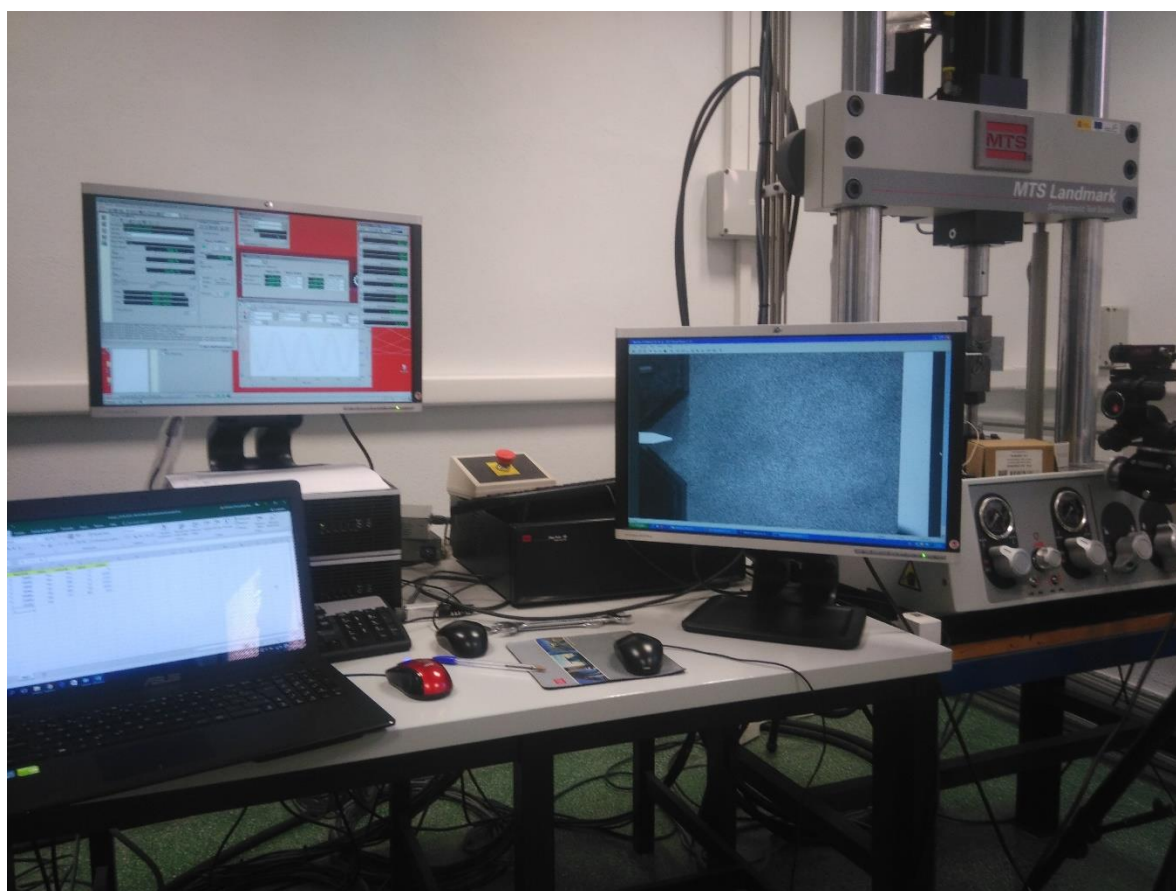


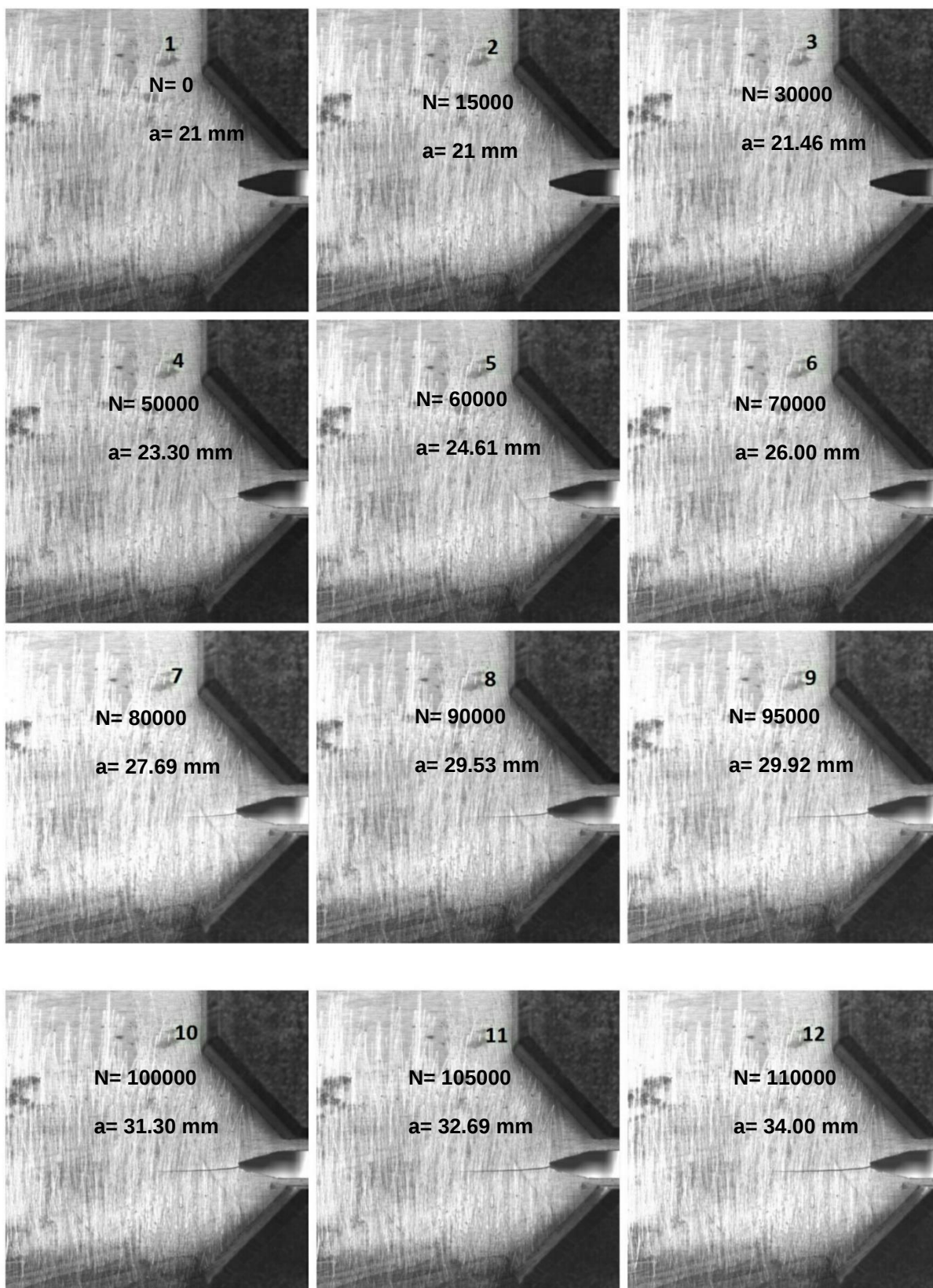
Figura 4.8. Equipo montado

En la **Figura 4.9.** se puede ver el resultado final de la grieta originada al finalizar uno de los ensayos. El ensayo realizado corresponde al de $R= 0.5$ (entre 600 y 1200 N). La superficie de la probeta fue rallada para facilitar la visualización del vértice de la grieta.

Además, en la **Figura 4.10.** *Aparición y crecimiento de grieta en probeta CT*, se observa la aparición y el crecimiento paso a paso de esta misma grieta.



Figura 4.9. Grieta en probeta CT



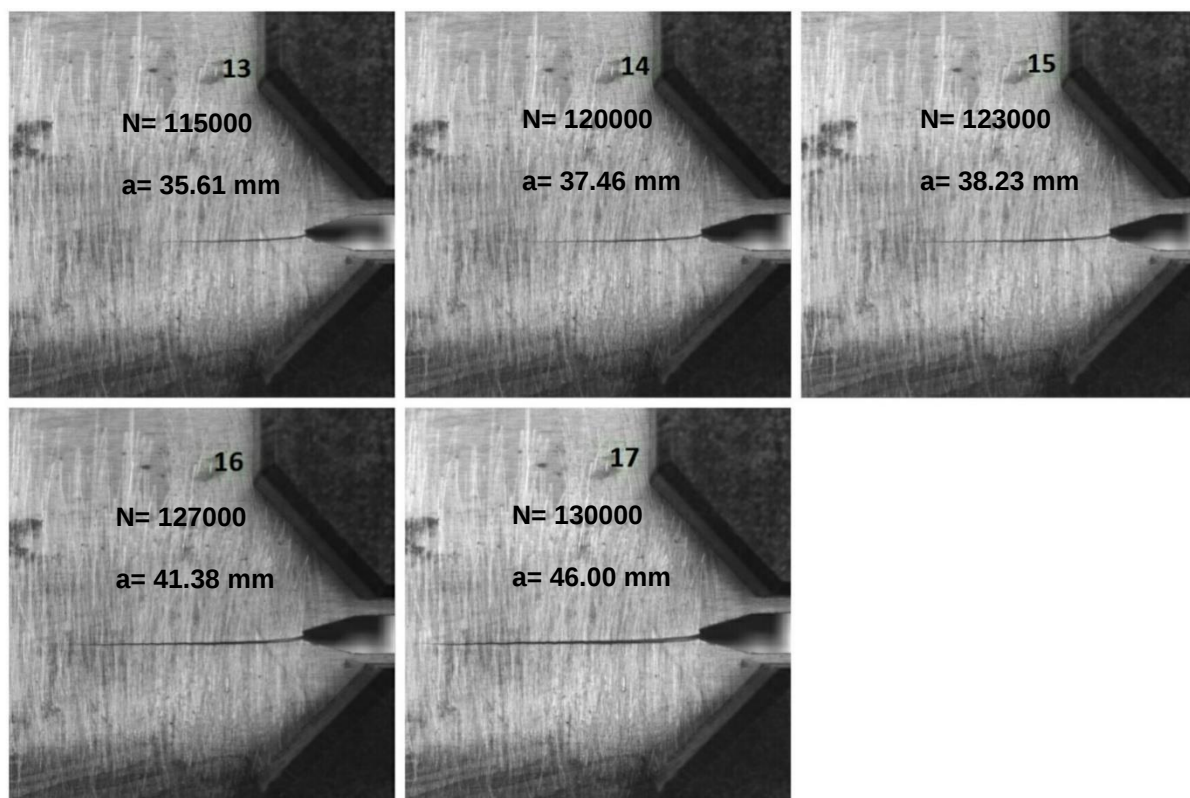


Figura 4.10. Aparición y crecimiento de grieta en probeta CT

5. Resultados y discusión

5.1. Gráfica longitud de grieta frente a número de ciclos

A continuación, se va a representar el tamaño de la grieta con respecto al número de ciclos para los 4 ensayos realizados.

En primer lugar, se va a representar el tamaño de grieta a_n frente al número de ciclos N , debido a que a_n es el tamaño de grieta que se mide experimentalmente. El tamaño de grieta a_n es la distancia que va desde la entalla hasta el vértice de la grieta, así en la **Figura 5.1.** tenemos:

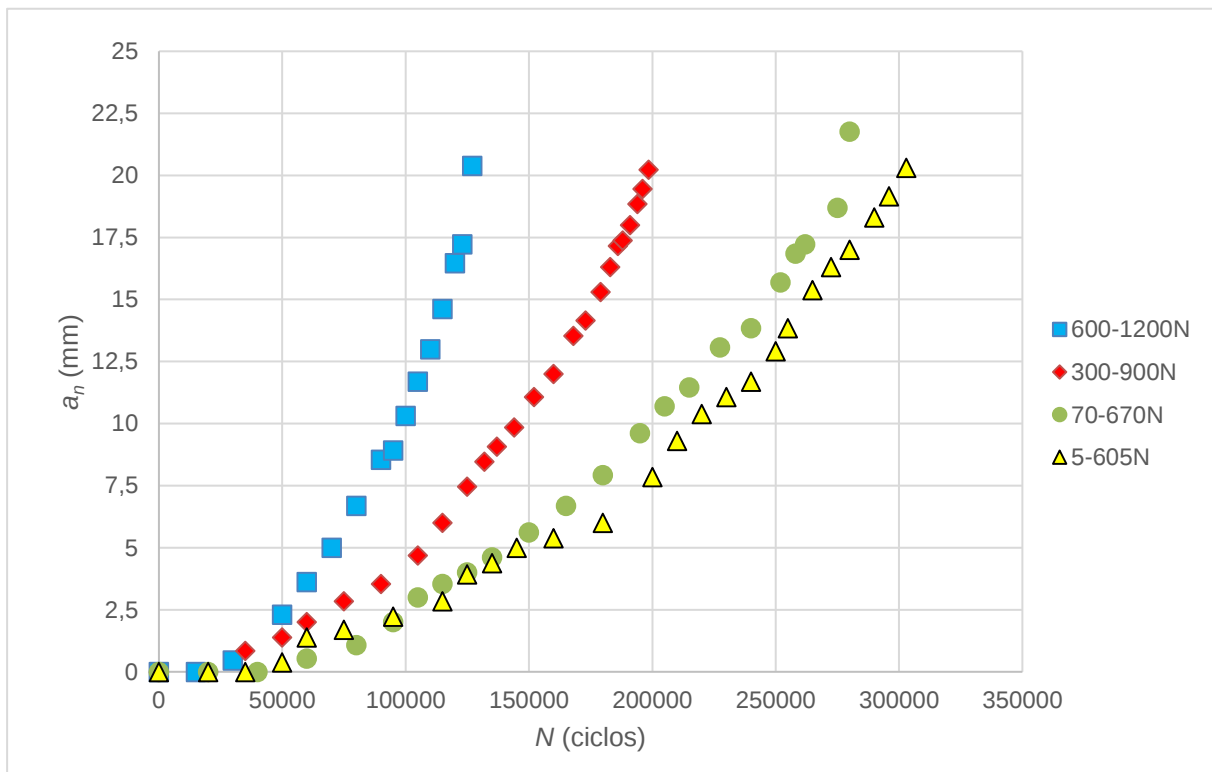


Figura 5.1. Representación del tamaño de grieta a_n frente al número de ciclos N

Se han realizado los ensayos de fatiga para estudiar el crecimiento de la grieta hasta unos 20 mm. Como era de esperar, en el ensayo donde la fuerza ejercida fue mayor, la grieta se propagó con mayor rapidez.

Sin embargo, la gráfica que se necesita es la que representa al tamaño de grieta a con respecto al número de ciclos N , debido a que el tamaño de grieta a es el

normalizado por la normativa. Por lo que se tiene que representar la longitud de grieta a frente al número de ciclos N . El resultado es exactamente igual que en el gráfico anterior, solo que se diferencia que hemos sustituido la longitud de grieta a_n por la longitud de grieta a . Si anteriormente hemos dicho que a_n es la distancia desde la punta de la entalla hasta la punta de la grieta, a es la distancia desde el centro del agujero pasante de la probeta hasta la punta de la grieta. La diferencia entre estas 2 distancias la podemos ver en la **Figura 5.2**. Por lo que la gráfica normalizada sería la de la **Figura 5.3**. Gráfica normalizada de la longitud de grieta frente al número de ciclos:

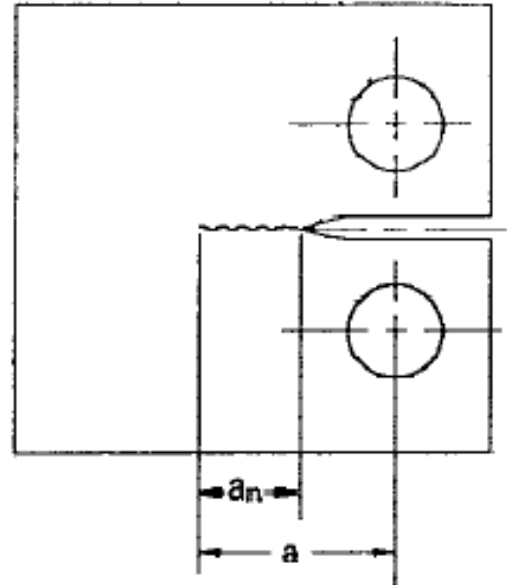


Figura 5.2. Diferencia entre a_n y a

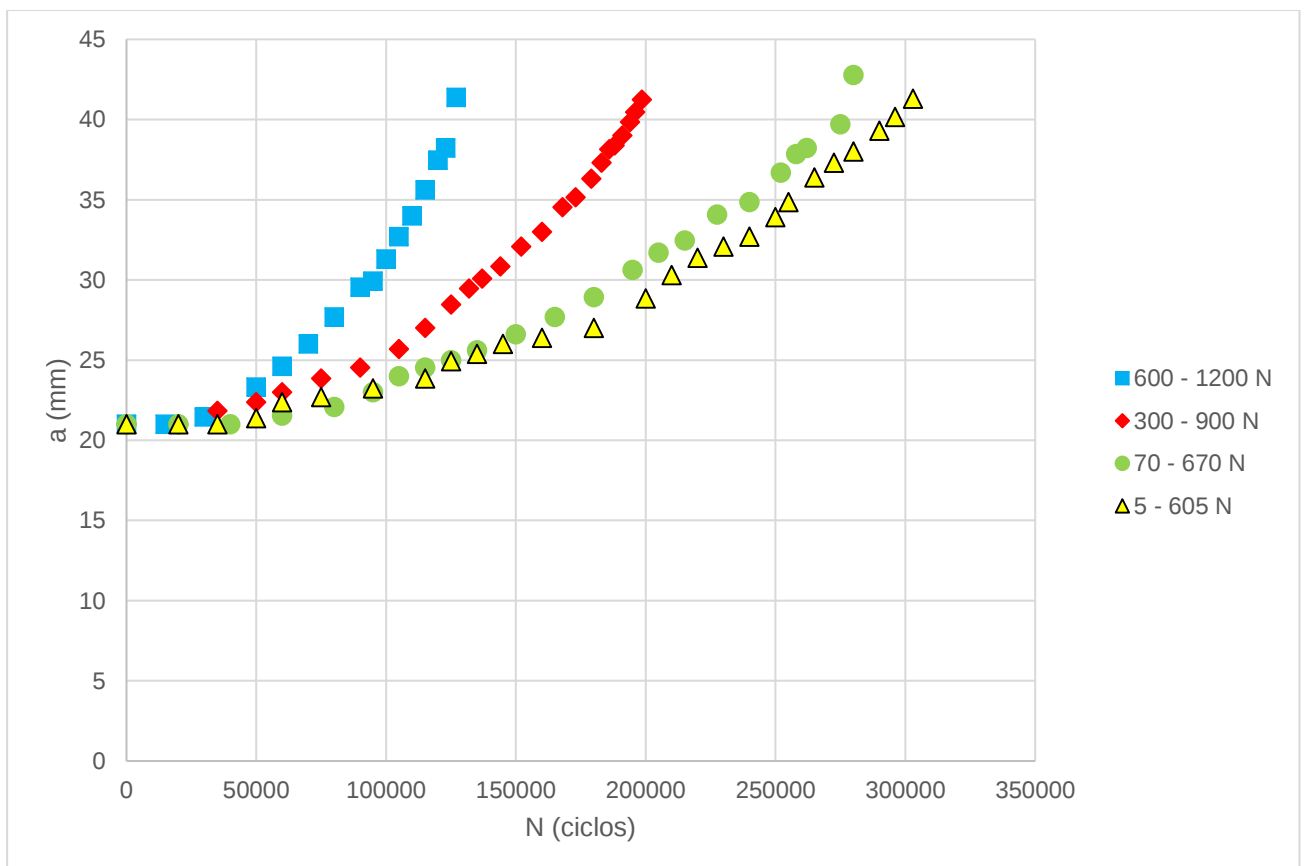


Figura 5.3. Gráfica normalizada de la longitud de grieta frente al número de ciclos

Así, en el ensayo entre 600 y 1200 N, la grieta crece y alcanza unos 20 mm en unos 130000 ciclos. Este dato contrasta con el ensayo realizado entre 5 y 605 N, donde la grieta necesita unos 303000 ciclos para alcanzar los 20 mm de longitud.

Como los otros 2 ensayos son con valores intermedios a los anteriormente mencionados, la grieta requiere de más ciclos para alcanzar los 20 mm que el ensayo de 600 y 1200 N y menos ciclos que el ensayo entre 5 y 605 N.

En el ensayo entre 300 y 900 N, se requiere de 198500 ciclos para que la grieta alcance los 20 mm y en el ensayo entre 70 y 670 N, se requiere de unos 280000 ciclos para lograrlo.

A modo de resumen se puede observar la siguiente tabla:

ENSAYO	GRIETA a_n (mm)	GRIETA FINAL a (mm)	NÚMERO DE CICLOS N (ciclos)
600 – 1200 N	20.38	41.38	127000
300 – 900 N	20.23	41.23	198500
70 – 670 N	21.77	42.77	280000
5 – 605 N	20.31	41.31	303000

5.2. Ley de Paris Nominal

Como ya se ha mencionado anteriormente, la ley de Paris relaciona en un gráfico en escala logarítmica la variación del tamaño de grieta con la variación del número de ciclos da/dN , respecto el rango del factor de intensidad de tensiones “Stress-Intensity Factor Range” ΔK .

Según la norma ASTM E 647 – 00 “Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates”[24], el rango del factor de intensidad de tensiones en una probeta CT se calcula:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{2 + \alpha}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

Siendo $\alpha = \frac{a}{W}$; expresión válida para $\frac{a}{W} \geq 0.2$, a : tamaño de grieta, ΔP = variación de fuerza ejercida en el ensayo (fuerza mayor menos fuerza menor), B y W son el espesor y el ancho de la probeta, respectivamente.

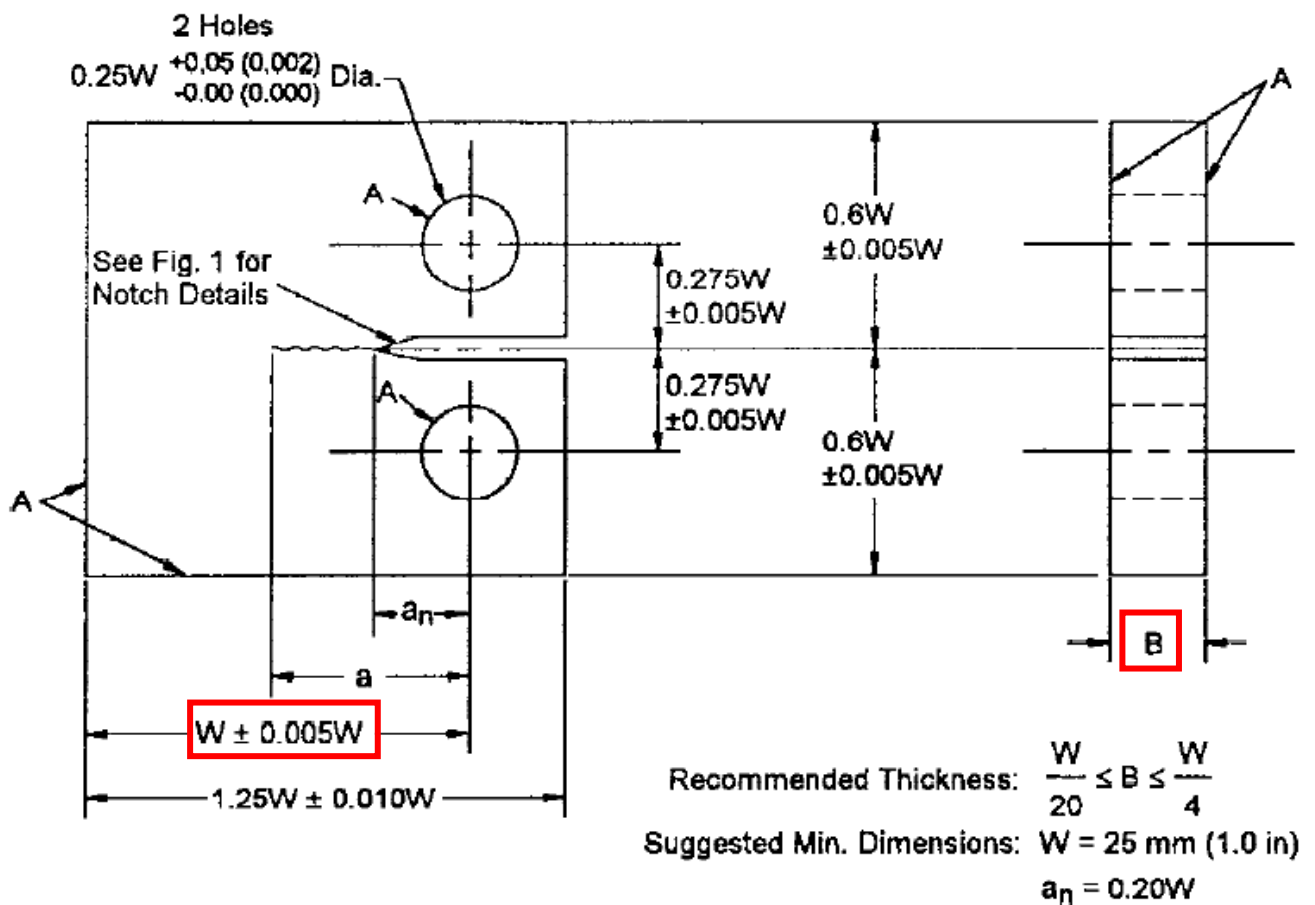


Figura 5.4. Dimensiones de probeta CT según norma ASTM 647 - 00

Así, si se representa la ley de Paris (**Figura 5.5.**) obtenemos:

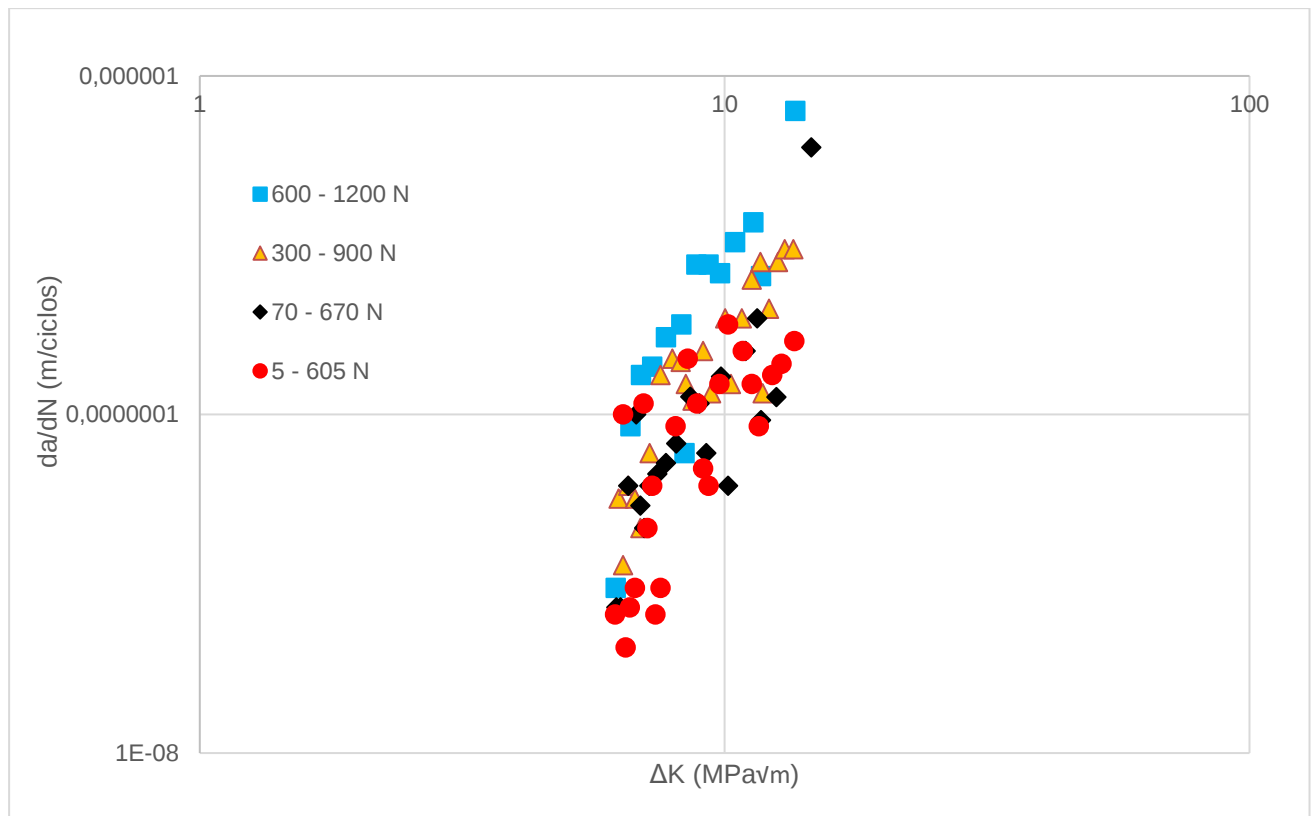


Figura 5.5. Ley de Paris para los distintos ensayos

En la **Figura 5.6.** se puede observar que para mayores cocientes de tensiones R , la velocidad de crecimiento da/dN es mayor. Así si observamos la gráfica **Figura 5.5.** ocurre exactamente lo mismo.

