

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria de Materials

**MEDICIÓN DE TENSIONES INTERNAS DE MATERIALES
METÁLICOS LAMINADOS EN GEOMETRÍA CILÍNDRICA Y
CÓNICA**



Memòria i Annexos

Autor: Oriol Cañigueral Sanclemente
Director: José María Cabrera Marrero
Co-Director: Sergio Alberto Elizalde Huitrón
Convocatòria: Gener 2022

Resum

Les tensions residuals son tensions presents a una peça d'un material, sense l'aplicació d'un esforç extern. La presència d'aquestes tensions pot suposar canvis en la integritat estructural de les peces, afectant a les propietats a fatiga i d'altres. Actualment hi ha diferents mètodes para analitzar i extreure el valor de les tensions residuals o internes. En aquest treball es desenvolupa el mètode de "hole-drilling" amb la modificació de DIC.

Per tant, el principal objectiu del treball es extreure els valors de tensions internes de provetes laminades amb geometria cònica. En primer lloc, abans d'aplicar el mètode comentat sobre les provetes laminades, es realitza una validació a provetes sotmeses a tracció i un cop comprovat que els resultats són els esperats, es procedeix amb les provetes laminades. El mètode consisteix en realitzar una perforació, fet que causarà una relaxació en les tensions i modificaran les dimensions del forat. Analitzant la deformació produïda i mitjançant les corresponents equacions, s'extreu el valor de tensions residuals. Per a analitzar les deformacions, s'utilitza el software VIC-3D, que mitjançant fotografies del abans i el després de la perforació i, amb l'ajuda d'un patró de pintura a nivell superficial, retorna el valor de deformació al voltant del forat.

Per altre banda, es desenvolupen simulacions amb el software Abaqus, i d'aquesta forma, es poden comparar els valors de la simulació amb els experimentals. En aquest cas, la majoria dels valors de tensions residuals extrets mitjançant la simulació són semblants als calculats experimentalment.

Resumen

Las tensiones residuales son tensiones presentes en una pieza de un material sin la necesidad de la aplicación de un esfuerzo externo. La presencia de estas tensiones internas puede suponer cambios en la integridad estructural de las piezas, afectando a las propiedades a fatiga, por ejemplo. Actualmente hay diferentes métodos para analizar y extraer los valores de las tensiones residuales o internas. En este trabajo se desarrolla el método de “hole-drilling” con la modificación de DIC.

Por tanto, el principal objetivo del trabajo es extraer los valores de tensiones residuales de probetas laminadas con geometría cónica. En primer lugar, antes de aplicar el método comentado sobre las probetas laminadas, se realiza una validación con probetas sometidas a tracción y, una vez comprobado que los resultados son los esperados, se procede con las probetas laminadas. El método consiste en realizar una perforación, hecho que causará una relajación de las tensiones y modificarán las dimensiones del agujero. Analizando la deformación producida y mediante las correspondientes ecuaciones se extraen los valores de tensiones residuales. Para analizar las deformaciones, se utiliza el software VIC-3D, que mediante fotografías del antes y después del agujero, y con la ayuda de un patrón de pintura a nivel superficial, devuelve el valor de deformación alrededor del agujero.

Por otro lado, se han desarrollado simulaciones con el software Abaqus, y de este modo, comparar los valores de la simulación con los experimentales. En este caso, la mayoría de los valores de tensiones residuales extraídos en la simulación, son parecidos a los calculados experimentalmente.

Abstract

The residual stresses are stresses in a material without the presence of external loads. These stresses may produce a change in the structural integrity, affecting the fatigue properties, among others. There are many measuring methods to analyse the stresses. In this work, the hole-drilling method with DIC modification is developed.

Therefore, the main objective of the work is to derive the stress values of laminated samples. In the first place, before using this method on the laminated samples, a validation is done with some samples subjected to tensile tests. Once the validation is correct, the laminated samples will undergo the same method. The procedure consists in making a hole, then the residual stresses suffer a relaxation, which cause a modification of the hole dimensions. To analyse the strain, the software VIC-3D has been used, which with some pictures taken before and after the hole-drilling and a painted pattern in the surface, can return the deformation value around the hole.

On the other hand, some simulations have been developed with the Abaqus software to compare the simulation results with the experimental ones. In this case, most of the values of residual stresses derived by the simulation are similar to the experimental values.

Agradecimientos

Durante todo el desarrollo del trabajo he recibido una gran cantidad de soporte que es necesario agradecer.

Primero, quiero agradecer a mis dos tutores a Sergio Elizalde y al Dr. José María Cabrera por sus consejos y guías durante la redacción del informe o durante los ensayos experimentales en el laboratorio.

Quiero agradecer a toda mi familia y amigos por interesarse por la temática de las tensiones residuales, a pesar del poco conocimiento de esta temática e intentar comprenderlo. Además de la comprensión por estas últimas semanas que les he dedicado poco tiempo para poder terminar el trabajo.

Finalmente agradecer al grupo de procesado y conformado de materiales metálicos (PROCOMAME) por la ayuda recibida a nivel de laboratorio y de los equipos utilizados.

Glosario

DIC: Digital Image Correlation

n: Coeficiente de difracción del material

λ : Longitud de onda de la luz emitida

d: Distancia entre planos atómicos

ϕ : Ángulo de incidencia del haz de luz

E: Módulo elástico del material

μ : Coeficiente de Poisson

V_0 : velocidad de la onda en el material sin tensionar

V: velocidad de la onda en el material con tensiones internas

K: constante acústico-elástica del material.

\bar{a} y \bar{b} : Coeficientes de calibración adimensionales

\bar{A} y \bar{B} : Coeficientes de calibración

ϵ_1 , ϵ_2 y ϵ_3 : Las deformaciones a 0° , 45° y 90° respectivamente

L_f: Longitud medida por la galga después de cortar

L_i: Longitud medida por la galga antes de cortar

L_{tf}: Longitud final medida por la galga de la tira de referencia

L_{ti}: Longitud final medida por la galga de la tira de referencia

ϵ_{xx} : Deformaciones en la dirección x

ϵ_{yy} : Deformaciones en la dirección y

σ_x : Tensiones en la dirección x

σ_y : Tensiones en la dirección y

K: coeficiente de endurecimiento

Lista de Ilustraciones

<i>Ilustración 1.- Vibración de los tipos de tensiones residuales (García Rodero 2014)</i>	5
<i>Ilustración 2.- Dimensiones de los defectos y microestructuras (Hauk 1997)</i>	6
<i>Ilustración 3.- Representación esquemática de la ley de Bragg (Jimenez Peña and Guzmán Duxtan 2018)</i>	7
<i>Ilustración 4.- Geometría de ensayo del método de "ring core" (Menda et al. 2014)</i>	11
<i>Ilustración 5.- Diagrama esquemático del método de medida de tensiones residuales por eliminación de capas (Huang, Liu, and Xie 2013)</i>	13
<i>Ilustración 6.- Esquema del proceso de "shear spinning" (Hayama, Murota, and Kudo 1965)</i>	15
<i>Ilustración 7.- Diagrama de la posición de las galgas extensométricas para medir la deformación alrededor del agujero (Šarga and Trebuña 2016)</i>	17
<i>Ilustración 8.- Patrón utilizado en la superficie de las probetas para medir la deformación, a partir del método DIC</i>	18
<i>Ilustración 9.- Montaje del equipo utilizado para el "hole-drilling" combinado con el método de DIC</i>	20
<i>Ilustración 10.- Probetas sometidas a tracción a) Antes de romper b) Tras romper</i>	21
<i>Ilustración 11.- Diagrama tensión-deformación del acero DC-04</i>	22
<i>Ilustración 12.- Curva tensión-deformación del acero DC-04 extendida</i>	23
<i>Ilustración 13.- Probeta rectangular representada en Abaqus</i>	24
<i>Ilustración 14.- Condiciones de tracción en la probeta simuladas con Abaqus</i>	24
<i>Ilustración 15.- Comparación de las probetas antes (a) y después de deformar (b)</i>	26
<i>Ilustración 16.- Simulación de las probetas deformadas al 45% con mapa de color. a) Tensiones residuales en la dirección x b) Tensiones residuales en la dirección z c) Tensiones residuales von Mises</i>	27

Ilustración 17.- Simulación de las probetas al liberar el extremo inferior con mapa de color. a) Tensiones residuales en la dirección x b) Tensiones residuales en la dirección z c) Tensiones residuales von Mises.....28

Ilustración 18.- Probetas ensayadas a tracción. a) deformación al 15% b) deformación al 30% c) deformación al 45% d) rotura.....30

Ilustración 19.- Puntos de medida en la probeta deformada a 45%31

Ilustración 20.- Gráfico de la distribución de tensiones residuales en la dirección y de la superficie de la probeta deformada al 45%.32