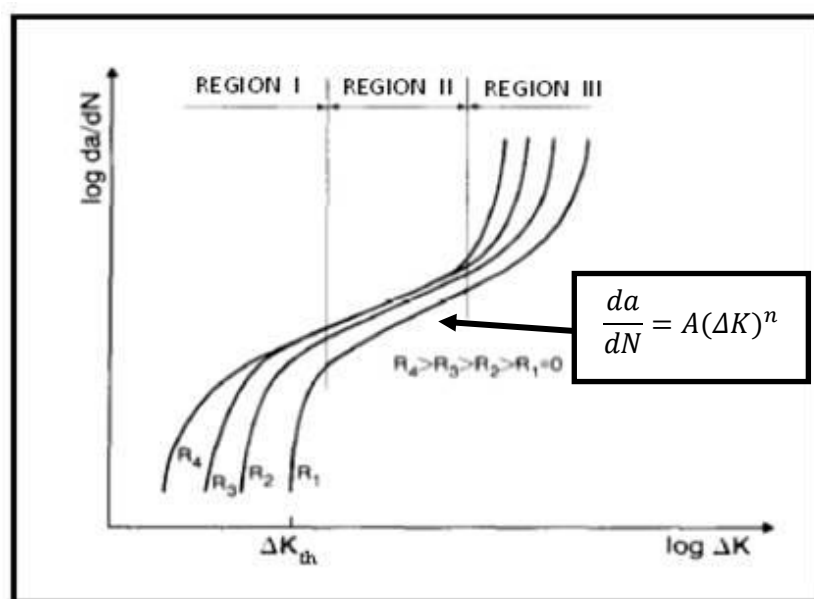


Figura 5.6. Ley de Paris para distintos R-ratios

Como se observa en la ley de Paris de cada uno de los ensayos, lo que se puede apreciar muy bien en cada ensayo es la región II que es donde mayor número de datos hay recogidos, donde el logaritmo de ΔK con respecto al logaritmo de da/dN tienen una relación lineal propuesta por Paris:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n$$

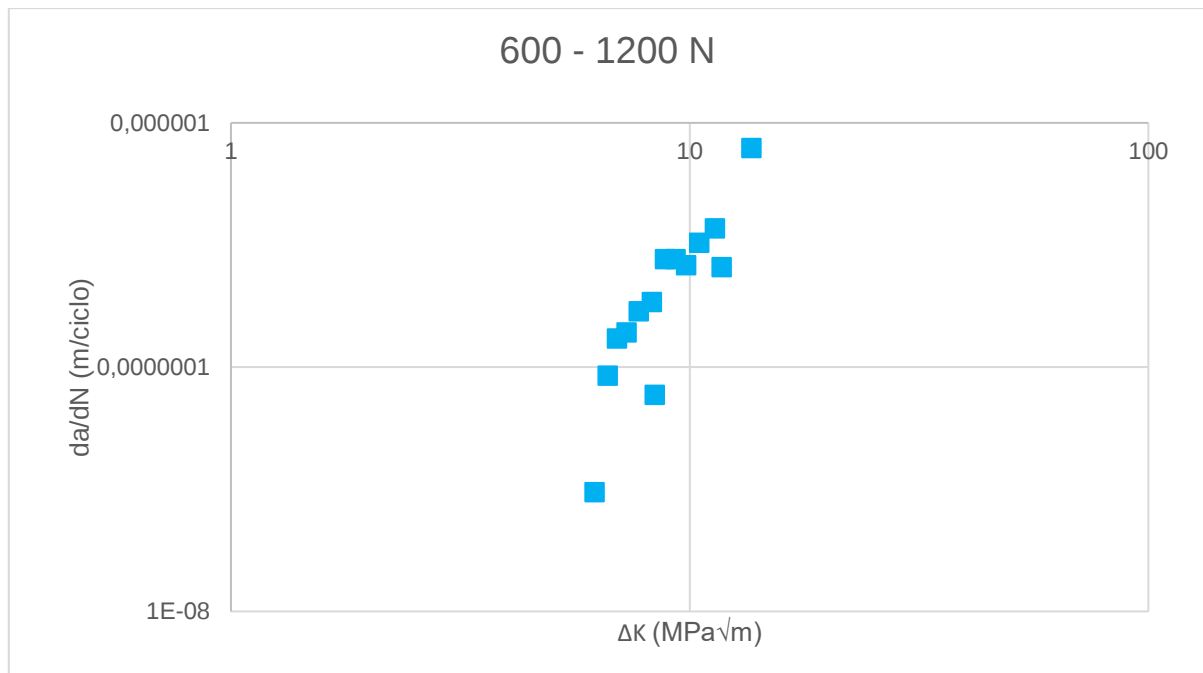
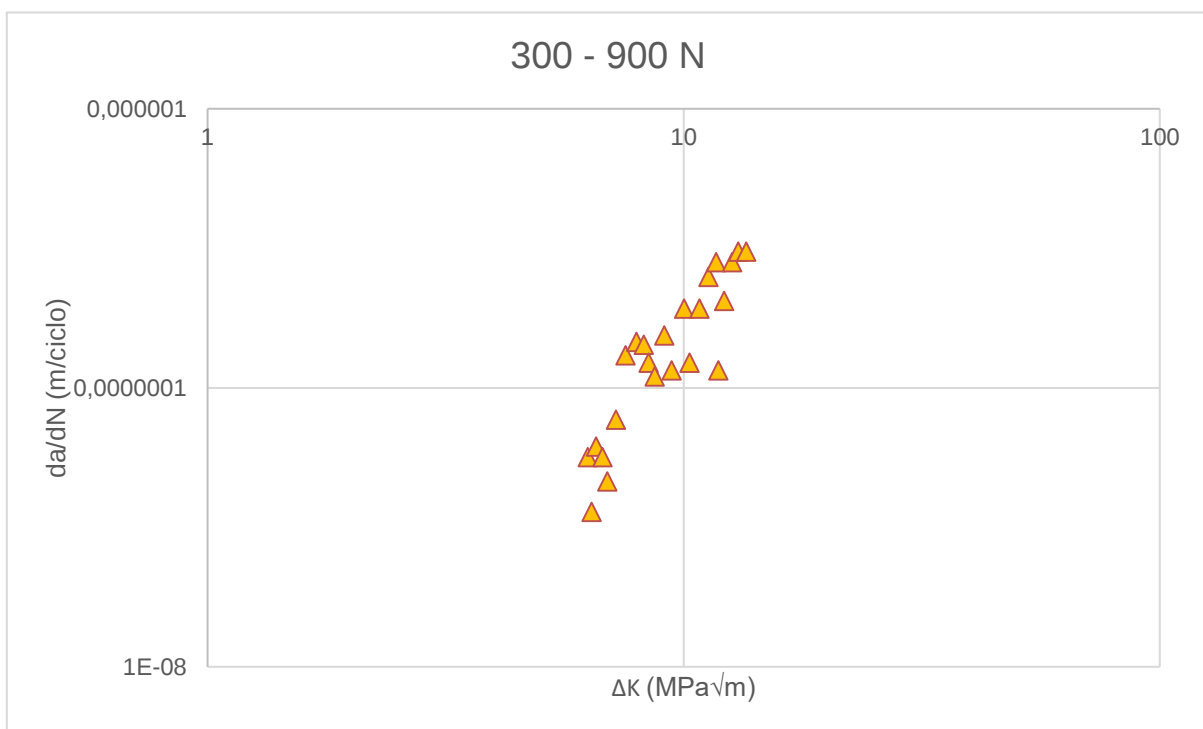
donde n es la pendiente de la curva y A es un coeficiente que depende del rango de tensiones del ensayo.

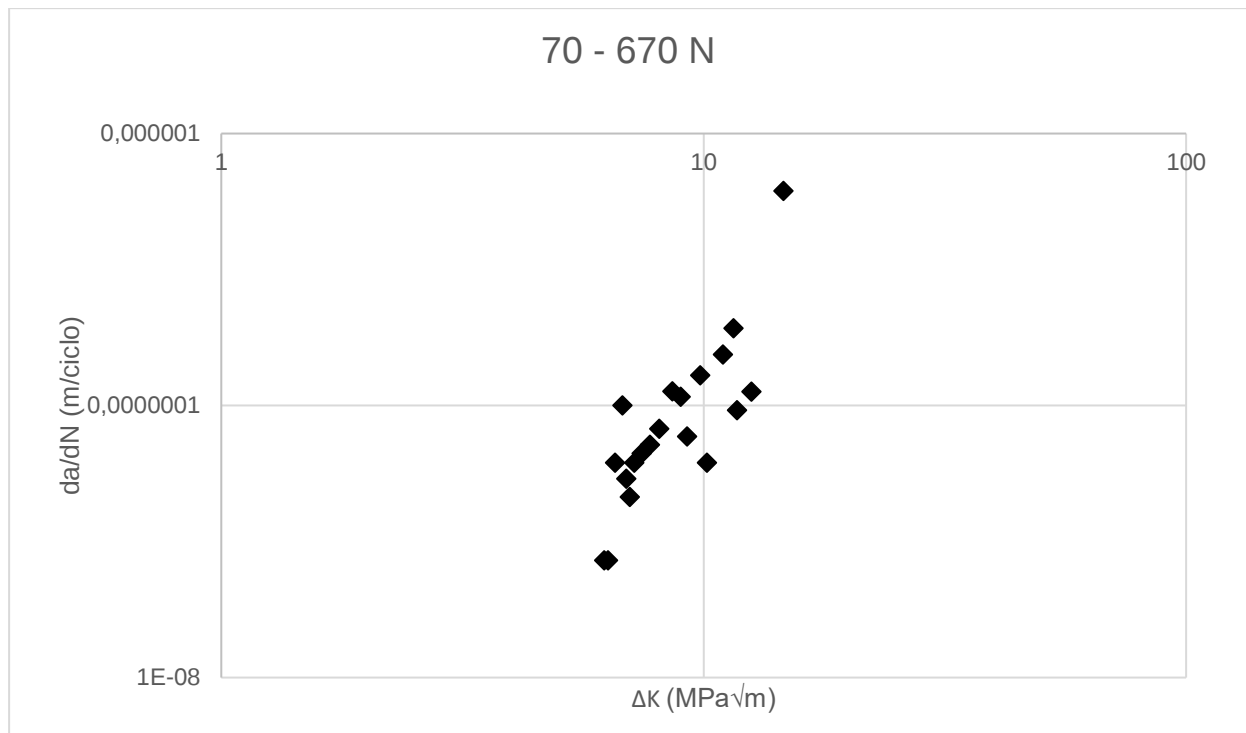
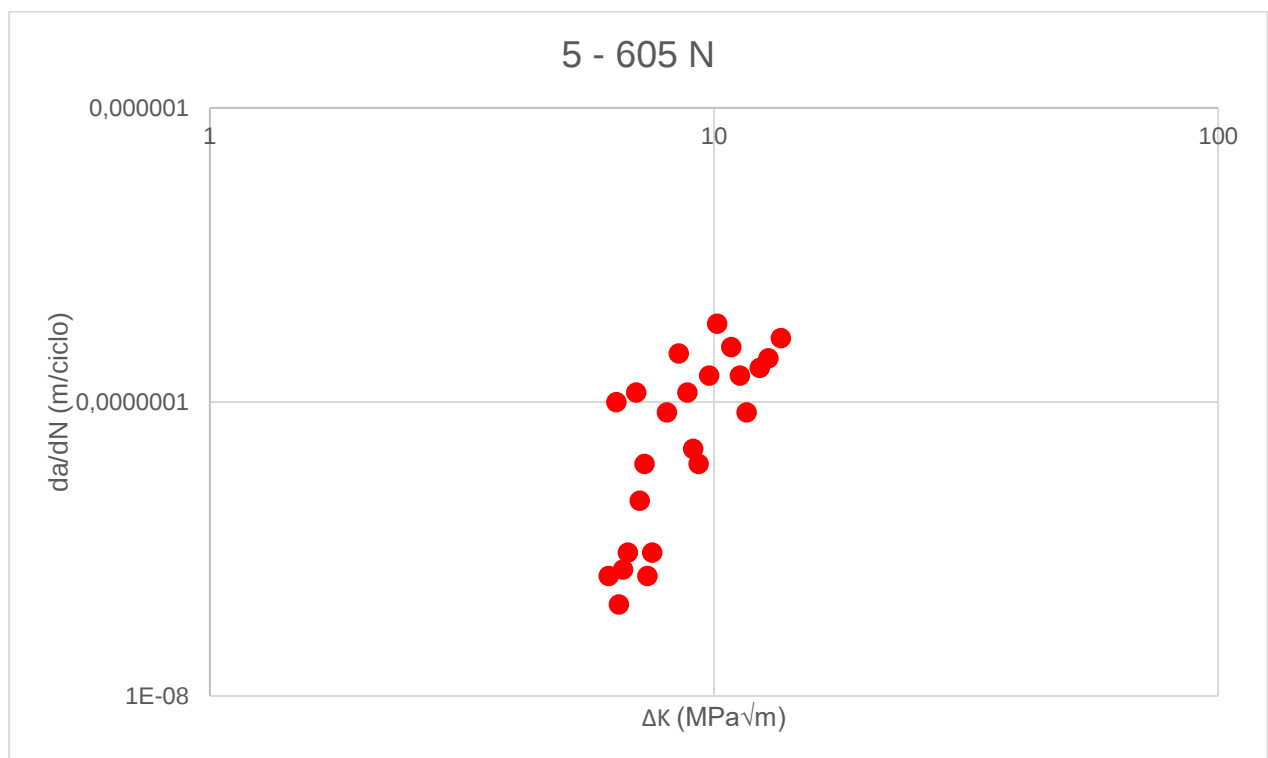
Se aprecia como la velocidad de crecimiento de la grieta en el ensayo entre 600 y 1200 N ($R= 0.5$) es mayor que la velocidad de crecimiento restantes.

Además, se observa como la velocidad de crecimiento en el ensayo entre 300 y 900 N ($R= 0.33$) es superior a la velocidad de crecimiento de los ensayos entre 70 y 670 N ($R= 0.104 \approx 0.1$) y el ensayo entre 5 y 605 N ($R= 0.0083 \approx 0$).

Es más difícil apreciar que la velocidad del ensayo con $R \approx 0.1$ es superior a la velocidad de crecimiento de la grieta en el ensayo con $R \approx 0$ debido a que las fuerzas escogidas son muy similares y por tanto el coeficiente de tensiones R también son similares.

Y desglosando cada ensayo en gráficas diferentes (**Figura 5.7.**, **Figura 5.8.**, **Figura 5.9.** y **Figura 5.10.**), se observa mucho mejor la Ley de Paris nominal para cada ensayo:

*Figura 5.7. Ley de Paris ensayo R= 0.5**Figura 5.8. Ley de Paris ensayo R= 0.33*

*Figura 5.9. Ley de Paris ensayo R= 0.1*

En esta última gráfica (ensayo entre 5 y 605 N) se puede apreciar como los datos son mucho más ruidosos que para los otros ensayos. Esto puede ser debido a la mayor dificultad de recoger los datos a la hora de apreciar la variación de la longitud de grieta, aunque se puede apreciar la región II de la ley de Paris.

5.3. Análisis del COD: Determinación de la carga de apertura de grieta (P_{op})

En este apartado se va a estudiar el cierre de grieta. El cierre de grieta es un término que se refiere al fenómeno por el que las superficies de fractura de una grieta entran en contacto durante la descarga de un ciclo de fuerza. En muchos materiales, el cierre de grieta puede ocurrir para valores de carga mayores a la mínima aplicada sobre la probeta. Después, en el periodo de carga desde la fuerza mínima, se necesita un valor de carga superior a la mínima para que la grieta quede completamente abierta.

El cierre de grieta se cuantificó por primera vez y su importancia fue dada a conocer por Elber [25] en 1970, quién mostró que una grieta a fatiga estaba cerrada incluso con una carga a tracción aplicada.

Basado en sus resultados experimentales, argumentó que una reducción en la fuerza impulsora en el vértice de la grieta ocurre como resultado de la deformación plástica que se genera durante el crecimiento de grieta a fatiga. Así, a medida que la grieta se va propagando, esta deformación plástica va creciendo debido a que el daño producido sobre la probeta es mayor, por lo que se va generando una estela plástica detrás del vértice de la grieta.

Esta deformación residual a tracción causa que las caras de la grieta se cierren prematuramente antes de que se alcance la carga mínima.

Desde el trabajo de Elber, se ha realizado y documentado una amplia investigación sobre el cierre de grieta. En la siguiente figura (**Figura 5.11.**) se muestra gráficamente el significado del fenómeno de cierre.

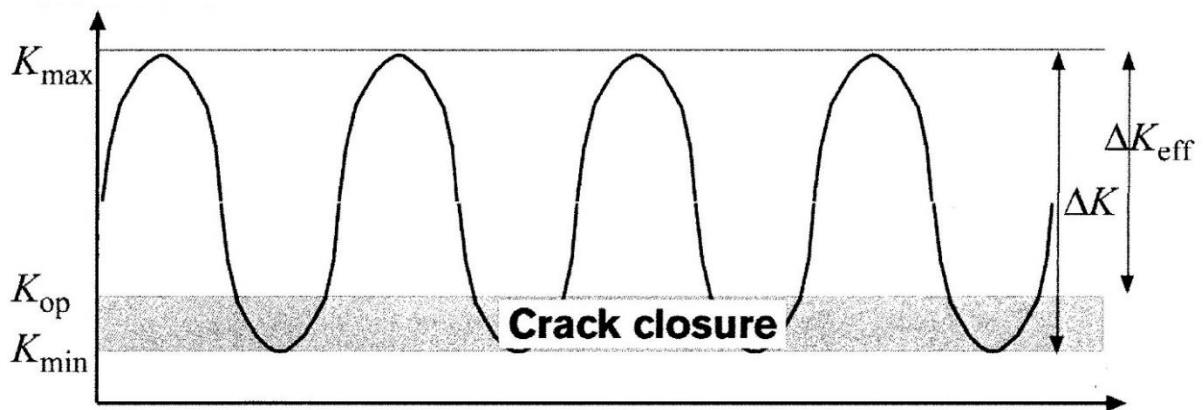


Figura 5.11. Región efectiva de la Ley de Paris

- Para el valor K_{op} , el vértice de la grieta se abre durante la rama de carga del ciclo.
- El factor de intensidad de tensiones de apertura K_{op} , es típicamente mayor que el factor de intensidad de tensiones mínimo K_{min} .

Para calcular la carga de apertura P_{op} se va a utilizar los datos obtenidos con el extensómetro en cada uno de los ensayos realizados. Para ello se deben de seguir los pasos que nos dice la norma ASTM 647 – 00 [24]:

- 1) Primero, hay que representar la fuerza con respecto al COD medido con el extensómetro.

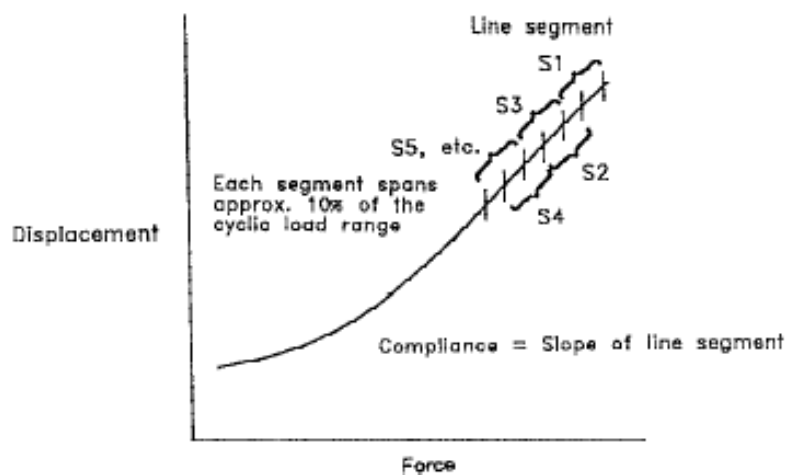


Figura 5.12. Gráfica fuerza-desplazamiento para el cálculo de la fuerza de apertura según norma ASTM 647 – 00 [24]

- 2) Se toman los datos de fuerza y desplazamiento en segmentos y los datos de cada segmento le hacemos la media para obtener un solo valor, filtrando así los datos para no obtener tantos. El rango de cada segmento es de un 10% del número total de datos aproximadamente. Cada segmento se solapa con otro sobre un 5% del número total de datos, es decir, cada segmento empieza justo en la mitad del segmento anterior tal y como vemos en la **Figura 5.12**.

- 3) Calcular el $COD_{teórico}$. Para ello hay que representar la fuerza con respecto al COD obtenidos por el extensómetro obteniendo la curva de la **Figura 5.13**. **Figura 5.13. Cálculo del cierre de grieta (a) y ampliación de la zona de desviación debida al cierre de grieta (b)** Si la gráfica la aproximamos a una línea recta, obtenemos la ecuación: $P = mCOD_{teórico} + n$, siendo m la pendiente de la recta y n el término independiente. Si despejamos el término $COD_{teórico}$ obtenemos: $COD_{teórico} = \frac{P-n}{m}$

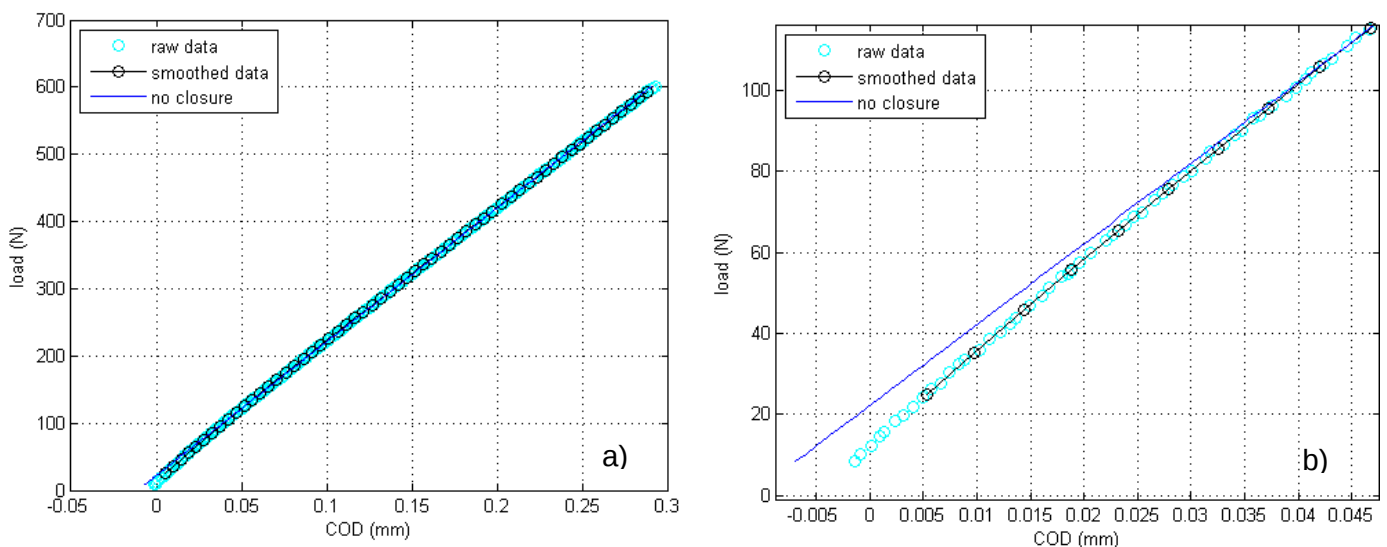


Figura 5.13. Cálculo del cierre de grieta (a) y ampliación de la zona de desviación debida al cierre de grieta (b)

- 4) Como se aprecia en la gráfica anterior, para fuerzas menores, el $COD_{teórico}$ y el $COD_{experimental}$ no coinciden, y esto es lo que se conoce como OFFSET.

- 5) Calcular el OFFSET, como la diferencia entre el $COD_{teórico}$ menos el $COD_{experimental}$ (obtenido por el extensómetro), y representamos el OFFSET frente a los valores de fuerza filtrados obteniendo algo similar a la **Figura 5.14**.

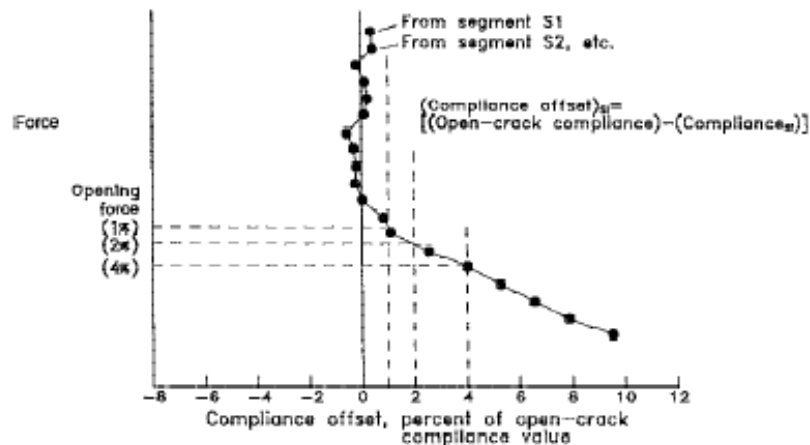


Figura 5.14. Determinación de la fuerza de apertura usando el método OFFSET

- 6) Al representar una línea vertical cuando el valor del OFFSET es igual a 0 (el $COD_{teórico}$ es igual al $COD_{experimental}$), esta va a cortar la gráfica en un punto, y ese valor de fuerza es la fuerza de apertura P_{op} . Esto se puede observar en la **Figura 5.15**. **Figura 5.15. Ejemplo de cálculo de fuerza de apertura (a) y ejemplo ampliado (b)** Si se amplía la región de corte tal y como se observa en la misma figura, se puede ver con mejor facilidad la fuerza de apertura, obteniendo en este ejemplo un valor de $P_{op} = 117.53N$.

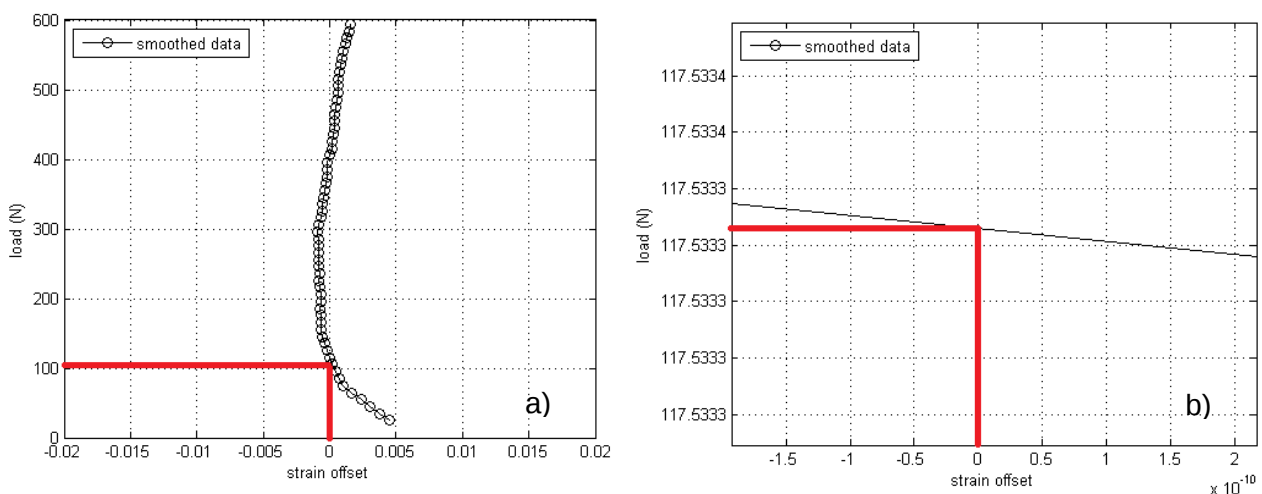


Figura 5.15. Ejemplo de cálculo de fuerza de apertura (a) y ejemplo ampliado (b)

- 7) Si se obtienen estas mismas gráficas para los ensayos a altos R -ratios ($R=0.5$ y $R=0.33$) (*Figura 5.16. Figura 5.16. Cálculo de cierre de grieta (a) y OFFSET nulo para ensayo con $R=0.5$ y Figura 5.17.*), se puede observar cómo el OFFSET es nulo, por lo tanto, no hay cierre de grieta. Esto quiere decir que la grieta permanece constantemente abierta durante el ciclo de carga.

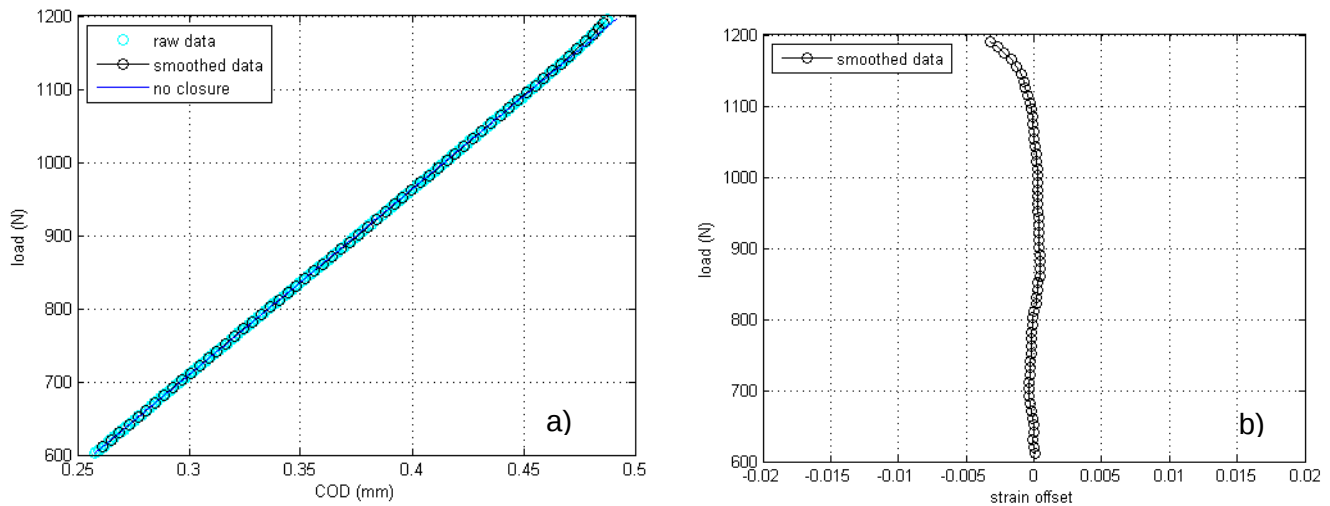


Figura 5.16. Cálculo de cierre de grieta (a) y OFFSET nulo para ensayo con $R=0.5$ (b)

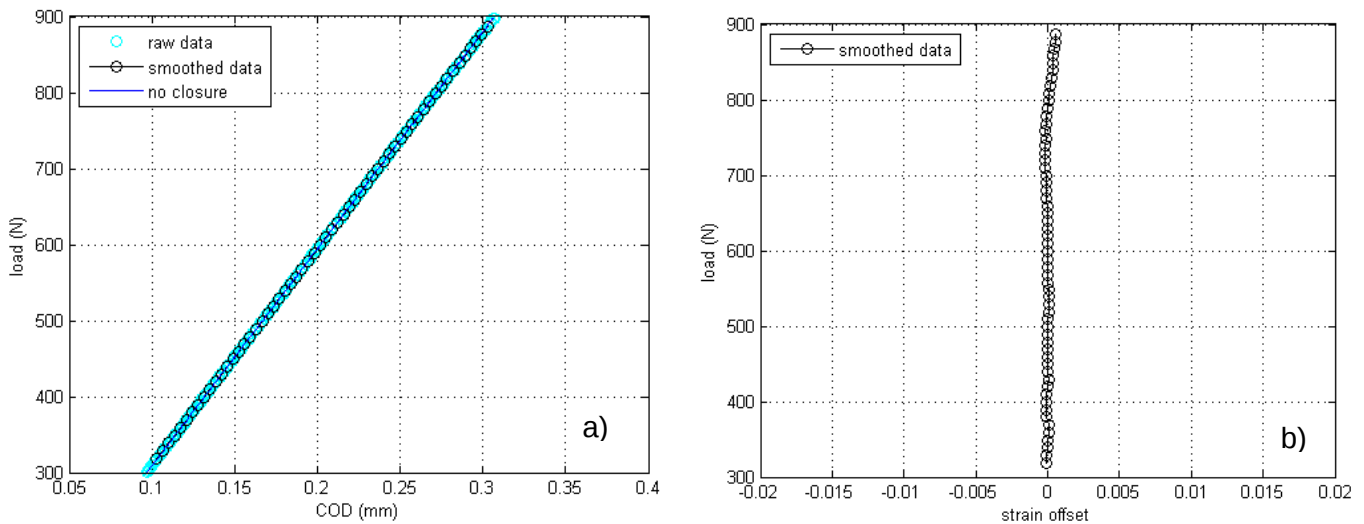


Figura 5.17. Cálculo de cierre de grieta (a) y OFFSET nulo para ensayo con $R=0.33$ (b)

Una vez obtenidos todas las fuerzas de apertura para todas las longitudes de grieta y en todos los ensayos a bajo R -ratio que es donde existe la fuerza de apertura P_{op} , se va a representar en la **Figura 5.18**. la fuerza de apertura con respecto a la longitud de grieta, obteniendo:

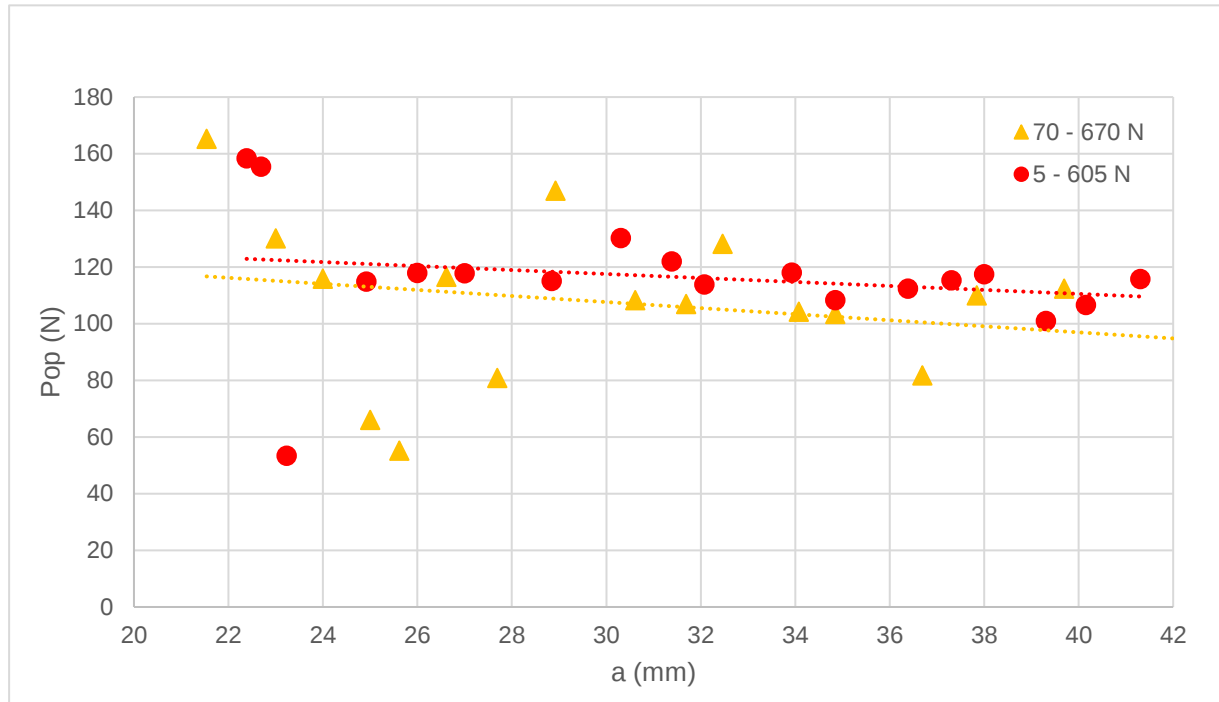


Figura 5.18. Fuerza de apertura P_{op} frente a la longitud de grieta

No se han representado los ensayos de $R=0.5$ y $R=0.33$ porque al ser el OFFSET nulo, la fuerza de apertura es nula, lo que quiere decir que la grieta se encuentra abierta durante todo el ciclo de carga aplicado sobre la probeta.

Si se separa cada ensayo en una gráfica individual se puede apreciar mejor. Además, se observa como en el ensayo con $R=0.1$, hay mayor ruido y los datos están un poco más dispersos que para el ensayo con $R=0$ en el que los datos están más compactados. (**Figura 5.19. Figura 5. 19. Fuerza de apertura P_{op} frente a longitud de grieta. $R= 0.1$ y Figura 5.20.)**

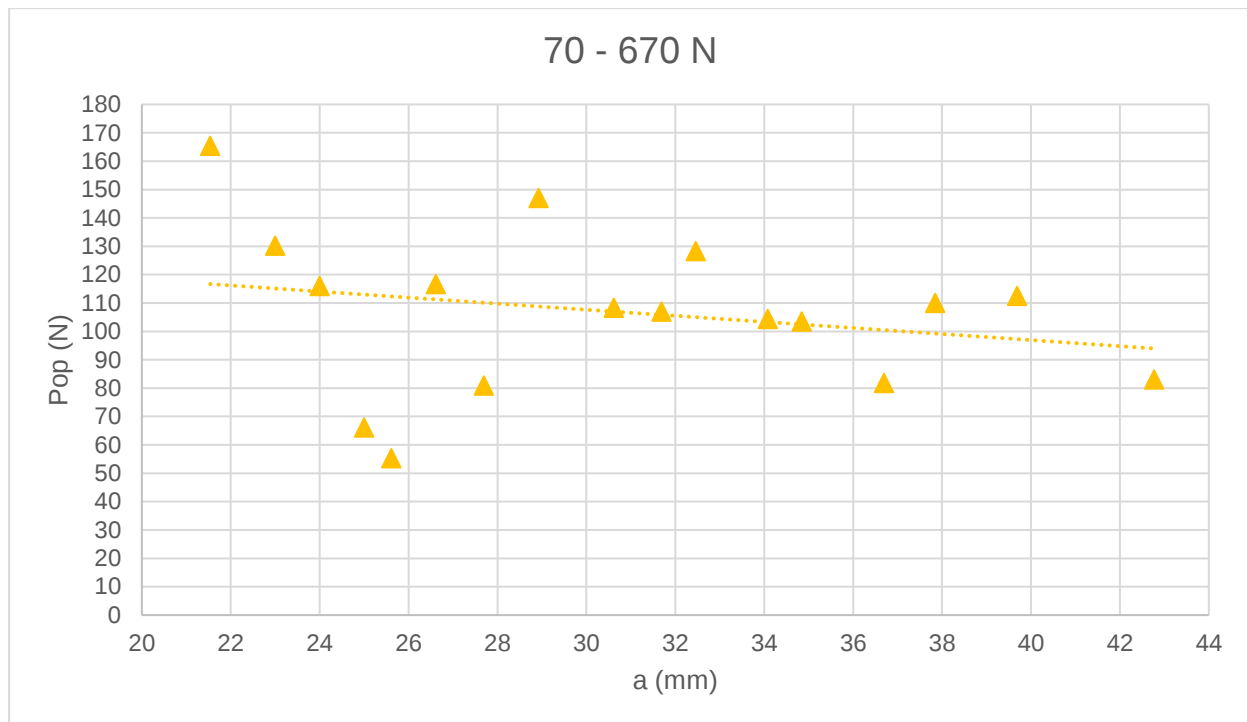


Figura 5. 19. Fuerza de apertura Pop frente a longitud de grieta. $R=0.1$

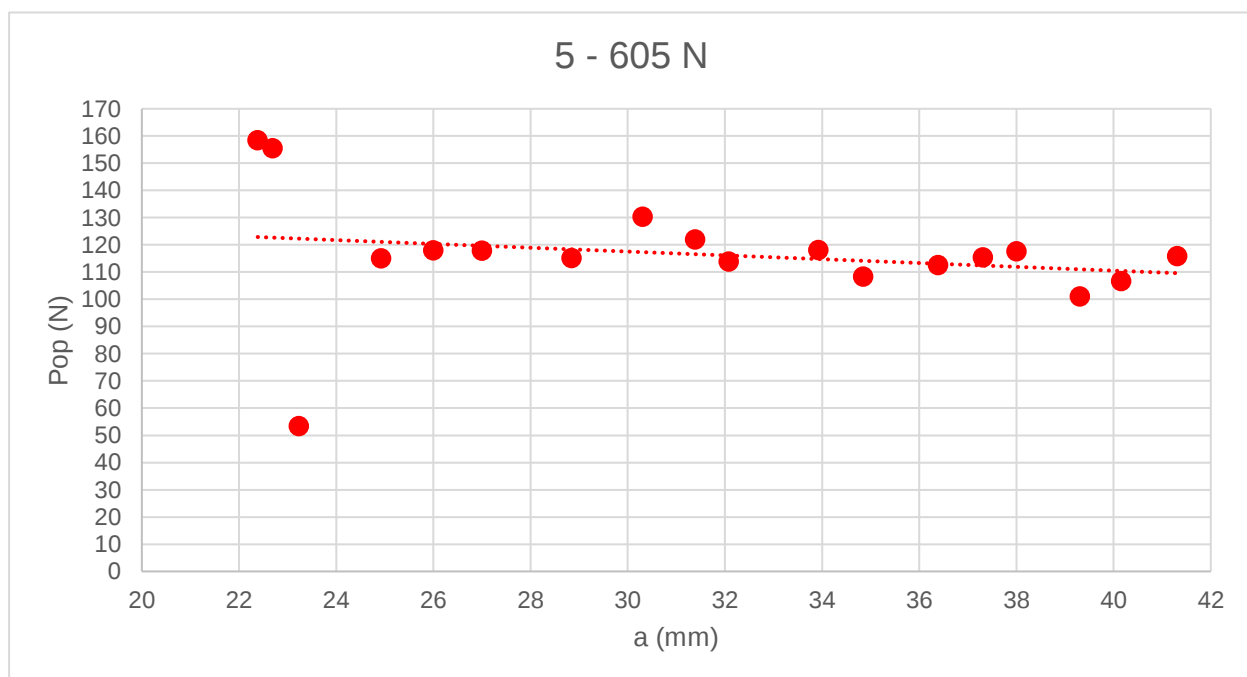


Figura 5. 20. Fuerza de apertura Pop frente a longitud de grieta. $R=0$

Haciendo una media para cada ensayo de la fuerza de apertura a las distintas longitudes de grieta se obtienen los siguientes resultados finales:

ENSAYO	CARGA DE APERTURA P_{op}
Entre 600 y 1200 N	NULA
Entre 300 y 900 N	NULA
Entre 70 y 670 N	106.81 N
Entre 5 y 605 N	116.36 N

Para comparar estos datos, se va a trabajar con Correlación de Imágenes, DIC, “Digital Image Correlation”, sacando el COD de los ensayos de $R=0$ (entre 5 y 605 N) y $R=0.1$ (entre 70 y 670 N) que son los ensayos donde en un momento la grieta se va a abrir y no en los otros 2 ensayos donde la grieta está siempre abierta.

El método DIC es una técnica óptica ampliamente aceptada y utilizada comúnmente como una herramienta potente y flexible para la medición de la deformación de una superficie en el campo de la mecánica de los sólidos experimentales.

Esta técnica proporciona directamente el campo completo de desplazamientos y deformaciones, comparando las imágenes digitales de la superficie no deformada de la muestra con los estados deformados.

Los pasos que se van a seguir son:

- 1) Abrir el programa Vic-2D 2009.
- 2) Pulsar en “Speckle images” y seleccionar todas las imágenes. El resultado se puede ver en la **Figura 5.21**.

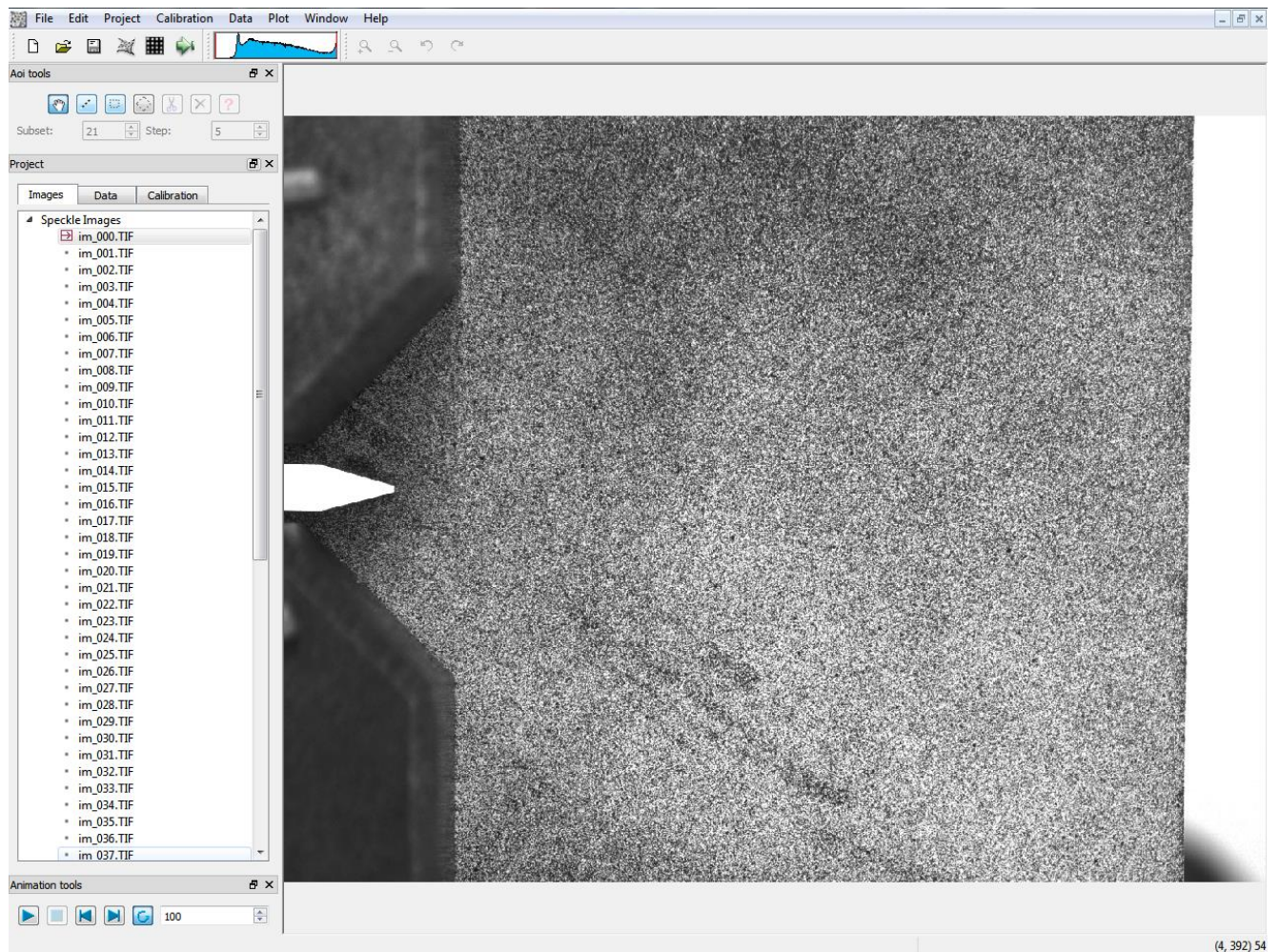


Figura 5.21. Vic-2D 2009

- 3) Seguidamente, hay que seleccionar la región de interés. En este caso, se va a seleccionar el contorno de la probeta como se aprecia en la **Figura 5.22**.