Ilustración 21.- Geometría de medición utilizado para medir los esfuerzos.....33

Ilustración 22.- Comparación de los esfuerzos en la dirección "x" e "y" de la simulación con los experimentales .35

Ilustración 23.- Simulación de las probetas laminadas con geometría cónica a 15º presentadas con mapa de color. a) Tensiones residuales en la dirección x b) Tensiones residuales en la dirección z c) Tensiones residuales von Mises.....36

Ilustración 24.-Simulación de las probetas laminadas con geometría cónica a 15º, con el punto de extracción de resultados (amarillo).....38

Ilustración 25.- Soporte de PLA impreso con impresora 3D39

Ilustración 26.- Soporte con la probeta fija39

Ilustración 27.- Montaje utilizado en las probetas laminadas para el método de "hole-drilling" con DIC.....40

Ilustración 28.- División de zonas de la probeta.....43

Ilustración 29.- Evolución de los esfuerzos "x" e "y" de la zona 3 para cada ángulo.....43

Ilustración 30.-Evolución de los esfuerzos "x" e "y" de la zona 2 para cada ángulo.....44

Ilustración 31.-Evolución de los esfuerzos "x" e "y" de la zona 1 para cada ángulo.....44

Lista de tablas

<i>Tabla 1.- Propiedades mecánicas del acero DC-04</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2.- Tensiones residuales medidas en la simulación en las probetas sometidas a tracción, deformadas con un alargamiento de 45%</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 3.- Tensiones residuales medidas en las probetas sometidas a tracción, deformadas a 45%</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 4.-Tensiones residuales de la probeta, laminada en geometría cónica a 15º, extraídos de la simulación. Siendo σ_x las tensiones en la dirección x, σ_y las tensiones en la dirección y.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 5.-Tensiones residuales de la probeta, laminada en geometría cónica a 15º. Siendo σ_x las tensiones en la dirección x, σ_y las tensiones en la dirección y.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 6.-Tensiones residuales de la probeta, laminada en geometría cónica a 13º. Siendo σ_x las tensiones en la dirección x, σ_y las tensiones en la dirección y.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 7.- Tensiones residuales de la probeta, laminada en geometría cónica a 11º. Siendo σ_x las tensiones en la dirección x, σ_y las tensiones en la dirección y.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 8.-Costes de ingeniería asociados al trabajo.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 9.-Costes de equipo y materiales asociados al trabajo.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 10.-Coste total asociado al trabajo.....</i>	<i>51</i>

Índice

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	V
GLOSARIO	VII
LISTA DE ILUSTRACIONES	IX
LISTA DE TABLAS	XII
1. PREFACIO	1
1.2. Origen del trabajo	1
1.3. Motivación	1
1.4. Requerimientos previos.....	1
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. Objetivos del trabajo.....	3
3. TENSIONES INTERNAS	5
3.2. Medida de tensiones internas por métodos no destructivos.....	6
3.2.1. Método de rayos-X.....	7
3.2.2. Método de difracción de neutrones	8
3.2.3. Método mediante ultrasónidos	9
3.2.4. Método de ruido magnético de Barkhausen	9
3.3. Medida de tensiones internas por métodos destructivos o semi destructivos ...	10
3.3.1. Técnica de “ring core”	10
3.3.2. Método de “hole-drilling”	11
3.3.3. Método por eliminación de capas.....	12
3.3.4. Método de seccionamiento	13
4. PROCESO DE DEFORMACIÓN INCREMENTAL	15
5. MÉTODO DE “HOLE-DRILLING” PARA MEDIR TENSIONES INTERNAS POR CORRELACIÓN DE IMAGEN DIGITAL (DIC)	16
6. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	19
6.1. Materiales y equipo	19

6.2. Verificación del método.....	23
6.2.1. Método teórico.....	23
6.2.2. Método práctico.....	29
6.3. Cálculo de tensiones residuales de las probetas laminadas en geometría cónica y cilíndrica	35
6.3.1. Método teórico.....	35
6.3.2. Método práctico.....	38
ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL	45
CONCLUSIONES	47
PRESUPUESTO Y ANÁLISIS ECONÓMICO	49
BIBLIOGRAFIA	53
ANEXO A	57
A1. Datasheet del foco multiled.....	57
A2. Datasheet de las cámaras	59
ANEXO B	67
B1. Planos de las probetas sometidas a tracción	67

1. Prefacio

1.2. Origen del trabajo

La idea de realizar el estudio sobre la medición de tensiones internas en materiales metálicos surge a partir de la posibilidad de analizar dichas tensiones de las piezas resultantes de procesos de laminación cilíndrica y cónica, mediante la técnica de “hole-drilling” combinado con el uso de DIC (“Digital Image Correlation”), un método novedoso y eficaz en el sector.