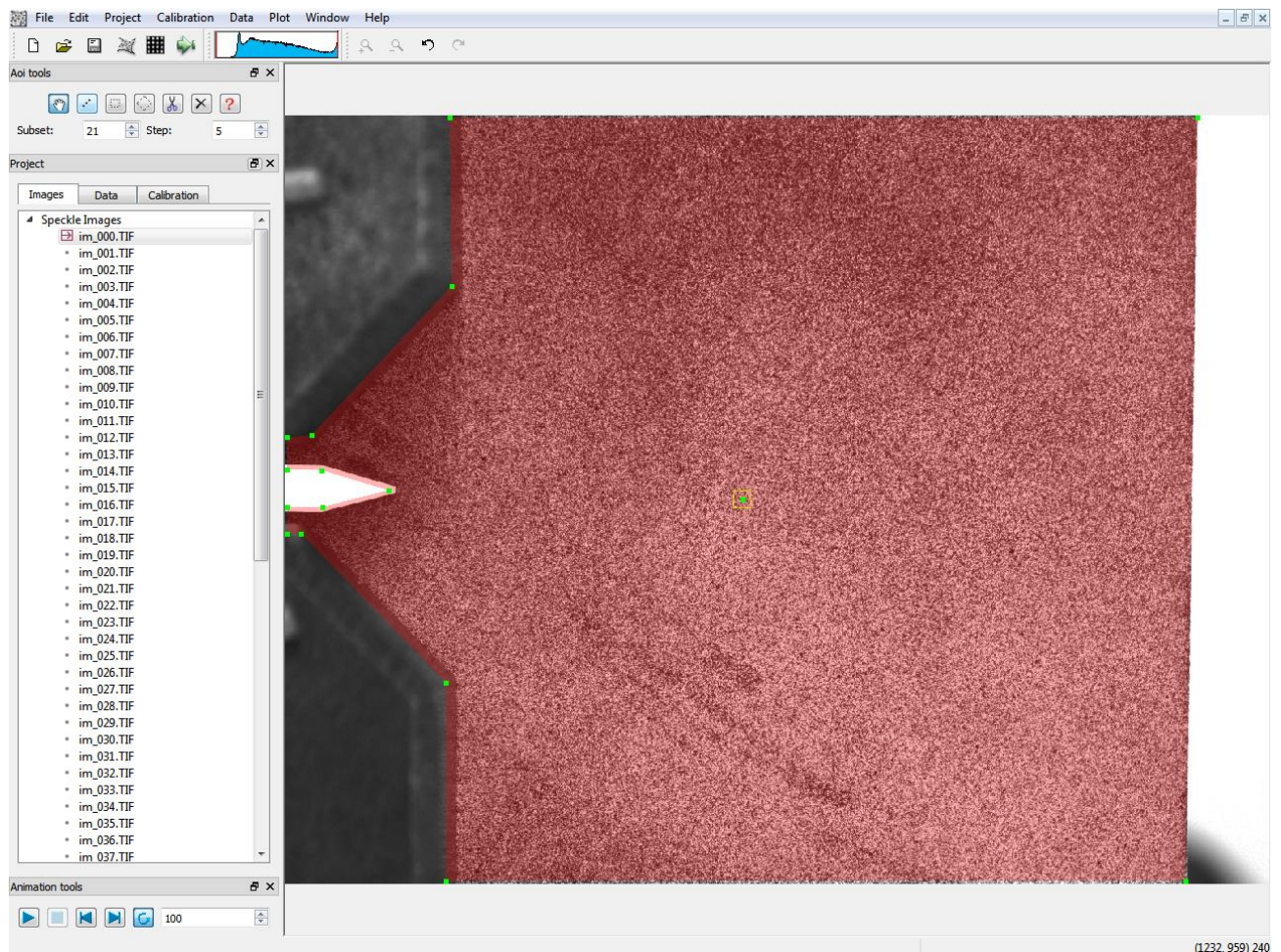


Figura 5.22. Selección de la región de interés

- 4) Seguidamente, se tiene que calibrar la imagen. Para ello en la barra de arriba hay que pulsar la pestaña de “Calibration” y pulsar “Calibration Scale”. Para ello se tiene que marcar con un segmento una distancia que se conozca cuánto mide en la realidad e introducir su valor en milímetros. En este caso se ha marcado el grosor de la entalla e introducido su valor (3 mm) como se puede ver en la **Figura 5.23**.

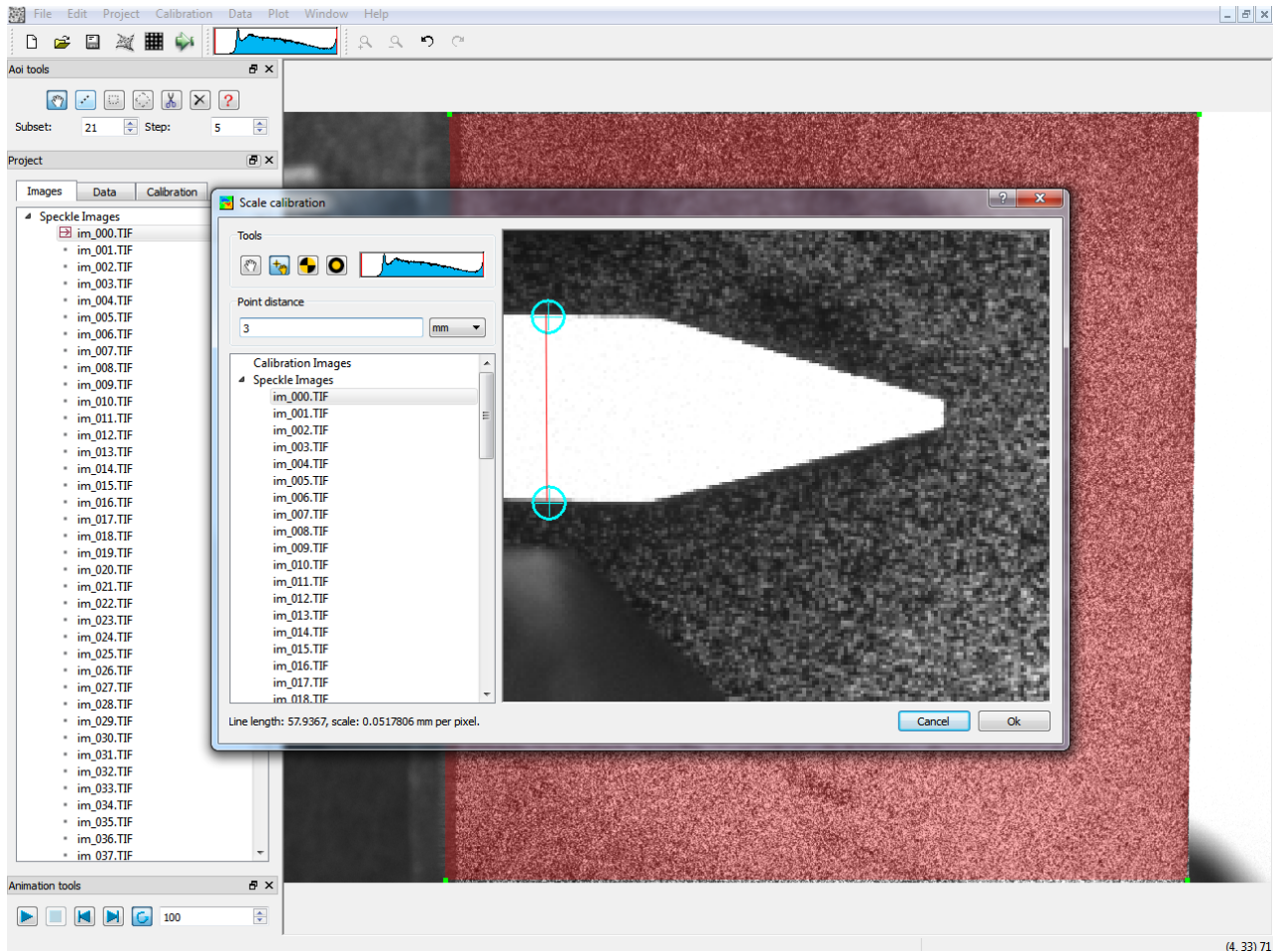


Figura 5.23. Calibración de la imagen

- 5) Se ejecuta el programa: Start Analysis.
- 6) Para obtener el desplazamiento, se pulsa la pestaña Data y después “Export Data” y el formato del archivo seleccionamos Matlab format v4. Entonces se genera un archivo Matlab y si se grafica el desplazamiento se obtiene el desplazamiento como en la **Figura 5.24. Campo de desplazamientos verticales en probeta CT** Así se observa que, como la mordaza inferior es fija y la superior es la móvil, el mayor desplazamiento se produce en la parte superior de la probeta.

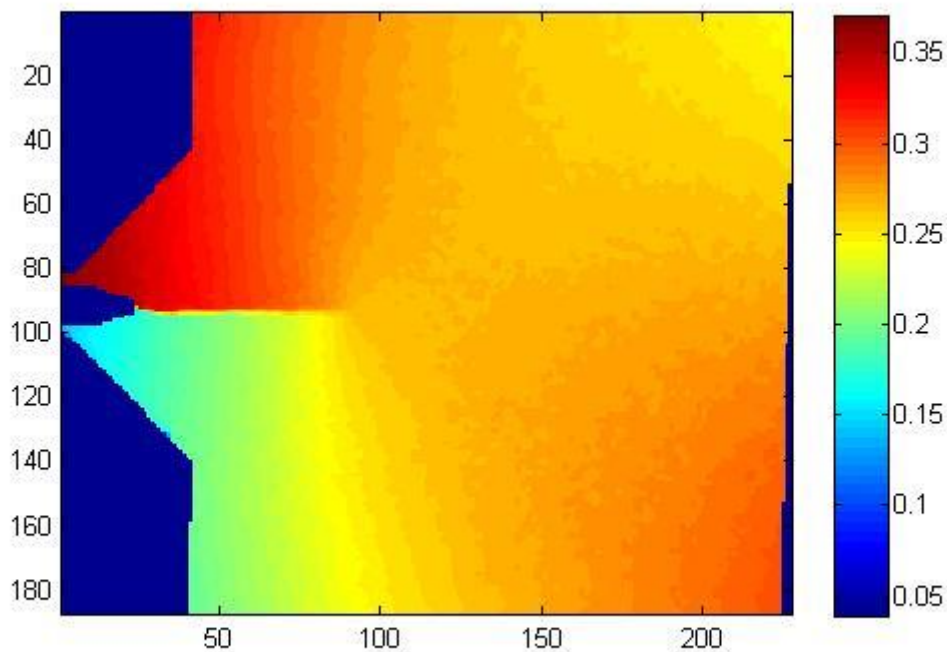


Figura 5.24. Campo de desplazamientos verticales en probeta CT

- 7) Por último, para obtener los datos de COD, se tiene que pulsar la opción de extensómetro y crear un extensómetro virtual a lo largo de la grieta y así obtener los datos de COD para toda la región de la grieta.

Una vez seguidos los pasos, si se abre el archivo generado con la obtención del COD, se obtendrá un archivo Excel como el de la **Figura 5.25**. Así, se aprecia como existe en una columna la fuerza y en todas las siguientes el COD desde la entalla hasta la punta de la grieta. En este trabajo, nos vamos a centrar en el COD en la punta de la entalla para obtener así la fuerza de apertura P_{op} por el método OFFSET explicado anteriormente.

195000 - Excel

Antonio Torres Expósito

Archivos Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista ¿Qué desea hacer? Compartir

Portapapeles Fuente Alineación Número Formato condicional Dar formato como tabla Estilos de celda Insertar Eliminar Formato Celdas Autosuma Rellenar Ordenar y filtrar Buscar y seleccionar Editar

Crack tip location:

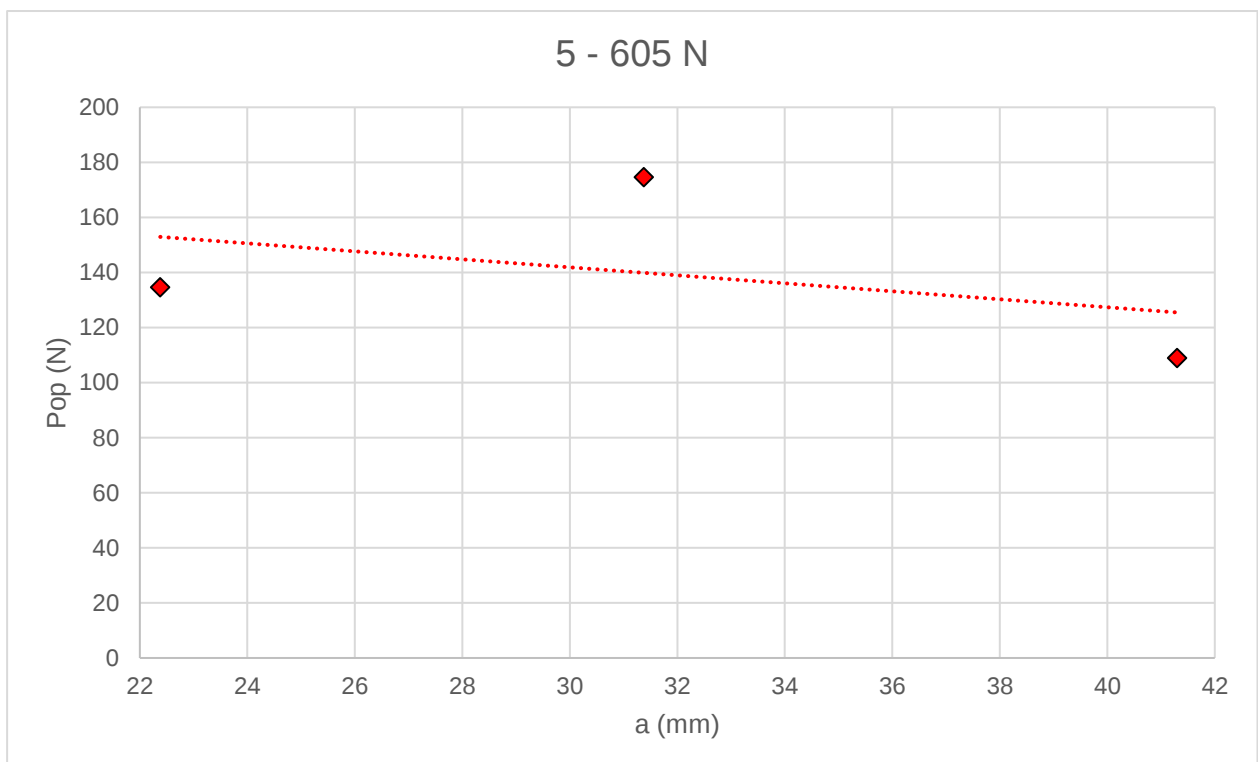
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Crack tip loc	363	496	crack tip ang	352,875	height:	30									
2																
3	Variable:		Fuerza axial	COD [pixel]												
4	Position [pixel]:	0	-225	-220	-215	-210	-205	-200	-195	-190	-185	-180	-175	-170	-165	
5	im_000,out	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	im_001,out	20	-0,0140777	-0,0153681	-0,0143793	-0,0088215	-0,00668953	-0,0113791	-0,0151503	-0,0134694	-0,00585397	0,00530177	0,0104716	0,004523	-0,00077909	0,00
7	im_002,out	30	-0,0140723	-0,0319737	-0,0433625	-0,0350438	-0,0207463	-0,0196732	-0,0261866	-0,0281181	-0,0156131	0,00441451	0,0139734	0,00476447	-0,00074984	0,0
8	im_003,out	40	-0,0135375	-0,0347919	-0,0438187	-0,0283095	-0,00817115	-0,00725114	-0,0178542	-0,0214593	-0,00926554	0,0155293	0,0230959	0,00716483	-0,00278418	0,0
9	im_004,out	50	-0,00165916	-0,0310974	-0,0463573	-0,0274392	-0,00131441	0,00236678	-0,00578419	-0,00953114	0,00209942	0,0209859	0,024755	0,0118077	0,00788522	0,0
10	im_005,out	60	0,0237024	-0,003246	-0,0185143	0,00090811	0,0227832	0,022827	0,0145679	0,0182246	0,0239171	0,0266435	0,0241945	0,0134559	0,013507	0,0
11	im_006,out	70	0,043631	0,0214905	0,00530633	0,0193977	0,0358341	0,0343627	0,0258558	0,0288959	0,0305502	0,0265079	0,0236184	0,0201648	0,0247447	0,0
12	im_007,out	80	0,0660392	0,0409853	0,0247497	0,0423954	0,0595033	0,0598747	0,0544881	0,055708	0,0495977	0,0379415	0,0306064	0,026223	0,0287712	0,0
13	im_008,out	90	0,0936833	0,0759187	0,0583337	0,0657976	0,0777052	0,0816512	0,0816678	0,0811702	0,0695517	0,0495905	0,0368837	0,0337985	0,0410968	0,0
14	im_009,out	100	0,117742	0,104452	0,0912248	0,100213	0,106927	0,104998	0,105213	0,104939	0,0859326	0,0568138	0,0440134	0,0502701	0,0612652	0,0
15	im_010,out	110	0,145727	0,141524	0,130948	0,13288	0,133676	0,133004	0,139251	0,141635	0,117896	0,0776957	0,0562976	0,0635904	0,0769982	0,0
16	im_011,out	120	0,164263	0,163686	0,151202	0,148343	0,14754	0,149041	0,156234	0,154512	0,127266	0,0863899	0,067573	0,0772379	0,0943674	0,0
17	im_012,out	130	0,187659	0,194121	0,186624	0,17963	0,169091	0,16807	0,176129	0,175971	0,14341	0,10028	0,0819377	0,101516	0,119301	0,0
18	im_013,out	140	0,20519	0,212431	0,207929	0,201082	0,190811	0,185393	0,186777	0,184254	0,156111	0,115318	0,0970627	0,115422	0,133713	0,0
19	im_014,out	150	0,217192	0,226836	0,222327	0,210893	0,202734	0,199536	0,200593	0,19191	0,158961	0,119134	0,1066	0,131751	0,147954	0,0
20	im_015,out	160	0,228191	0,236621	0,233291	0,223606	0,213623	0,208468	0,206822	0,198078	0,170575	0,138183	0,129236	0,149134	0,169585	0,0
21	im_016,out	170	0,246361	0,254692	0,250216	0,241744	0,232119	0,226721	0,222258	0,212076	0,188218	0,1579	0,150818	0,176746	0,191811	0,0
22	im_017,out	180	0,259526	0,264319	0,256723	0,249204	0,241401	0,232118	0,220934	0,209812	0,19149	0,168782	0,166533	0,193554	0,20603	0,0
23	im_018,out	190	0,267876	0,271871	0,263189	0,252974	0,247667	0,23822	0,223571	0,21215	0,200703	0,18861	0,197834	0,222178	0,226549	0,0

195000

Listo

Figura 5.25. Archivo Excel obtención COD por método DIC

Los resultados obtenidos son:

Figura 5.26. Cálculo de la fuerza de apertura Pop mediante DIC ($R = 0$)

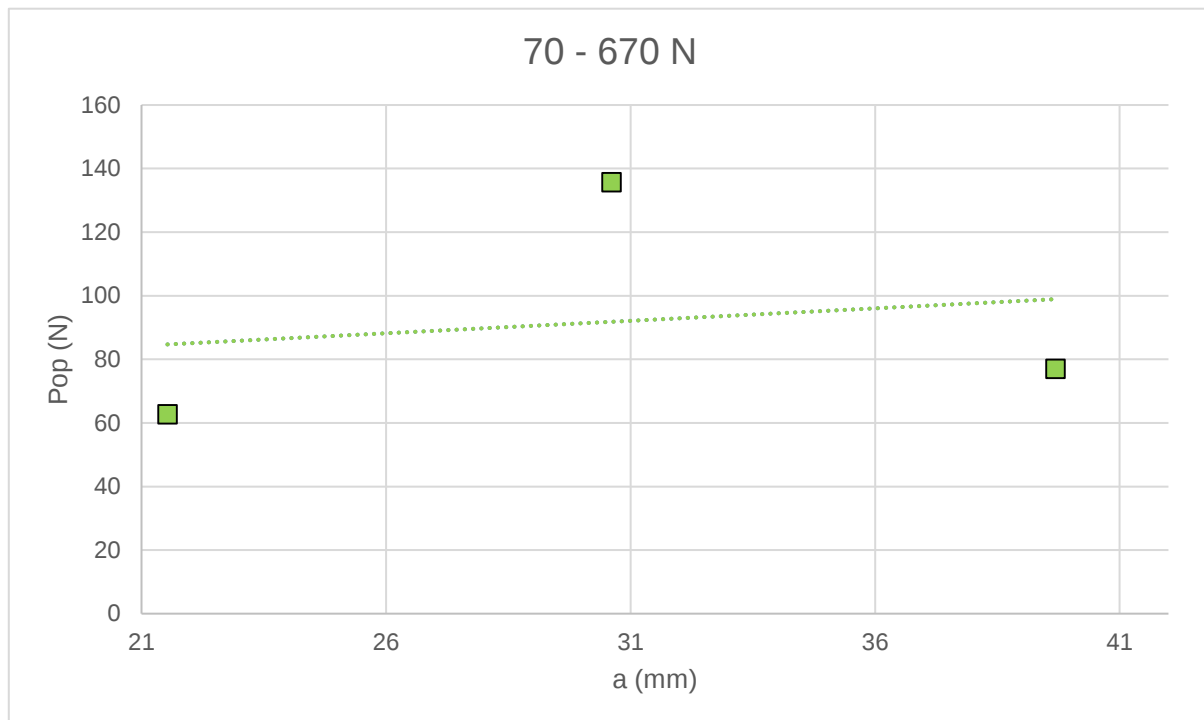


Figura 5.27. Cálculo de la fuerza de apertura P_{op} mediante DIC ($R=0.1$)

Si se realiza una media de la fuerza de apertura P_{op} a los 2 ensayos:

ENSAYO	FUERZA DE APERTURA P_{op}	
	EXTENSÓMETRO	DIC
Entre 70 y 670 N ($R=0.1$)	106.81 N	91.80 N
Entre 5 y 605 N ($R=0$)	116.36 N	139.44 N

Así se observa como en el ensayo $R=0.1$ la fuerza de apertura calculada por DIC es de 91.80 N que difiere en 15 N con la fuerza de apertura calculada con el extensómetro.

En el ensayo de $R=0$, la fuerza calculada por DIC es de 139.44 N y difiere en unos 23 N con la fuerza de apertura calculada por el extensómetro.

5.4. Ley de Paris Efectiva

Tras realizar el análisis anterior en el que se ha obtenido la fuerza de apertura en los ensayos de fatiga estudiados se puede ver como:

- En el ensayo entre 600 y 1200 N, la fuerza de apertura P_{op} obtenida es nula lo que quiere decir que la grieta se encuentra abierta durante todo el ensayo, por lo que la Ley de Paris Efectiva coincide con la Ley de Paris Nominal (**Figura 5.28.**).

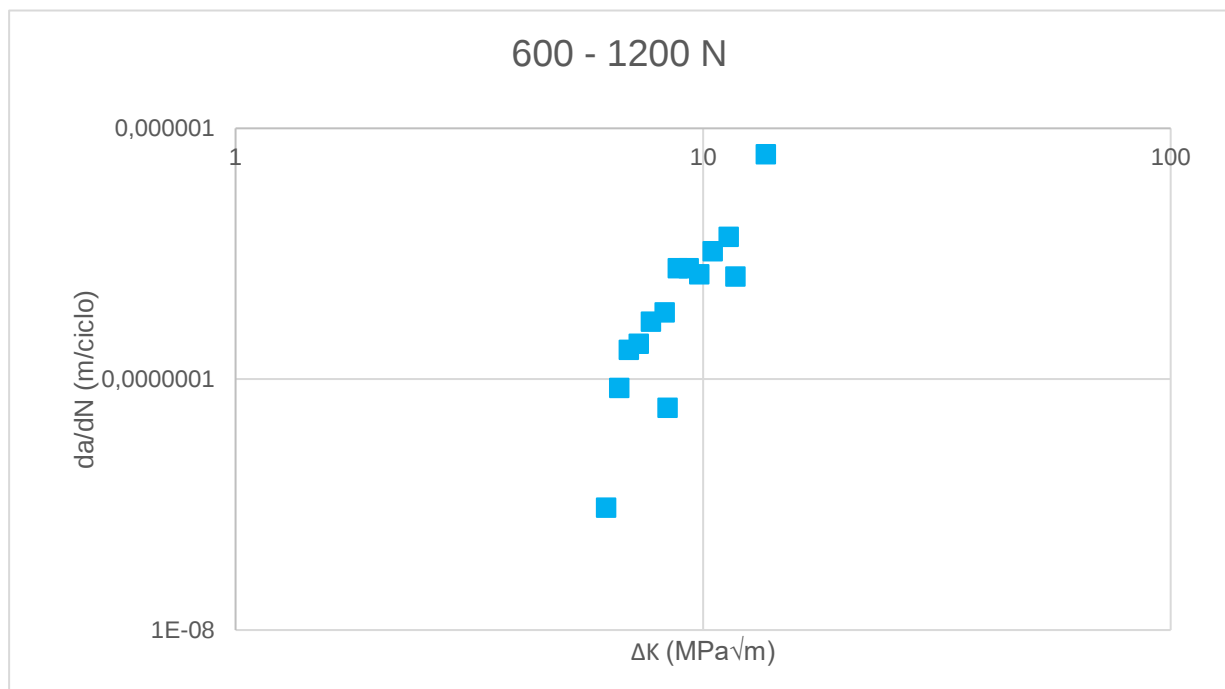


Figura 5.28. Ley de Paris efectiva para ensayo de $R= 0.5$

- En el ensayo entre 300 y 900 N ocurre exactamente lo mismo que en el ensayo entre 600 y 1200 N (la fuerza de apertura P_{op} es nula). Así, la grieta está permanentemente abierta durante el ensayo, por lo que la Ley de Paris Efectiva coincide con la Ley de Paris Nominal (**Figura 5.29.**).

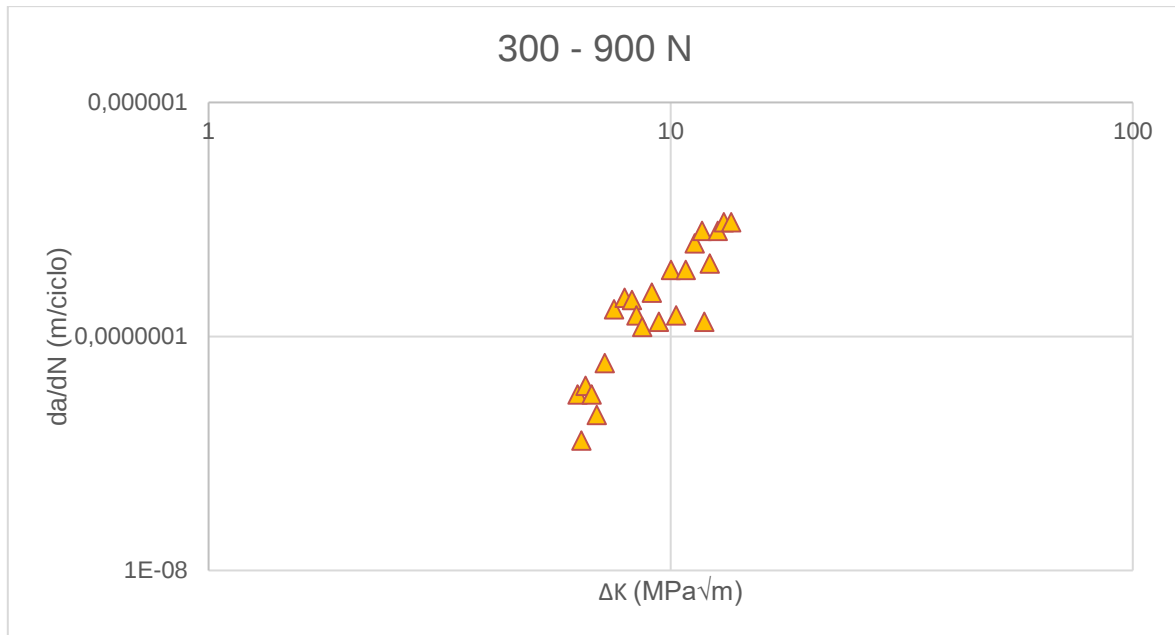


Figura 5.29. Ley de Paris efectiva para ensayo de $R=0.33$

- Sin embargo, en el ensayo entre 70 y 670 N y en el ensayo entre 5 y 605 N no ocurre esto. Como las fuerzas de apertura son 106,81 N y 116,36 N respectivamente y estas están dentro del rango de fuerzas utilizadas para cada ensayo, la Ley de Paris Efectiva y la Ley de Paris Nominal no coinciden.
 - **Ensayo entre 70 y 670 N:** Podemos ver en la **Figura 5.30.**, la Ley de Paris Efectiva y en la **Figura 5.31. Figura 5.31. Comparación entre la ley de Paris nominal y efectiva. $R=0.1$** vamos a comparar la Ley de Paris Efectiva con la Ley de Paris Nominal:

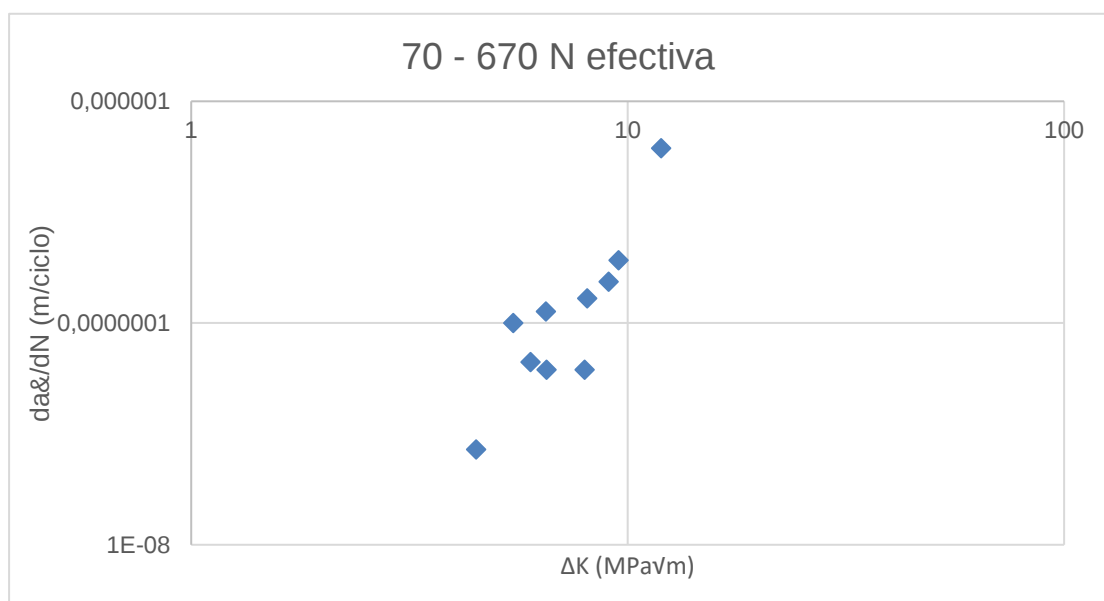


Figura 5.30. Ley de Paris efectiva para ensayo de $R=0.1$

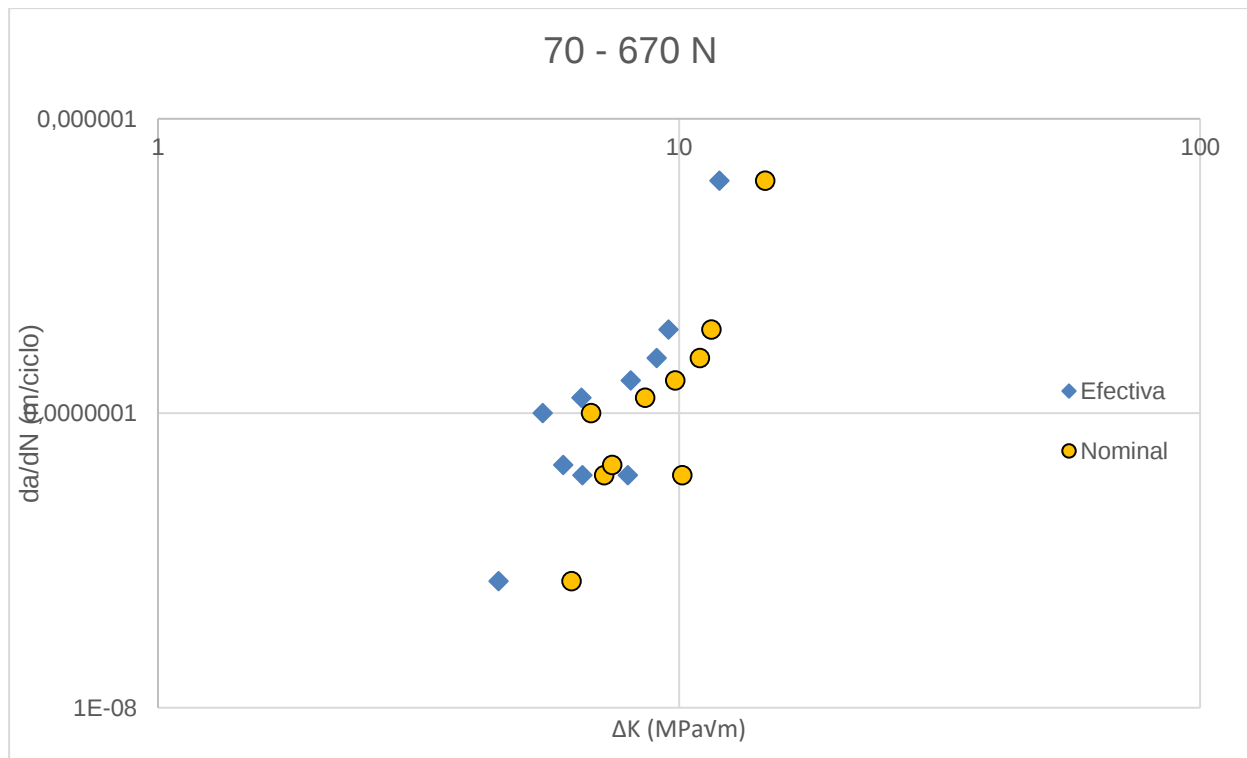


Figura 5.31. Comparación entre la ley de Paris nominal y efectiva. $R = 0.1$

- **Ensayo entre 5 y 605 N:** Vamos a visualizar en la **Figura 5.32.** y en la **Figura 5.33.** exactamente lo que en el ensayo anterior:

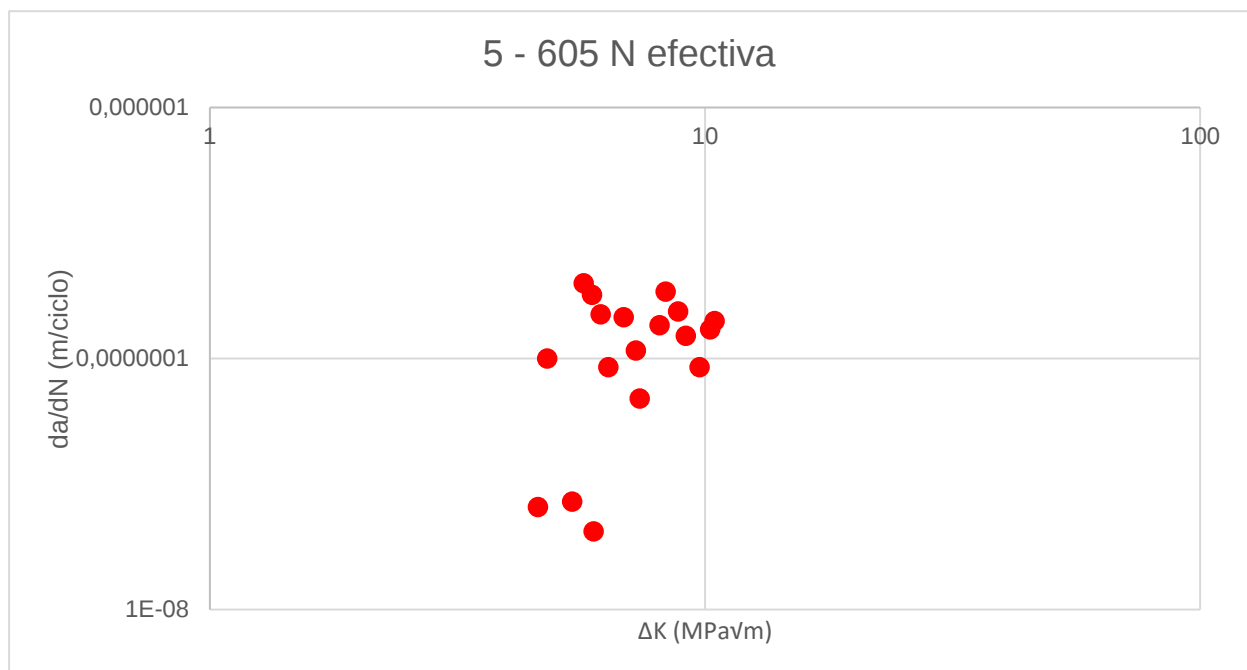


Figura 5.32. Ley de Paris efectiva para ensayo de $R = 0$

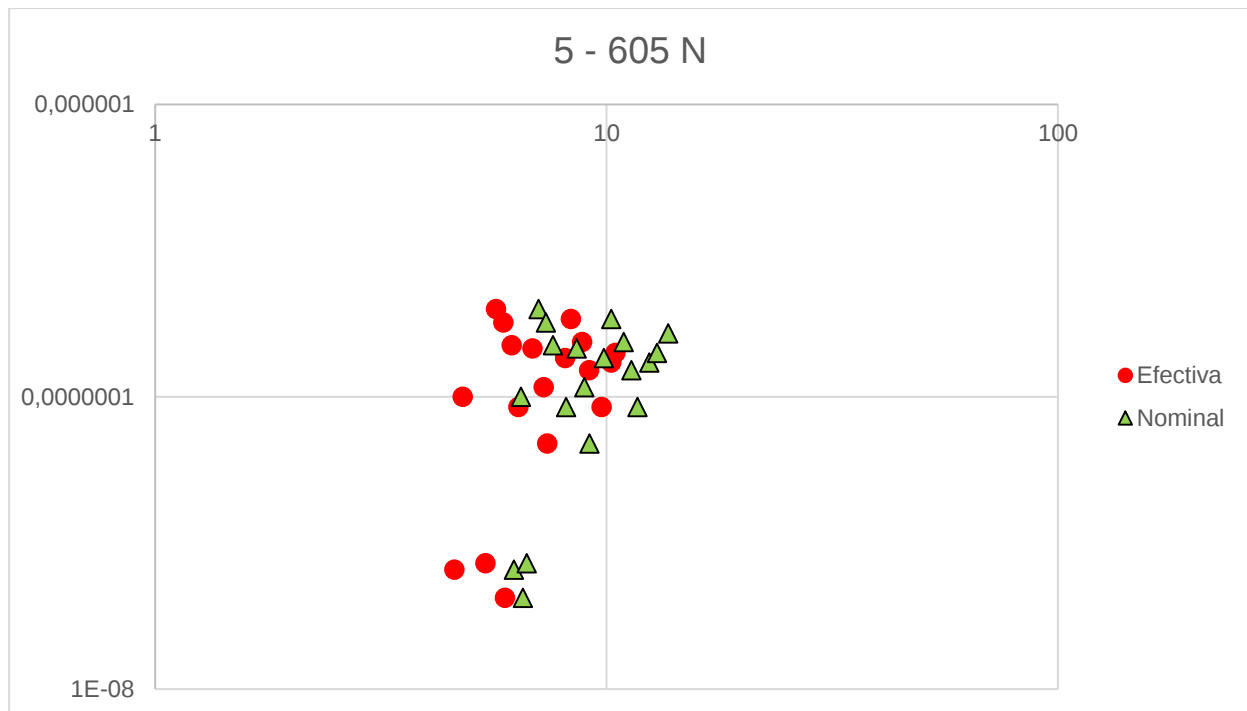


Figura 5.33. Comparación entre la ley de Paris nominal y efectiva. $R=0$

Se aprecia como en ambos ensayos, la ley de Paris nominal y la ley de Paris efectiva son muy similares. Lo único que varía es que la ley de Paris efectiva está un poco desplazada a la izquierda con lo respecto a la ley de Paris nominal.

6. Conclusiones

Una vez realizado el estudio del crecimiento de grieta a fatiga en probetas entalladas se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1) Ensayo monotónico de tracción:

- a) Es de gran importancia la dirección de laminado en el cual se corten las probetas porque las propiedades mecánicas varían tal y como se ha comprobado en el punto 3 de este trabajo.
- b) El módulo de Young y la deformación final son independientes de la dirección de laminado, obteniendo en los 2 casos resultados prácticamente iguales (en torno a 72000 MPa y 0.13 respectivamente).
- c) Además, los valores del módulo de Poisson, límite elástico, tensión máxima, tensión de rotura y deformación final sí difieren y tienen valores mayores en el caso de la dirección de laminado longitudinal (conociendo dirección de laminado longitudinal como la dirección paralela a la realización del ensayo de tracción).
- d) Por lo tanto, las probetas cortadas con dirección longitudinal:
 - Tienen mayor módulo de Poisson: lo que quiere decir que sufren mayor deformación transversal.
 - Tienen mayor límite elástico: Por lo que pueden recuperar totalmente su forma al estar sometidos a valores de tensión por debajo de este límite.
 - Tienen más resistencia a la rotura: necesitan estar sometidas a un esfuerzo mayor para romperse.

2) Respecto al ensayo de fatiga:

- a) Se observa cómo no importa entre que tensiones se realice el ensayo para ver que la grieta sigue una trayectoria casi rectilínea, tal y como vemos en la **Figura 6.1**.



Figura 6.1. Trayectoria de la grieta

- b) Tal y como se aprecia en la **Figura 5.3**. *Figura 5.3. Gráfica normalizada de la longitud de grieta frente al número de ciclos* la que representamos la longitud de grieta “a” frente al número de ciclos “N” aplicados a la probeta se puede decir que a altos coeficientes de tensiones “R-ratio” la grieta crece más rápidamente y necesita de menos ciclos para alcanzar una longitud establecida.
- c) Representando la ley de Paris para un mismo tipo de probeta, el rango de ΔK depende del rango de las tensiones que se utilicen en el ensayo ΔP .
- d) Si se sigue hablando de la ley de Paris, se observa cómo es difícil conseguir representar la región 1 (donde prácticamente no crece la grieta) y la región 3 (donde el crecimiento de la grieta es inestable). Sin embargo, se ve como se ha conseguido representar la región 2 donde el crecimiento de la grieta es estable.

- e) Por otro lado, se ha llegado a la conclusión de que, a altos R , no existe cierre de grieta y por lo tanto la grieta permanece abierta en todo el ciclo de carga aplicado. Esto no ocurre cuando se ensaya a bajos R , en el que cuando comienza el ensayo la grieta está cerrada y cuando se llega a la fuerza de apertura P_{op} la grieta se abre.
- f) También se percibe como la fuerza de apertura aproximadamente se mantiene constante a medida que va creciendo la grieta (**Figura 5.18.**)
- g) Se ha estudiado también como la fuerza de apertura calculada por el extensómetro y por el método DIC difieren como mucho en 20 N, por lo que los resultados pueden considerarse validados.
- h) Además, como la ley de Paris representa la variación de la longitud de grieta con respecto a la variación del número de ciclos (da/dN) con respecto ΔK , y da/dN es la misma en la ley de Paris nominal que en la ley de Paris efectiva, entonces varía ΔK . Como ΔK depende de las dimensiones de la probeta y de ΔP , como la probeta es la misma, lo que hace que se diferencie $\Delta K_{nominal}$ de $\Delta K_{efectiva}$ es el ΔP . Como a bajos R , el ensayo efectivo varía entre la fuerza de apertura y la fuerza máxima, esto hace que el rango de ΔK varíe. En definitiva, lo indicado anteriormente, supone que hay un retardo en el crecimiento de grieta a fatiga ya que el $\Delta K_{efectivo}$ es menor que el $\Delta K_{nominal}$. Este retardo supone que la vida a fatiga del material se prolongue, lo cual puede ser importante desde un punto de vista industrial y de durabilidad de los componentes mecánicos.
- i) Finalmente, es de vital importancia, realizar el ensayo de fatiga sin aplicarle sobrecargas (es decir, cargas superiores a la carga máxima del ensayo) debido a que esto genera una gran plasticidad en el vértice de la grieta y esta plasticidad impide que la grieta siga creciendo. Prueba de

ello ha sucedido en este estudio. En un ensayo entre 70 y 670 N ($R=0.1$), la grieta creció 5 mm en 95000 ciclos, y en ese instante se cometió un fallo con la máquina servohidráulica y se sometió a la probeta a una sobrecarga. Se continuó con el ensayo para ver cuál era la respuesta de la grieta y se ciclo hasta 300000 ciclos, comprobando que la grieta continuaba en 5 mm.

7. Trabajo futuro

Como líneas de trabajo futuras, se pueden establecer las siguientes:

1. Ampliación del estudio analizando los campos de desplazamientos para determinar los factores de intensidad de tensiones, y a partir de su análisis, observar si el fenómeno de cierre de grieta puede ser estudiado mediante esta metodología.
2. Estudio de distintos materiales para ver su influencia en el crecimiento de grieta a fatiga.
3. Estudio manteniendo la misma carga máxima e ir disminuyendo la carga mínima para evaluar distintos valores de *R-ratio*.
4. Estudio del mismo material a fatiga de bajo ciclo. Para ello se ha de adquirir un extensómetro para este tipo de ensayos, ya que los mismos han de ser controlados en deformación.
5. Como alternativa, se podría estudiar el empleo del video-extensómetro aportado por DIC para controlar mediante deformación los ensayos. Sin

embargo, esto supone un importante reto ya que este tipo de control no resulta fácil de implementar.

8. Referencias

- [1] Albert, W.A.J. (1938) Arch. Miner. Geognosie Berg. Huttenkunde 10,215.
- [2] Wohler, A. (1871) "Test to Determine the Forces Acting on Railway Carriage Axles and the Capacity of Resistance of the Axles" Engineering 11, 199.
- [3] Soderberg, C.R. (1930) "Factor of Safety and Working Stress" Trans. ASTM, 52 (2).
- [4] Soderberg, C.R. (1935) "Working Stresses" Trans. ASTM 57, A 106.
- [5] Gerber W. (1874) "Bestimmung der Zulässigen Spannungen in Eisen Constructionen" Z. Bayer Arch. Ing. Ver. 6.
- [6] Goodman, J. (1930) "Mechanics Applied to Engineering" Vol.1, 9ª Edición.
- [7] Manson, S.S. (1965) "Fatigue: A Complex Subject-Some Simple Approximations". Expt. Mechanics, 5 (7),193.
- [8] Manson, S.S. (1966) "Thermal Stress and Low Cycle Fatigue". McGraw-Hill, New York.
- [9] Miller, K.J. y Zachariah, K.P. (1977). Cumulative Damage Laws for Fatigue Crack Initiation and Stage I Propagation. Journal of Strain Analysis, Vol. 12, Nº 4.
- [10] Griffith, A.A. (1921). The phenomenon of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 45, 251-66.
- [11] Inglis, C.E. (1913). Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *Transactions of the Institute of Naval Architects* 55, 219-41.
- [12] Orowan, E. (1952). Fundamentals of brittle behavior of metals. In *Fatigue and Fracture of Metals* (ed. W. M. Murray), pp. 139-67. New York: Wiley.
- [13] Peters, W. H. and W. F. Rason, *Digital imaging techniques in experimental stress analysis*. Optical engineering, 1982. **21**(3): p. 213427-213427-.

- [14] Peters, W. H., et al., *Application of digital correlation methods to rigid body mechanics*. Optical Engineering, 1983. **22**(6): p. 226738-226738-.
- [15] Sutton, M. A., et al., *Determination of displacements using an improved digital correlation method*. Image and Vision Computing, 1983. **1**(3): p. 133.
- [16] Riddell, W. T., et al., *Determining fatigue crack opening loads from near-crack-tip displacement measurements*. ASTM STP – 1343, 1999: p. 157.
- [17] Sutton, M. A., et al., *Local crack closure measurements: Development of a measurement system using computer vision and a far-field microscope*. ASTM STP – 1343, 1999: p. 145.
- [18] Carroll, J., et al., *Investigation of fatigue crack closure using multiscale image correlation experiments*. Engineering Fracture Mechanics, 2009. **76**(15): p. 2384.
- [19] Pataky, G. J., H. Sehitoglu, and H. J. Maier, *High temperatura of fatigue crack growth of Haynes 230*. Materials Characterization, 2012.
- [20] Pataky, G. J., et al., *Full field measurements of anisotropic stress intensity factor ranges in fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2012. **94**: p. 13-28.
- [21] Rabbolini, S., et al., *Short crack propagation in LCF regime at room and high temperatura in Q & T rotor steels*. International Journal of Fatigue, 2015. **75**: p.10-18.
- [22] ASTM B 209 – 00 “Standard Specification for Aluminium and Aluminium - Alloy Sheet and Plate”.
- [23] ASTM E 8M – b00 “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”.
- [24] ASTM E 647 – 00 “Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates”
- [25] Elber, W. (1970). Fatigue crack closure under cyclic tensión. *Engineering Fracture Mechanics* 2, 37-45.