1.3. Motivación

El principal punto de interés para desarrollar la idea de la medición de tensiones residuales es que en la actualidad supone un problema durante el procesado de materiales metálicos, por ejemplo, en el caso de la soldadura. Actualmente hay varios métodos para medir las tensiones residuales, como puede ser el método de difracción por rayos X (DRX), sin embargo, presenta ciertas problemáticas, dada la curvatura de la superficie de las muestras laminadas con geometría cónica y cilíndrica.

El poder utilizar una tecnología innovadora como la DIC, que aporta algunos beneficios y ventajas en comparación con las técnicas utilizadas hoy en día, supone una motivación para adentrarse en el estudio de esta temática. Además, se compararán las tensiones residuales obtenidas por el método de “hole-drilling” junto con DIC, con los valores obtenidos por simulación numérica por elementos finitos. Además, este método supone un gran beneficio en cuanto a tiempo, ya que los pasos previos de montaje de equipo, preparación de probetas, son relativamente rápidos en comparación con el método de difracción de rayos X.

No obstante, cabe indicar que las simulaciones necesarias para comparar los valores experimentales, son bastante costosas en cuanto a tiempo y complejidad en términos computacionales.

1.4. Requerimientos previos

Las tensiones internas son medidas en probetas laminadas con geometría cilíndrica y cónica obtenidas a partir de la máquina de laminación cilíndrica y cónica NTR-25 cedida por la empresa Industrias Puigjaner – DENN cuyos resultados se presentan en el trabajo realizado por Pablo Saúl Coyoy (Coyoy, Elizalde, and Cabrera 2021). A partir de los valores de tensiones internas se puede realizar un análisis de la integridad de las piezas producidas mediante laminación cilíndrica y cónica.

2. Introducción

En este estudio se pretende analizar las tensiones residuales de un acero de embutición tras ser laminado en geometría cónica y cilíndrica. Hoy en día existen varias técnicas para medir las tensiones residuales, tanto los que se basan en la eliminación de material como los que no. Ambos tipos de métodos presentan sus ventajas e inconvenientes. En el caso presentado a continuación, se utiliza el método de “hole-drilling”, una técnica semi-destructiva que consiste en perforar un material, previamente deformado, para medir las tensiones residuales provocadas por la laminación. Por otro lado, se realiza una simulación de las condiciones de laminación con Abaqus para comparar los valores de esfuerzos obtenidos con la simulación, con los obtenidos mediante el método experimental.

2.1. Objetivos del trabajo

Calcular las tensiones residuales de materiales metálicos procesados por laminación cónica y cilíndrica, mediante el método de “hole drilling” combinado con un sistema de correlación de imagen digital (DIC, por sus siglas en inglés).

Desarrollo de una metodología para calcular las tensiones residuales en piezas obtenidas mediante procesos de deformación incremental simétricos, que facilite su implementación en el sector industrial. dado que la mayoría de los métodos para analizar las tensiones residuales son métodos muy costosos o que implican cierto nivel de conocimiento técnico.

3. Tensiones internas

Las tensiones internas son aquellas tensiones que han quedado remanentes en una pieza de un tipo de material, tras el procesado de esta, sin influencia alguna de la aplicación de cargas externas. Su aparición se debe, por ejemplo, al generarse un gradiente de temperatura durante la solidificación por moldeo, debido a las diferencias en los coeficientes de expansión térmica; al realizar una soldadura, a causa de la diferencia de contracción al solidificarse por el gradiente de temperatura o durante los procesos de conformado de las piezas. Puesto que se estudiará las tensiones residuales en un proceso de laminación cónica, se estudiará dichas tensiones en un proceso de conformado de piezas.

Existen tres tipos de tensiones internas según la escala en la que se trabaja. Se encuentran las macro tensiones, las micro tensiones y las submicroscópicas, pudiendo aparecer todas al mismo tiempo en la misma pieza (Kandil et al. 2001). Las macro tensiones internas son aquellas que tienen un efecto a las propiedades a una escala mayor que el tamaño de grano, también nombradas como las de tipo I (Kandil et al. 2001). En cambio, las micro tensiones internas, son aquellas que tienen un efecto a una escala del tamaño de grano (tipo II) e incluso a un nivel atómico (tipo III), afectando así, a la estructura cristalina del material (Kandil et al. 2001).