9. ANEXO I: GRÁFICAS DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

9.1. DIRECCIÓN DE LAMINADO LONGITUDINAL

9.1.1. Velocidad de 0.2 mm/min

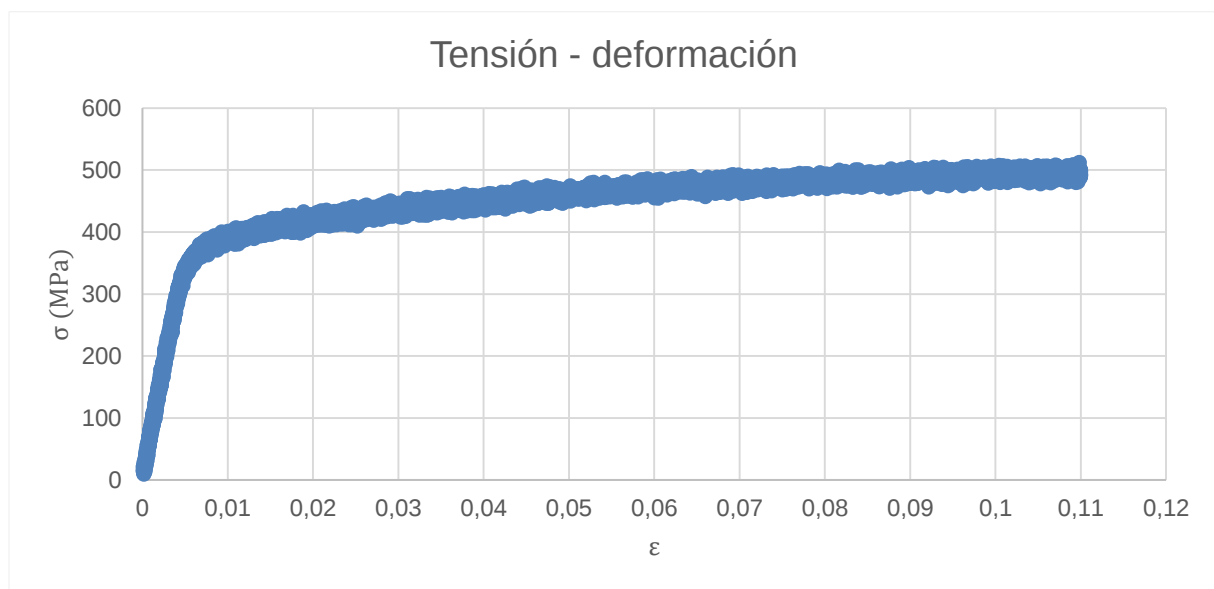


Figura 9.1. Gráfica tensión - deformación para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.2 mm/min

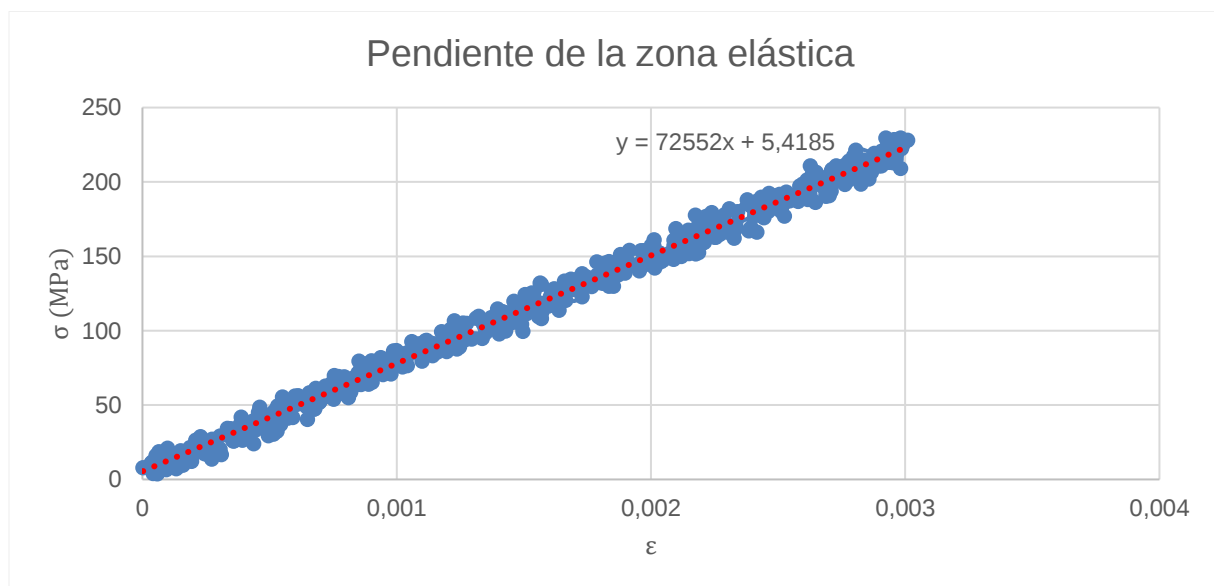


Figura 9.2. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.2 mm/min

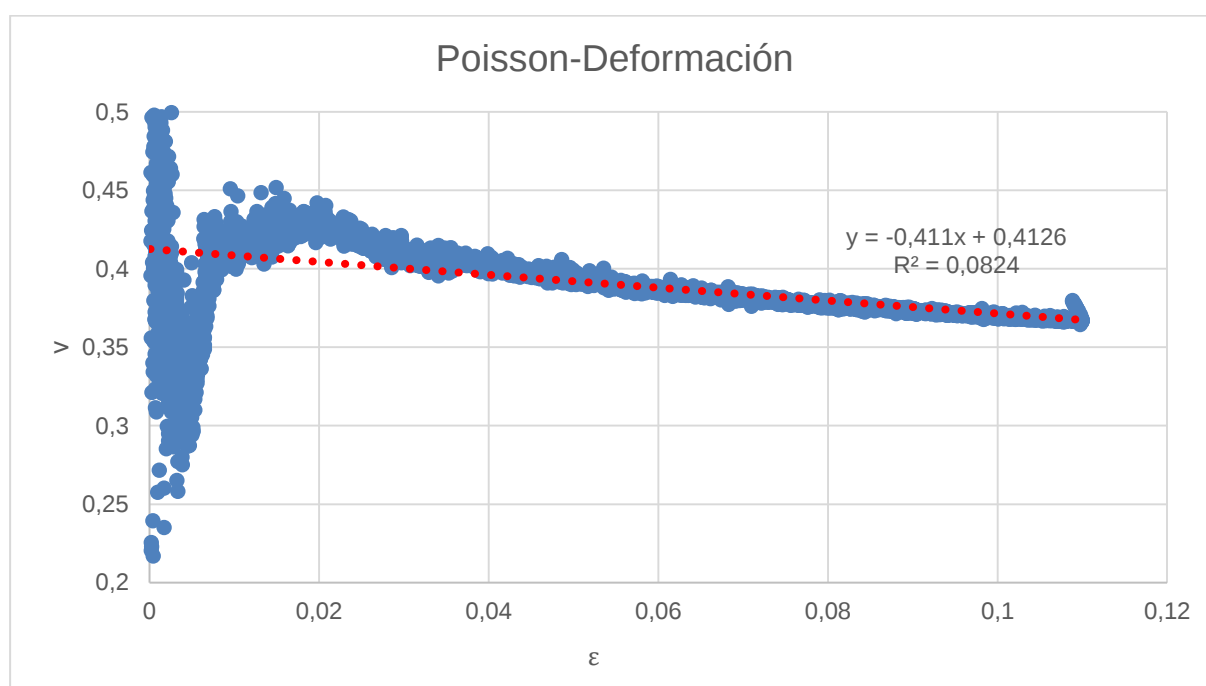


Figura 9.3. Evolución del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.2 mm/min

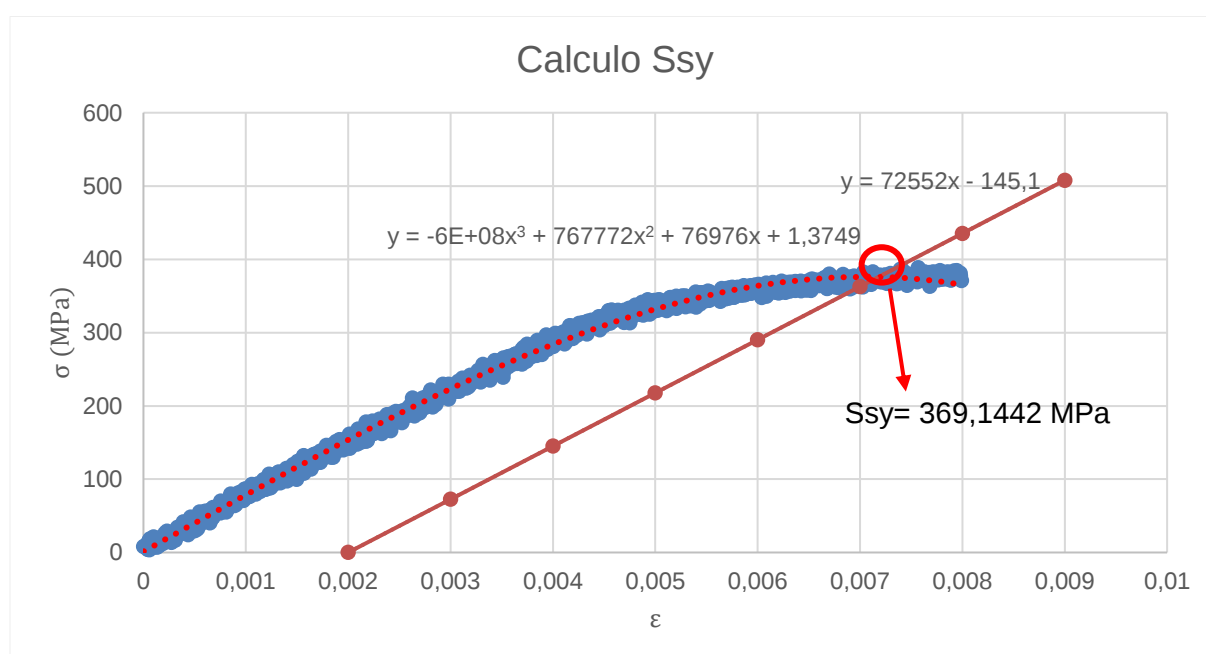


Figura 9.4. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.2 mm/min

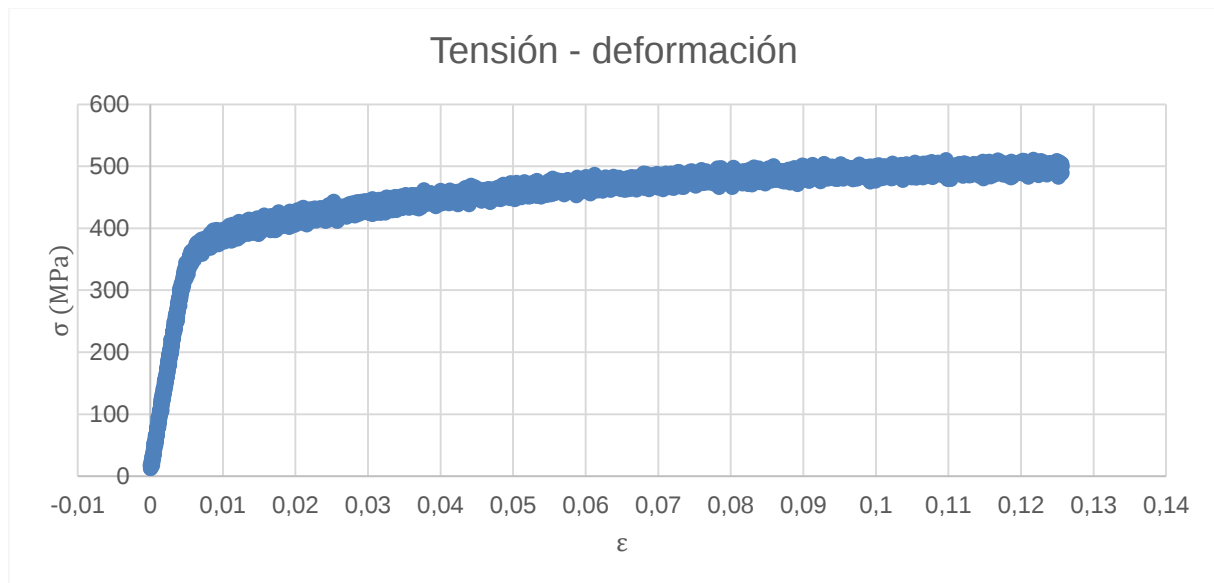
9.1.2. Velocidad de 0.3 mm/min 

Figura 9.5. Gráfica tensión - deformación para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.3 mm/min

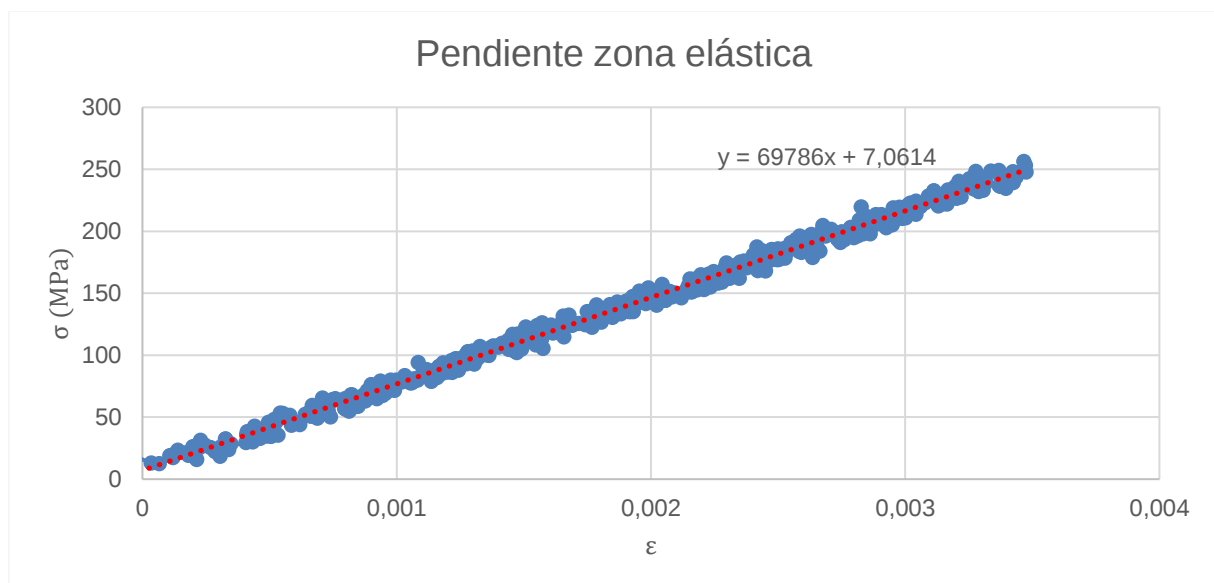


Figura 9.6. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.3 mm/min

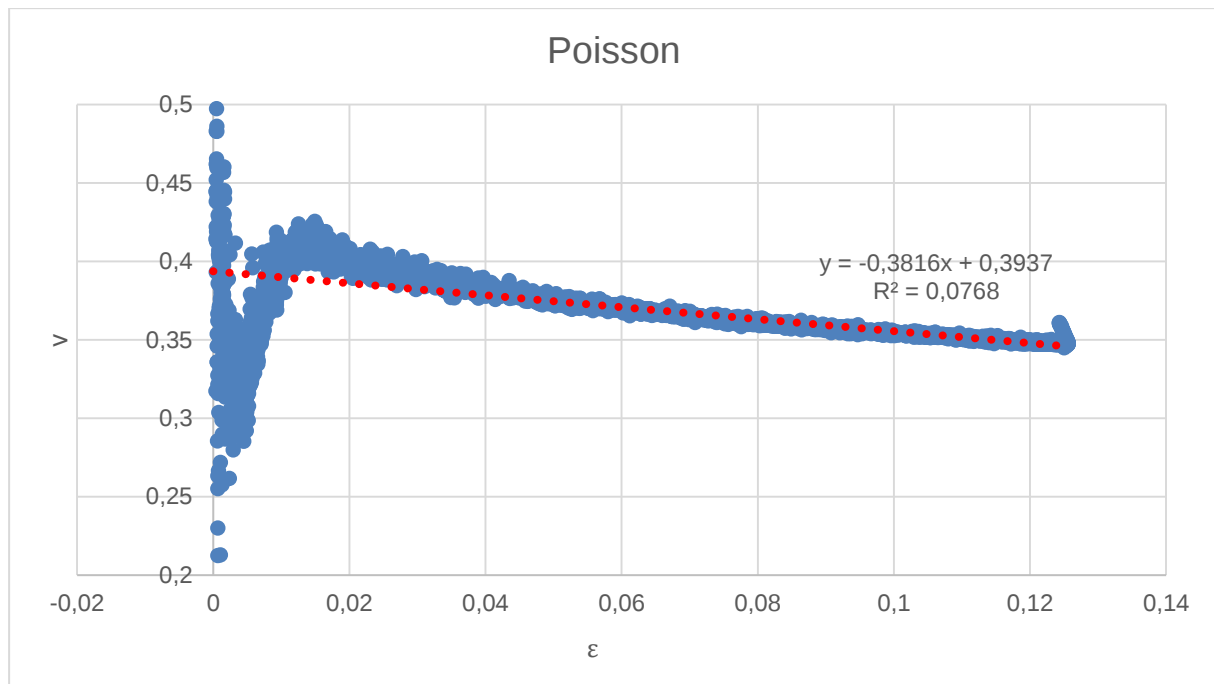


Figura 9.7. Evolución del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.3 mm/min

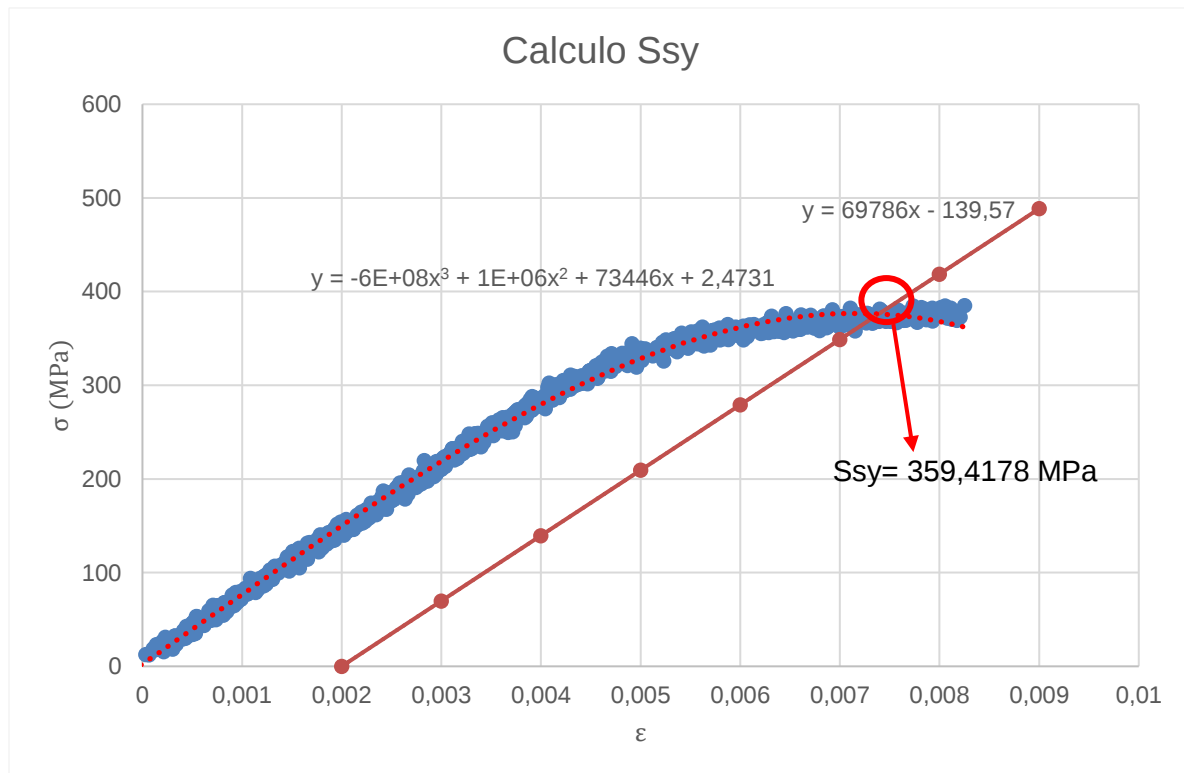


Figura 9.8. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.3 mm/min

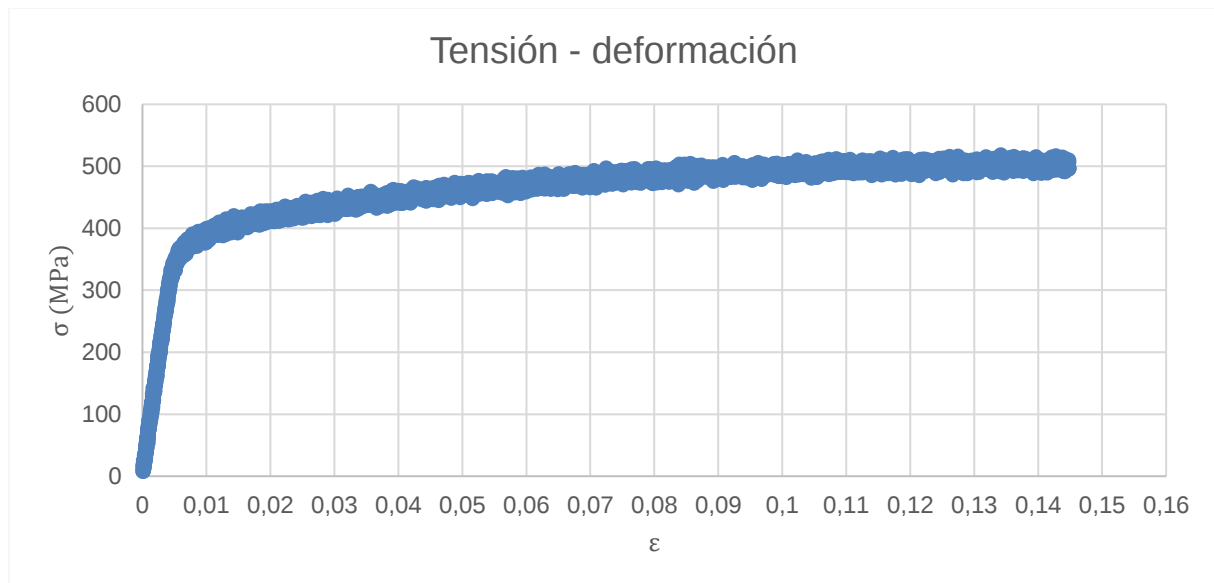
9.1.3. Velocidad de 0.4 mm/min 

Figura 9.9. Gráfica tensión - deformación para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.4 mm/min

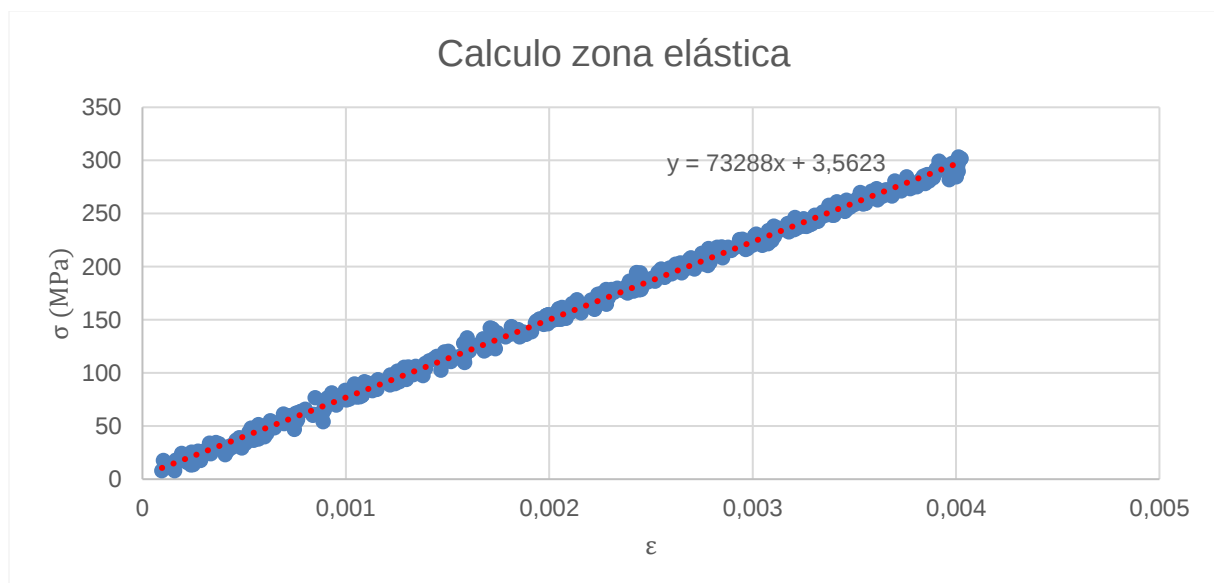


Figura 9.10. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.4 mm/min

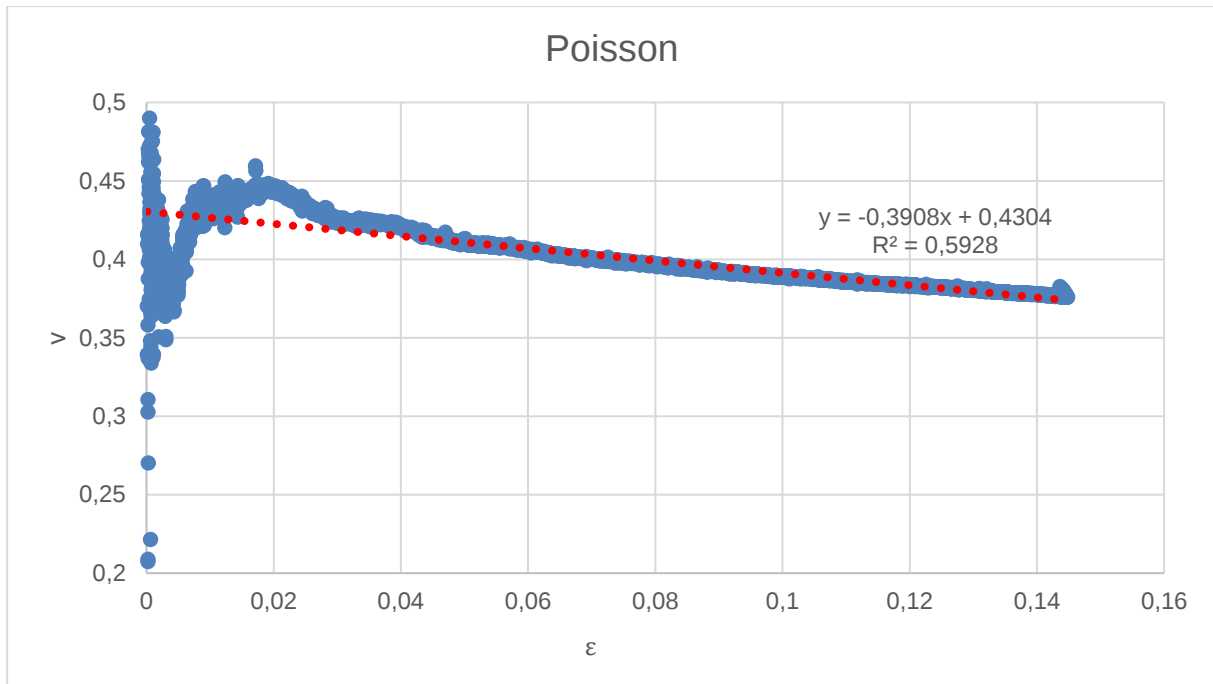


Figura 9.11. Evolución del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.4 mm/min

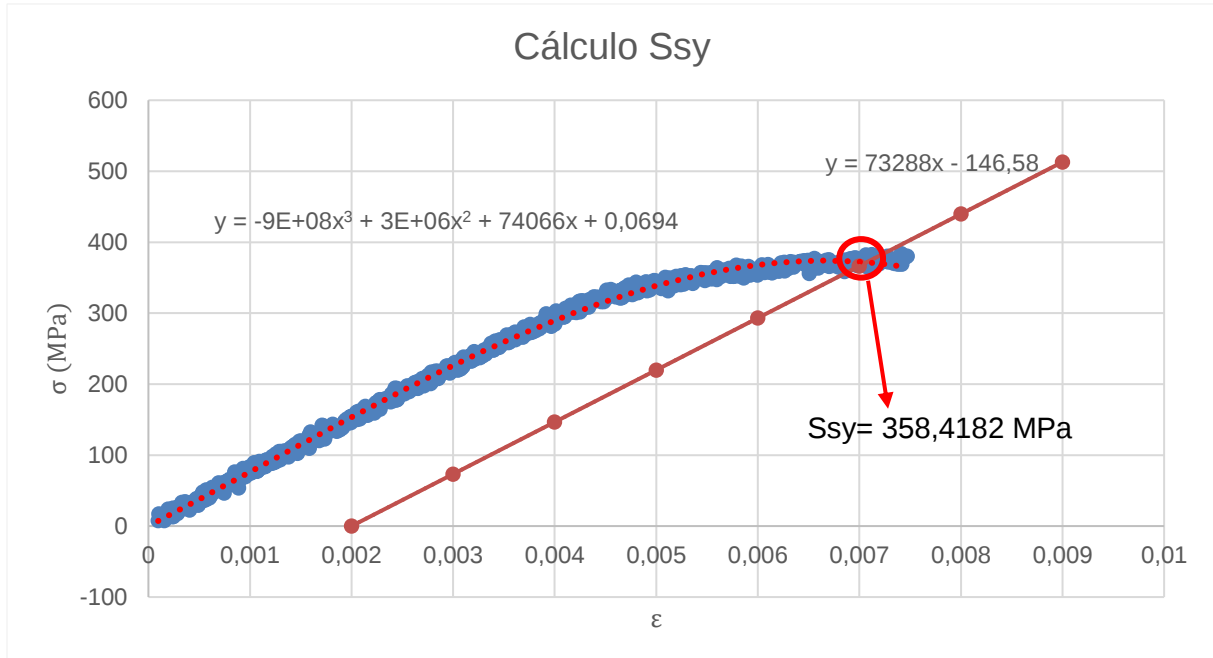


Figura 9.12. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.4 mm/min

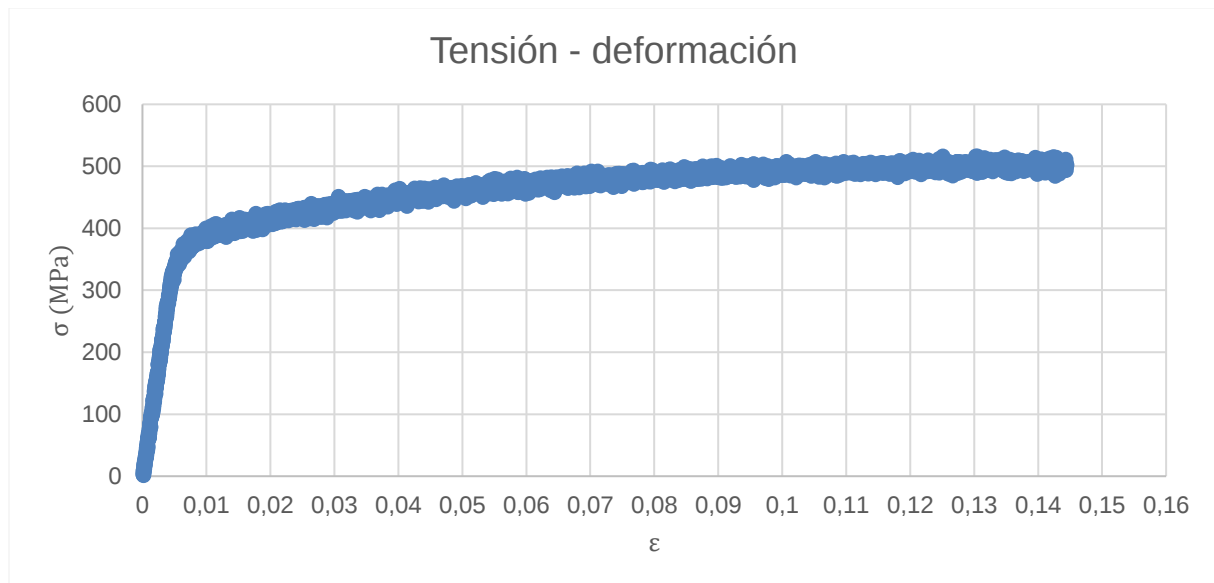
9.1.4. Velocidad de 0.5 mm/min 

Figura 9.13. Gráfica tensión - deformación para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.5 mm/min

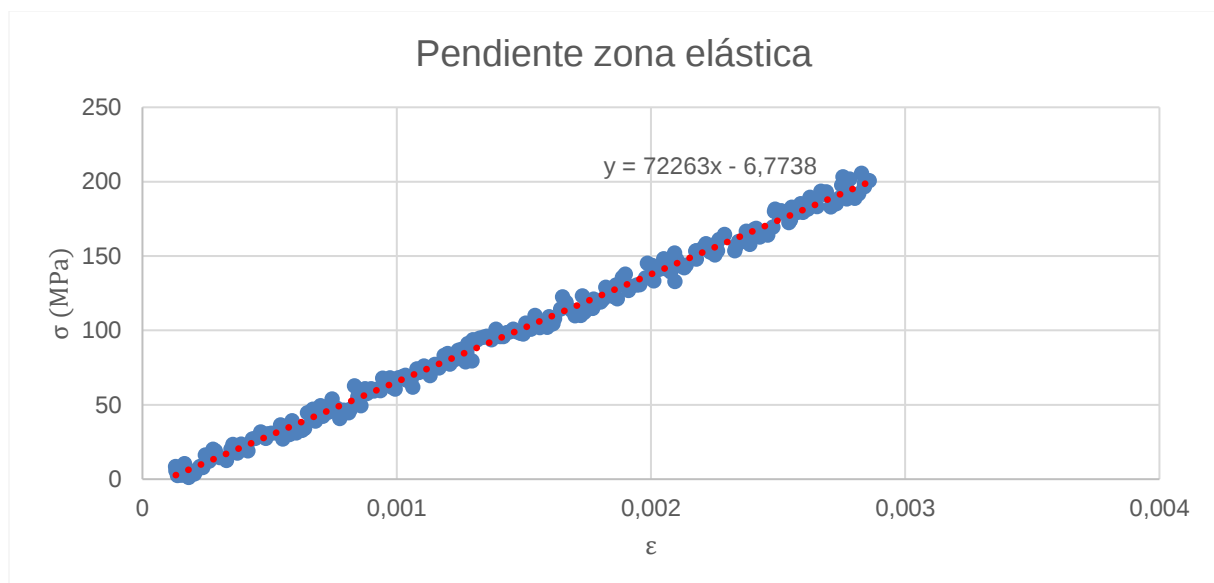


Figura 9.14. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.5 mm/min

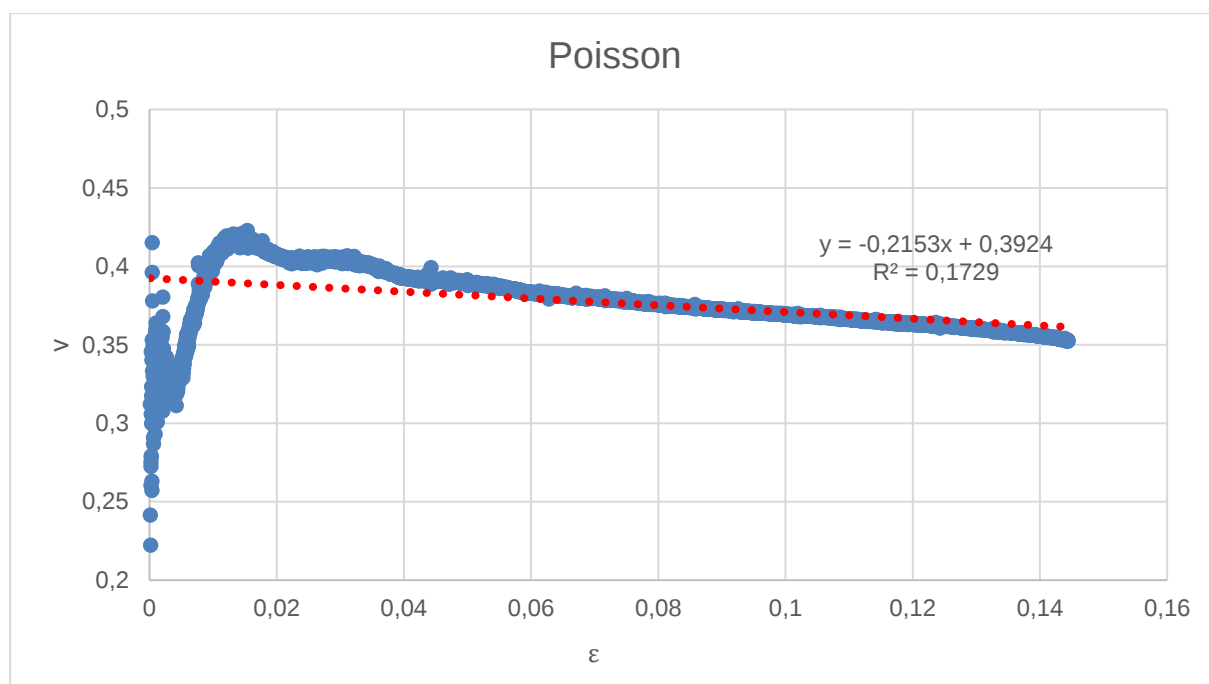


Figura 9.15. Evolución del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.5 mm/min

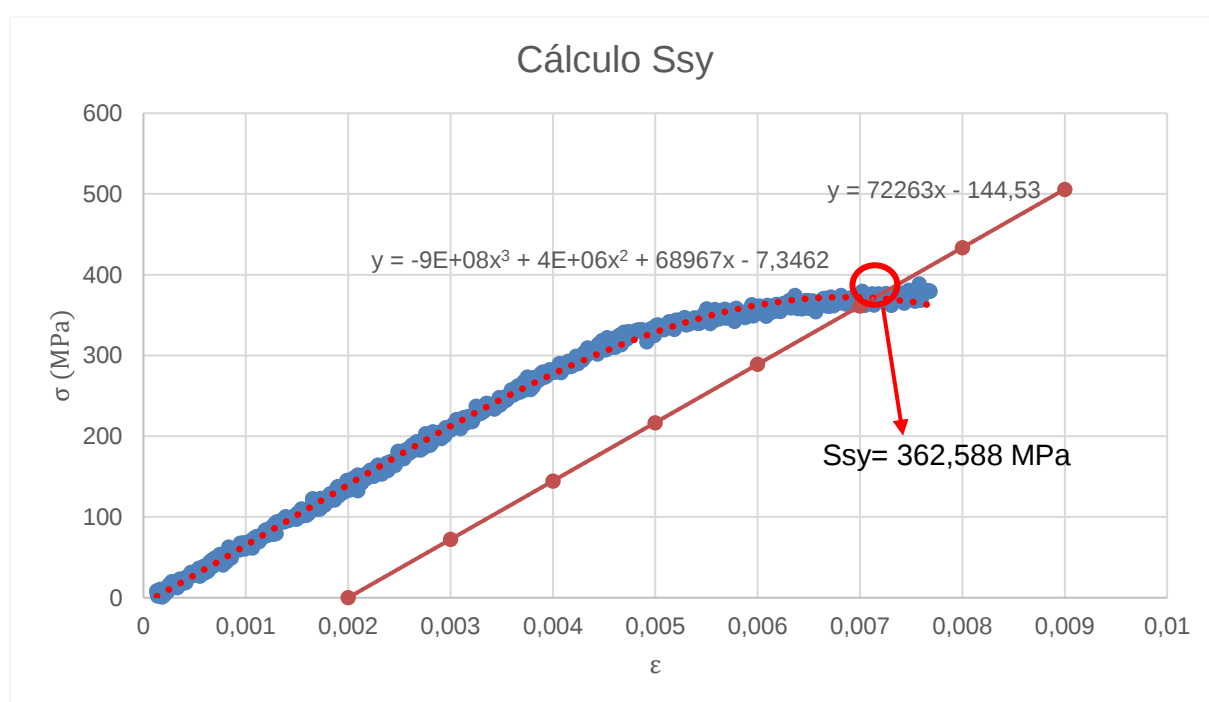


Figura 9.16. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado longitudinal y velocidad de 0.5 mm/min

9.2. DIRECCIÓN DE LAMINADO TRANSVERSAL

9.2.1. Velocidad de 0.2 mm/min

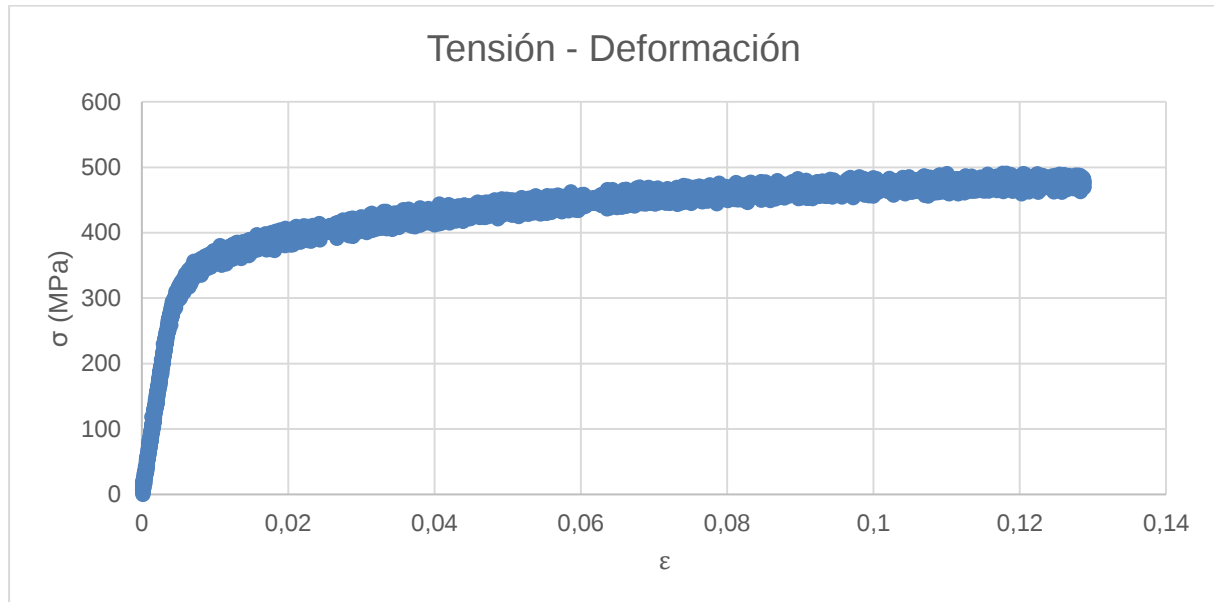


Figura 9.17. Gráfica tensión - deformación para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.2 mm/min

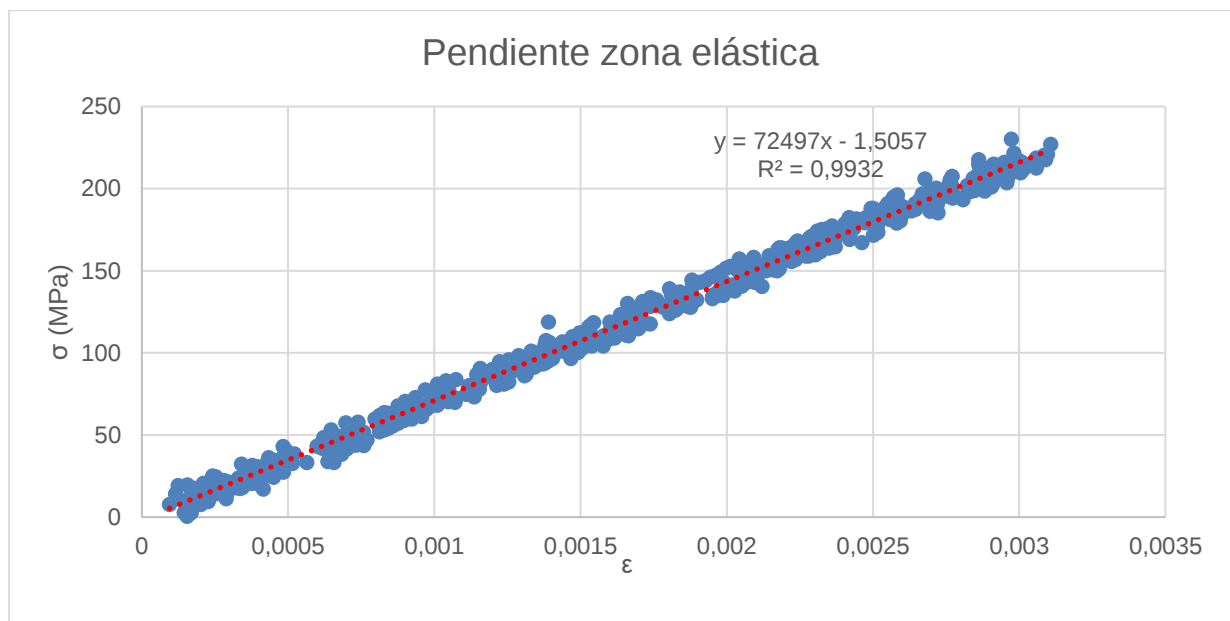


Figura 9.18. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.2 mm/min

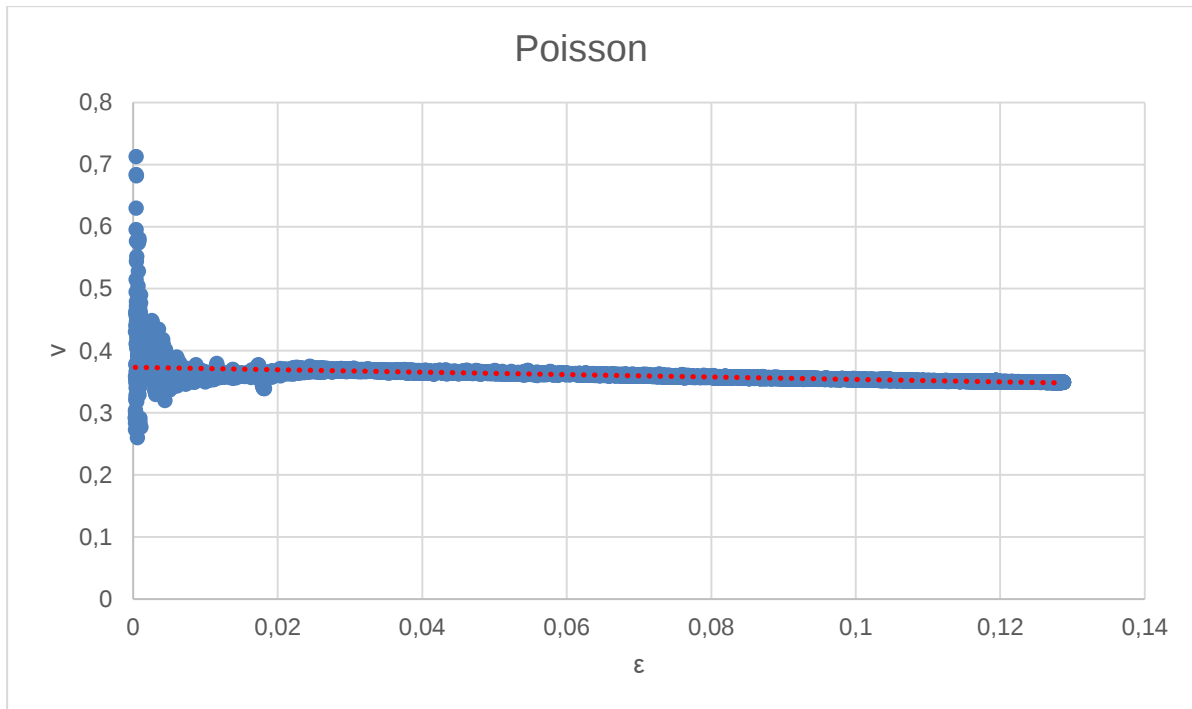


Figura 9.19. Evolución del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.2 mm/min

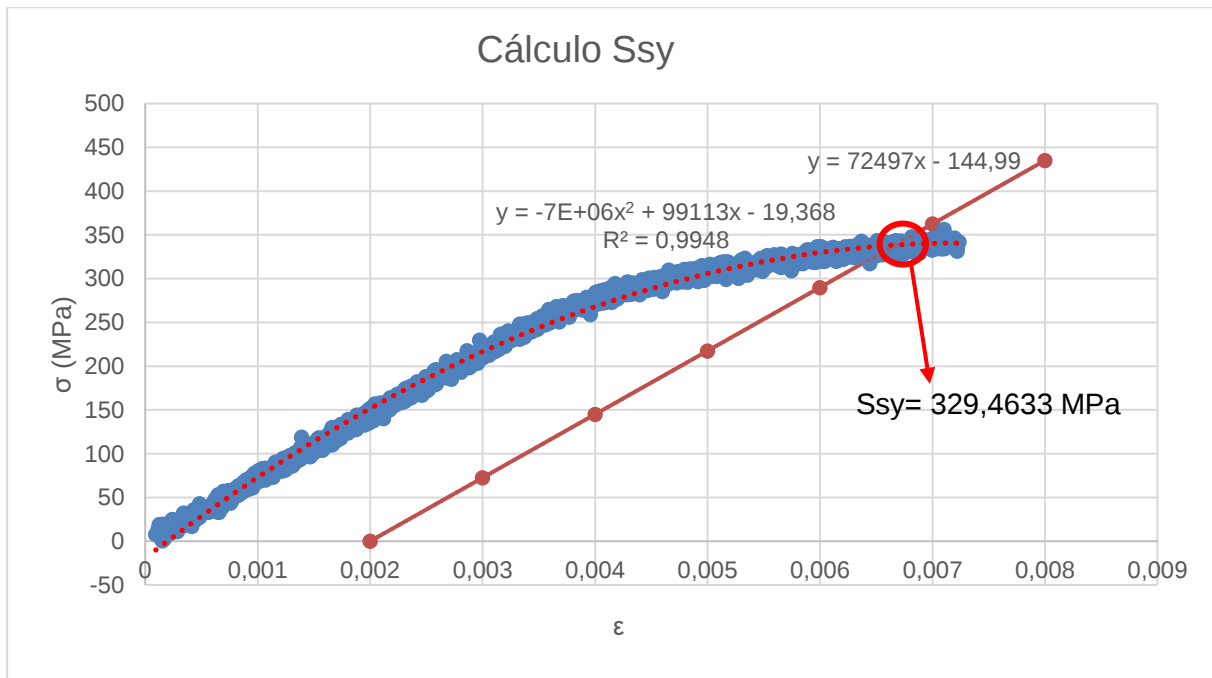


Figura 9.20. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.2 mm/min

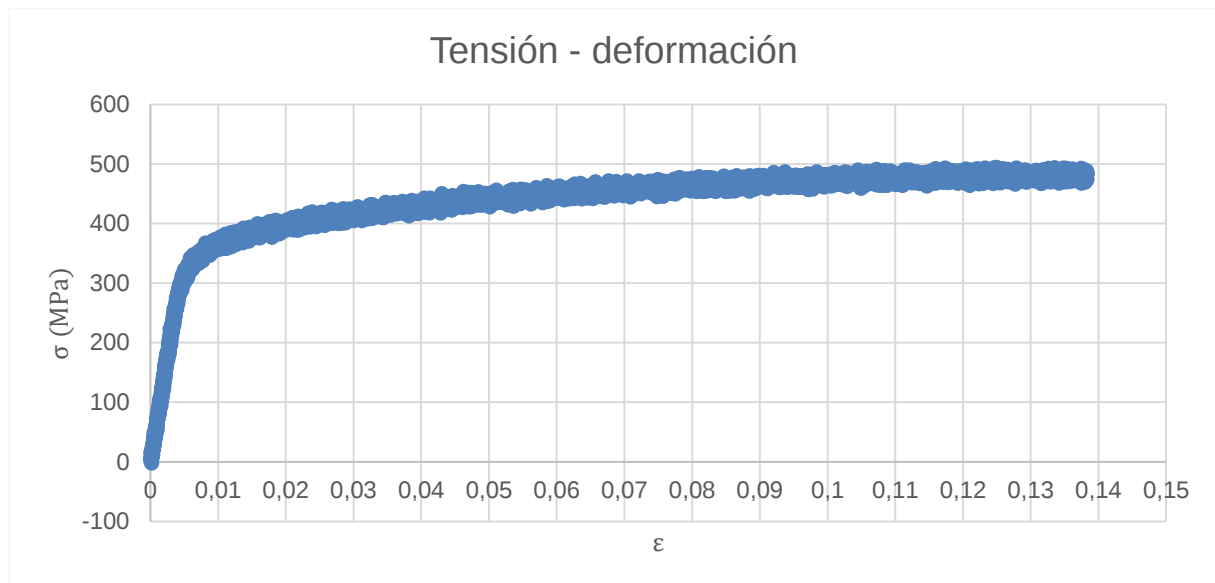
9.2.2. Velocidad de 0.3 mm/min 

Figura 9.21. Gráfica tensión - deformación para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.3 mm/min