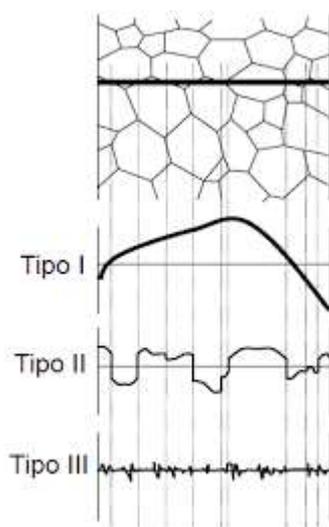


Ilustración 1.- Vibración de los tipos de tensiones residuales (García Rodero 2014)

En la Ilustración 1, se observa que las tensiones residuales de tipo I o macroscópicas son prácticamente constantes a lo largo de distancias mayores a las del límite de grano. Estas tensiones son las que se quiere analizar mediante los ensayos pertinentes, ya que vienen formadas durante el procesado de material. Por otro lado, las tensiones residuales de tipo II y III o microscópicas presentan perturbaciones ligeras debido a las mismas tensiones macroscópicas (García Rodero 2014).

Las tensiones internas pueden suponer graves problemas a la integridad estructural de las piezas y componentes, afectando así a la vida útil de éstas. Puede provocar efectos en la vida a fatiga del material, generar distorsión de la geometría de la pieza, empeorar la resistencia a la corrosión u ocasionar una fractura frágil (Jimenez Peña and Guzmán Duxtan 2018). En la Ilustración 2 se presenta la dimensión de las tensiones residuales en comparación con los otros defectos.

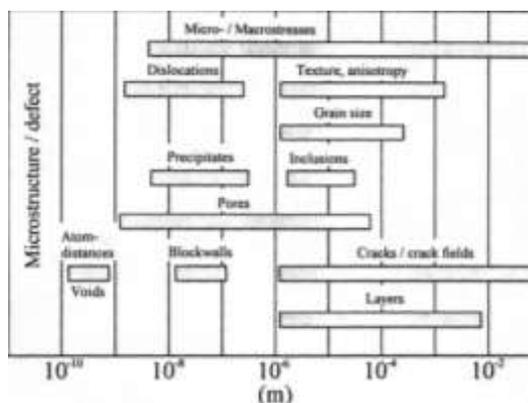


Ilustración 2.- Dimensiones de los defectos y microestructuras (Hauk 1997)

Por este motivo, durante los últimos años, se ha perfeccionado distintos métodos para analizar y calcular las tensiones internas de muestras. Existen dos tipos de métodos, los destructivos o semi destructivos y los no destructivos.

Puesto que, en este trabajo, se realizará el estudio sobre la medición de tensiones internas utilizando el método de “hole-drilling”, únicamente se realizará un enfoque detallado sobre este proceso. Aunque, de todos modos, se resumirá brevemente los otros métodos.

3.2. Medida de tensiones internas por métodos no destructivos

Los métodos de medida de tensiones internas por métodos no destructivos se basan en que no es necesario la supresión de material de la pieza. La principal ventaja que poseen estos métodos es la velocidad de ensayo ya que suelen ser ensayos rápidos. Por tanto, se utilizan para aplicaciones donde el tiempo es clave para evitar grandes cantidades de dinero. Aunque el coste de material para poder realizar los ensayos es más elevado que en el caso de los métodos destructivos.

Los principales métodos no destructivos más utilizados actualmente son el método de rayos-X, el método de difracción de neutrones, el método mediante ultrasonidos y el método magnético.

3.2.1. Método de rayos-X

El método de rayos-X se basa en el principio que, al aplicar una tensión sobre un material metálico, las deformaciones elásticas resultantes, modifican las distancias entre los planos cristalinos. Se le aplica rayos-X de alta energía, que son absorbidos por la pieza. Algunos de estos rayos difractan en los planos cristalinos, según la ley de Bragg (Ecuación 1), y si la diferencia de los caminos recorridos por las ondas da un número entero, formando onda constructiva, que el sensor es capaz de detectar (Jimenez Peña and Guzmán Duxtan 2018; Kudryavtsev 2008). El efecto se presenta en la Ilustración 3.

$$n\lambda = 2d\sin(\phi) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Siendo n el coeficiente de difracción del material, λ la longitud de onda de emitida, d la distancia entre planos y ϕ el ángulo de incidencia del haz.