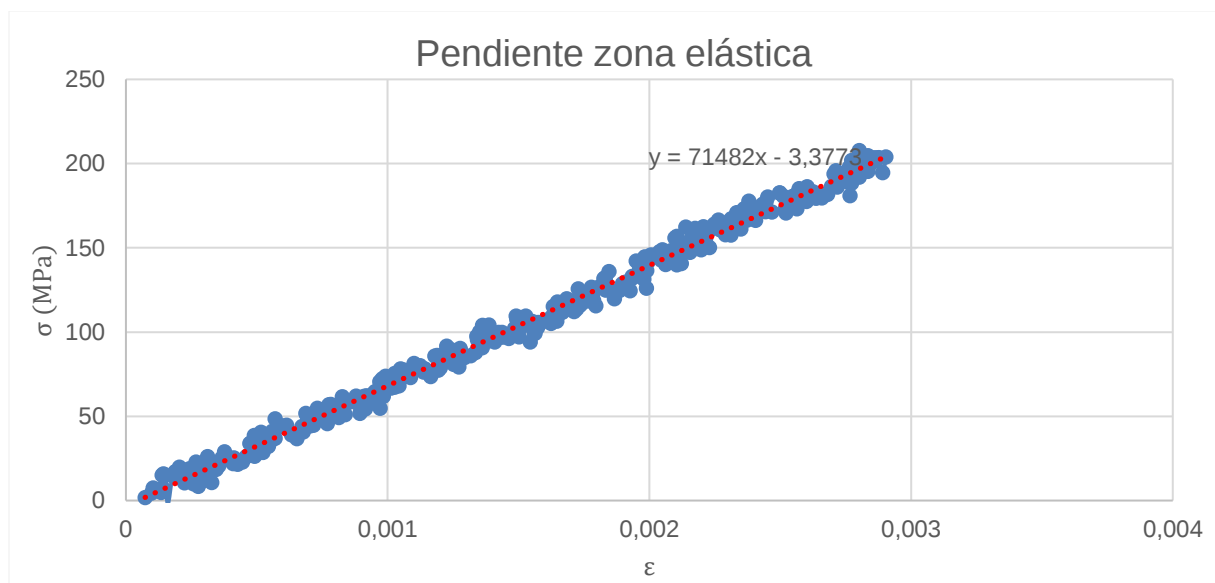


Figura 9.22. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.3 mm/min

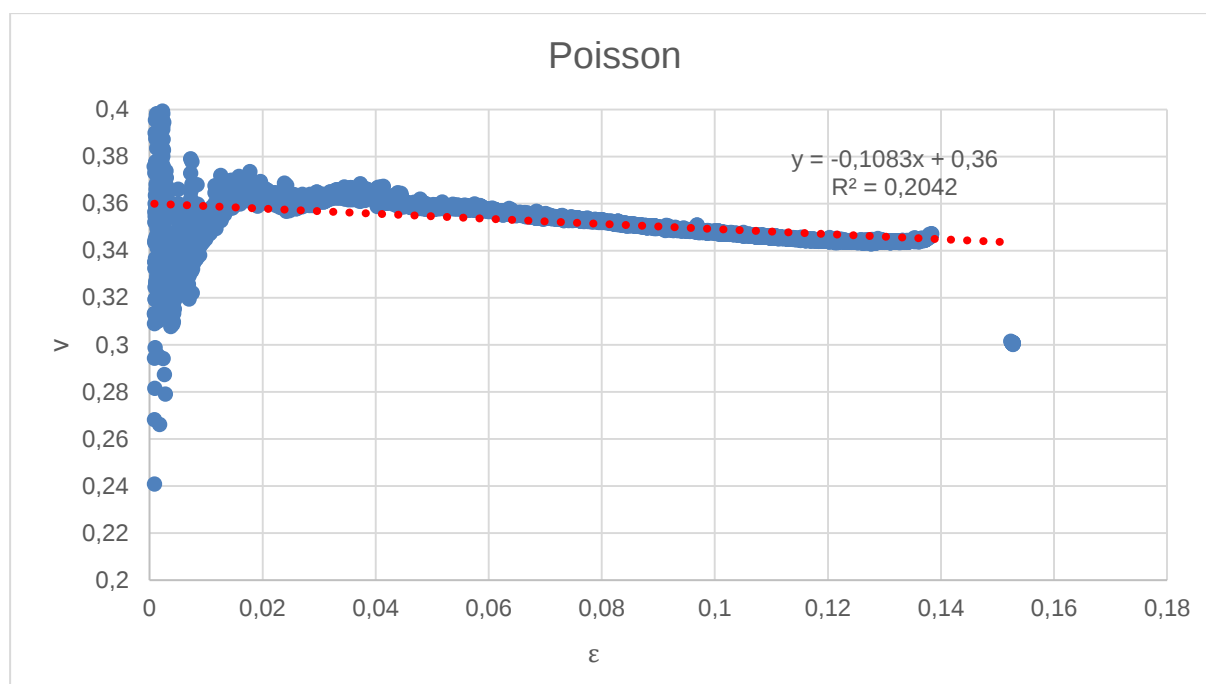


Figura 9.23. Evolución del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.3 mm/min

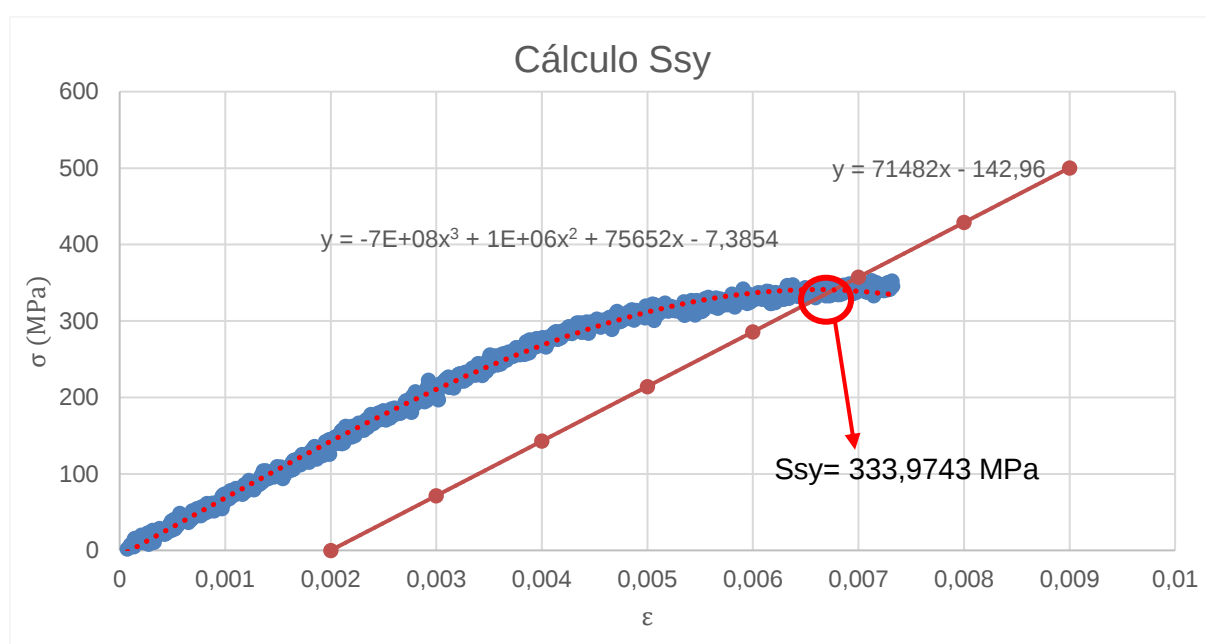


Figura 9.24. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.3 mm/min

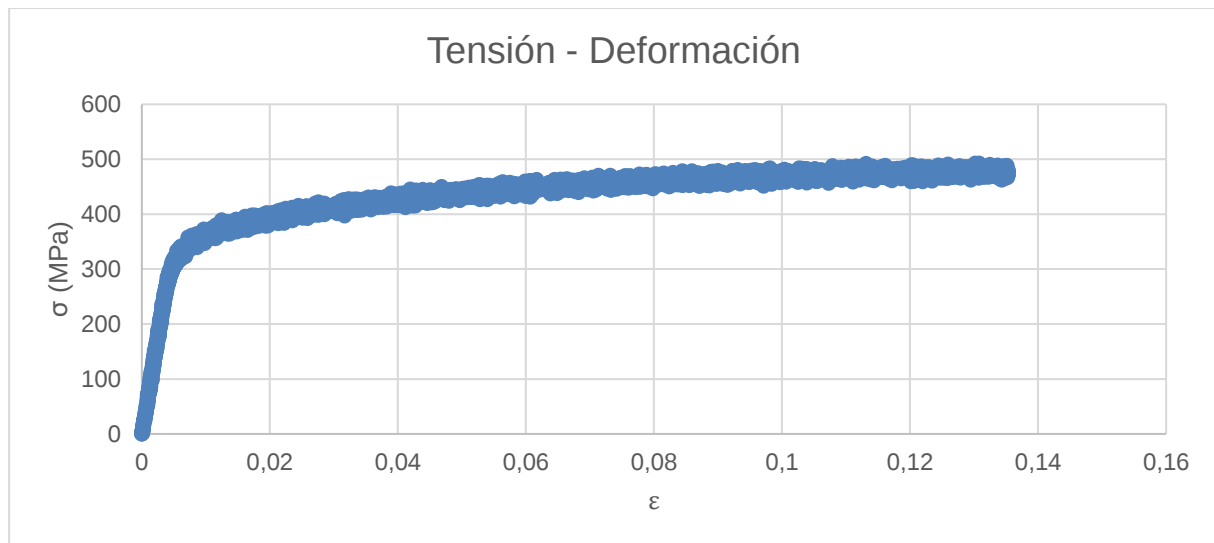
9.2.3. Velocidad de 0.4 mm/min

Figura 9.25. Gráfica tensión - deformación para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.4 mm/min

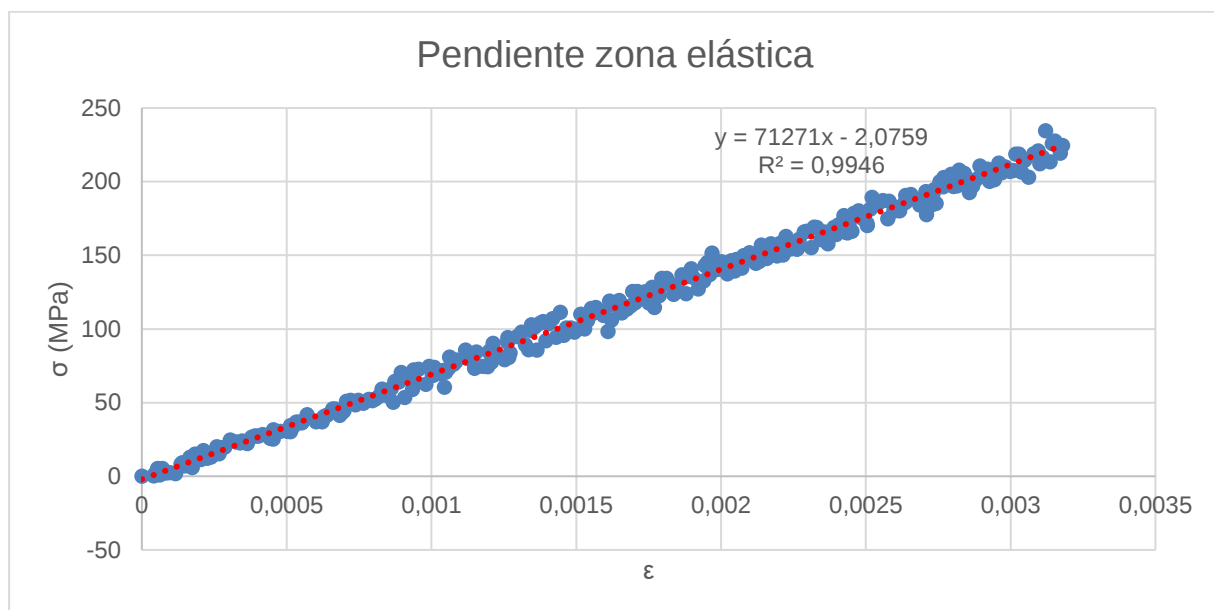


Figura 9.26. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.4 mm/min

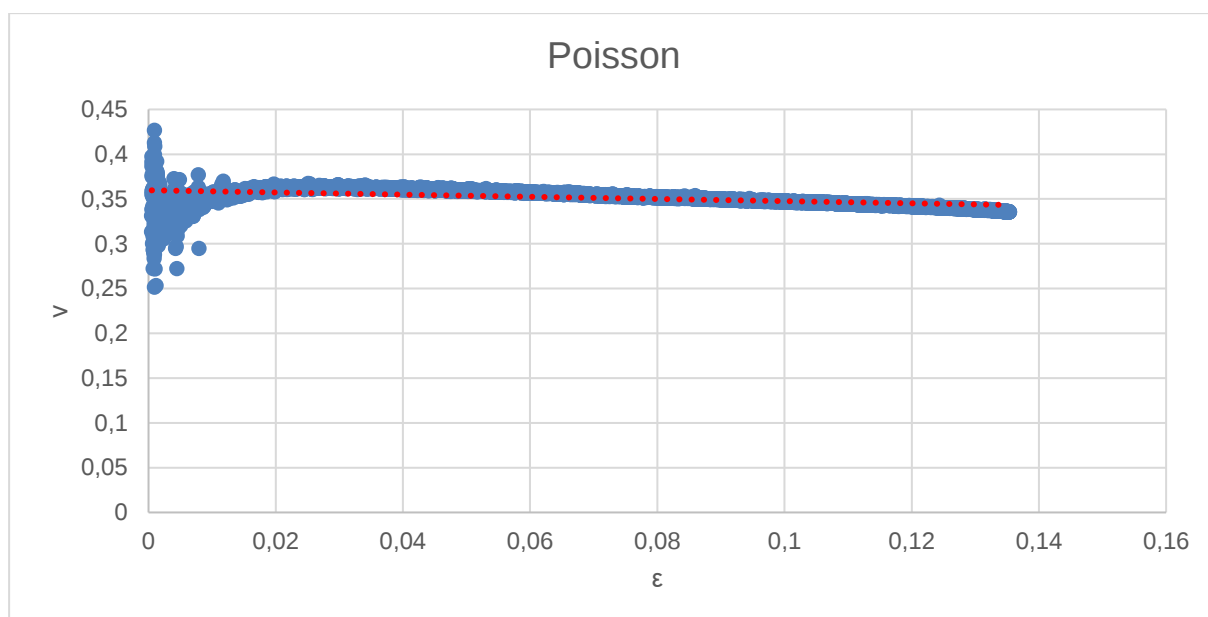


Figura 9.27. Evolución del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.4 mm/min

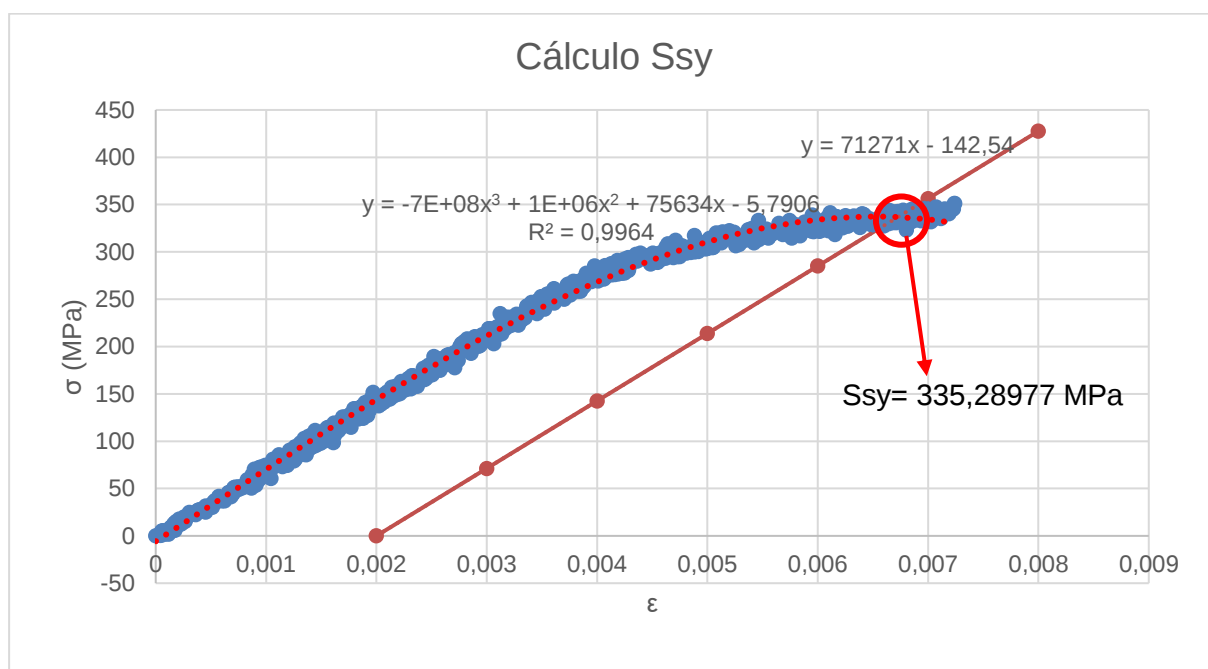


Figura 9.28. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.4 mm/min

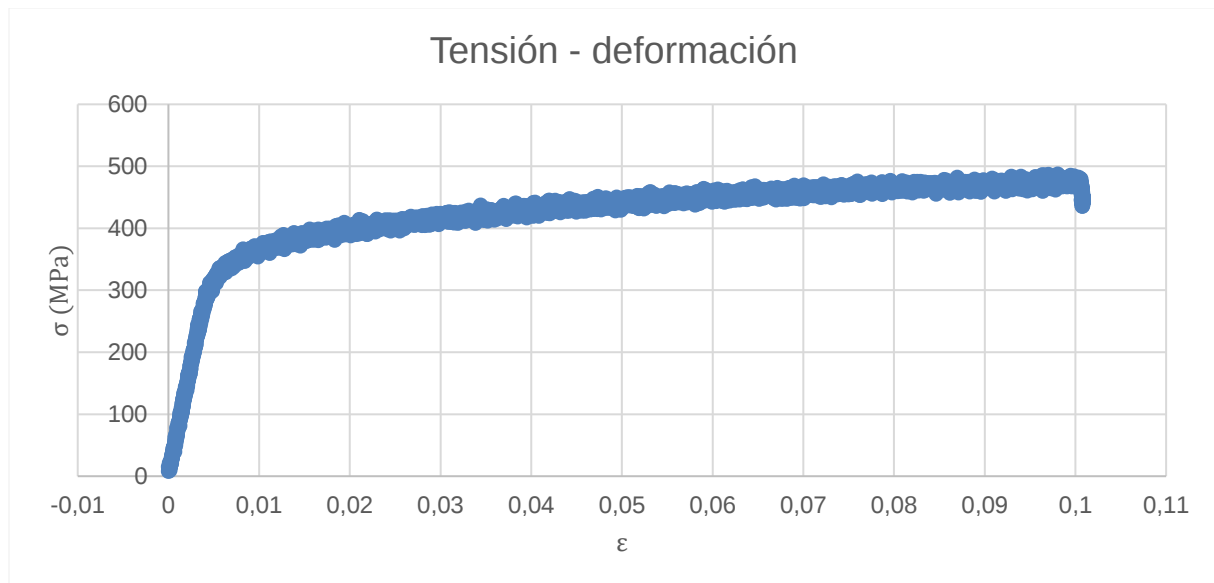
9.2.4. Velocidad de 0.5 mm/min 

Figura 9.29. Gráfica tensión - deformación para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.5 mm/min

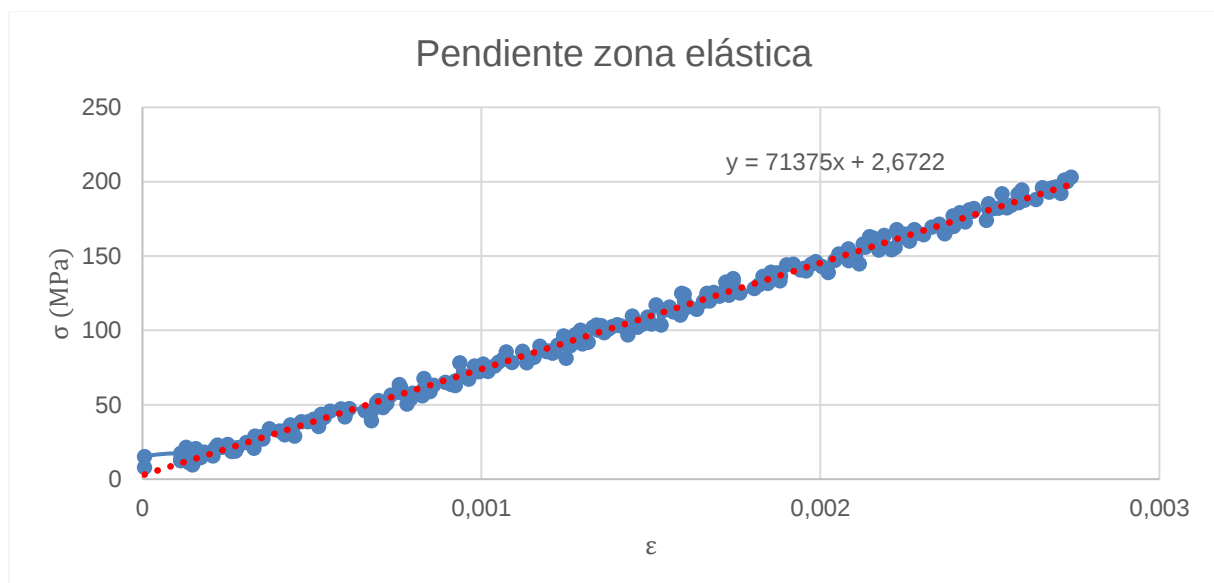


Figura 9.30. Cálculo del módulo de Young para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.5 mm/min

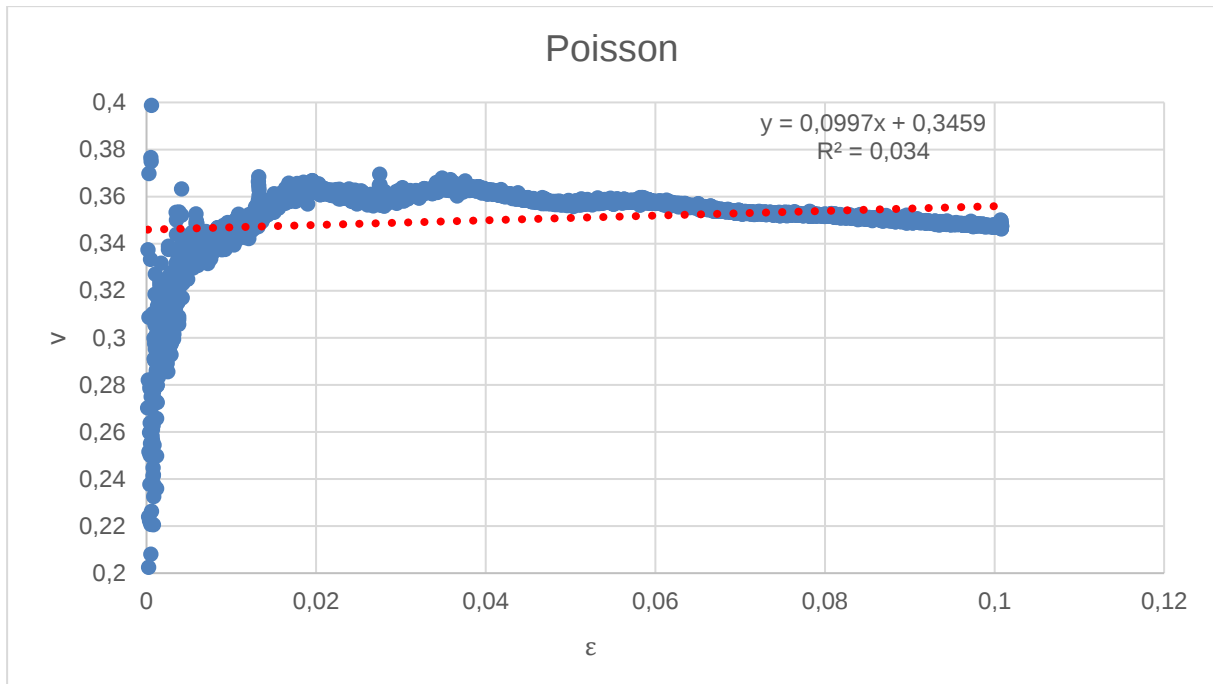


Figura 9.31. Evolución del módulo de Poisson a lo largo del ensayo monotónico de tracción para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.5 mm/min

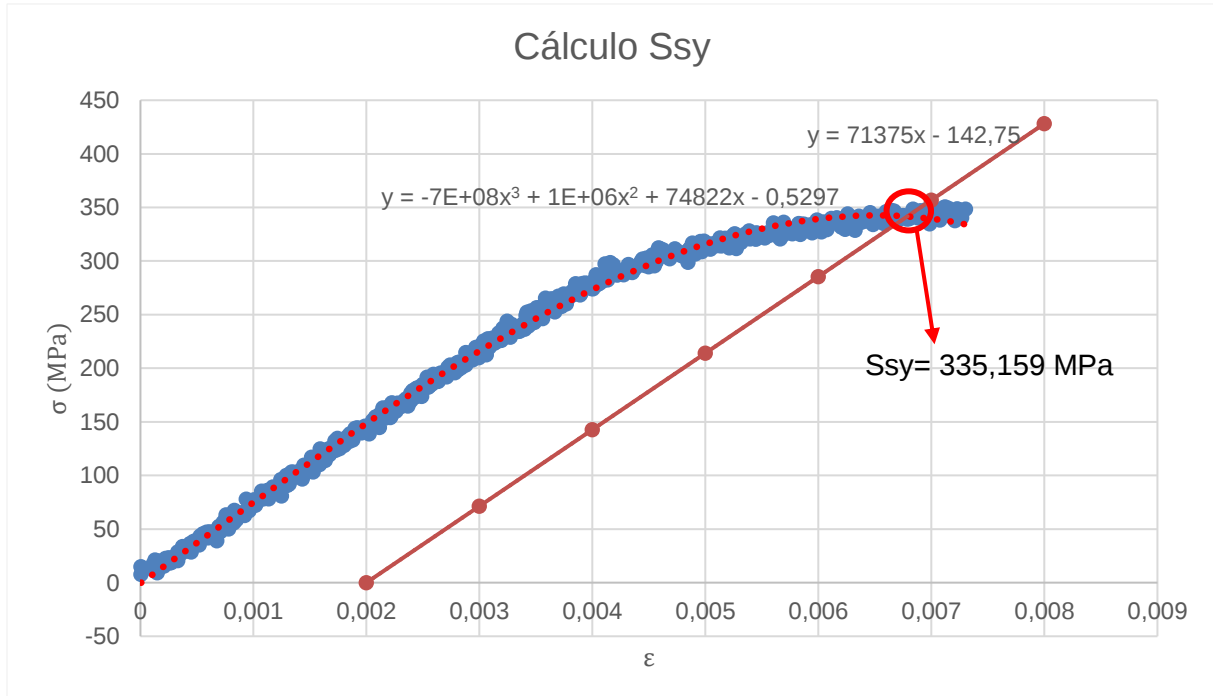


Figura 9.32. Cálculo del límite elástico para dirección de laminado transversal y velocidad de 0.5 mm/min