El sensor va rotando alrededor de la muestra y captando todos los ángulos de los rayos difractados por la pieza, además de su intensidad. Finalmente, la misma máquina extrae un gráfico donde se observa la posición de los picos de intensidad con su respectiva posición angular. De este modo, se puede obtener estas distancias entre planos, y con esto, el valor de las tensiones utilizando la Ecuación 2.

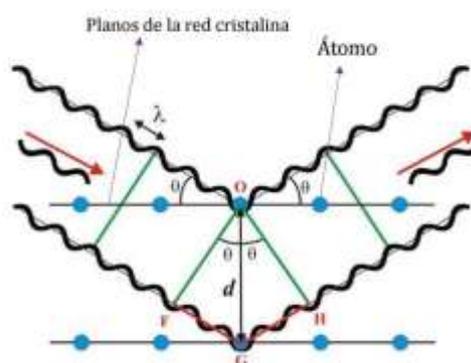


Ilustración 3.- Representación esquemática de la ley de Bragg (Jimenez Peña and Guzmán Duxtan 2018)

$$\sigma_{\phi} = (2\theta_1 - 2\theta_2) * \frac{\cot\theta_1}{2} * \left(\frac{E}{1+\nu}\right) * \frac{1}{\sin^2\psi} * \left(\frac{\pi}{180}\right) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Siendo θ_1 el ángulo de Bragg de los planos difractando a ψ_1 , θ_2 el ángulo de Bragg de los planos difractando a ψ_2 , E el módulo de Young y ν el coeficiente de Poisson.

El principal problema que tiene esta técnica es la geometría de la pieza, ya que es necesario que los rayos-X penetren en la superficie a analizar, y que, además, difracten hacia el sensor, sin ningún obstáculo de por medio. Además, a nivel de laboratorio se ha dejado de utilizar debido a la falta de conocimiento por parte de los científicos, ya que los equipos de medición de tensiones residuales por rayos X, son distintos a los equipos de escaneo por difracción (Totten, Howes, and Inoue 2002).

3.2.2. Método de difracción de neutrones

El método de difracción por neutrones tiene el mismo procedimiento que en el caso de rayos-X. Las tensiones internas generan deformación elástica en los planos cristalinos. Efecto que se observa en la distancia entre estos planos, y que, al enviar un haz de neutrones, penetrarán por la superficie, y algunos rayos difractarán, siguiendo la ecuación de Bragg (Ecuación 1) y el fenómeno mostrado en la Ilustración 3, hacia un sensor rotando alrededor de la muestra. El sensor va captando los picos de intensidad de estos rayos con su respectiva posición angular.

Una vez se obtiene la distancia d del material, se calcula las deformaciones (Ecuación 3). Para la difracción de neutrones, se utilizan las deformaciones principales. Del mismo modo, que se calculan los esfuerzos principales a partir de la Ecuación 4.

$$\varepsilon = \frac{d-d_0}{d_0} = \frac{\sin(\theta_0)}{\sin(\theta)-\sin(\theta_0)} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Siendo d la distancia interplanar de los planos tensionados y d_0 la distancia interplanar de los planos no tensionados.

$$\sigma_1 = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_1 + \frac{\nu}{(1-2\nu)} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) \right) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Siendo $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, las tensiones principales, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ las deformaciones principales, E el módulo de Young y ν el coeficiente de Poisson. Para calcular la σ_2 y σ_3 se utilizaría sus respectivas deformaciones principales ($\varepsilon_2, \varepsilon_3$).

En caso de que no se pueda deducir la dirección de los esfuerzos principales, se debe medir en más de 3 direcciones, en 6 direcciones independientes ya sería suficiente para completar el tensor de tensiones (Hauk 1997).

Aunque la técnica sea prácticamente la misma que los rayos-X, presenta la ventaja de que los neutrones son capaces de penetrar a más profundidad de la pieza que los rayos-X.

Así pues, pueden abarcar una zona más amplia y detallada. Aunque el principal inconveniente, es el coste del equipamiento y la disponibilidad de este (Kudryavtsev 2008).

3.2.3. Método mediante ultrasonidos

El método de medida de tensiones internas mediante ultrasonido se basa en el principio de funcionamiento del efecto acústico-elástico (Uzun and Nezihi Bilge 2011). La velocidad de las ondas ultrasónicas que atraviesan el material se ve afectada por las tensiones de la probeta. A partir de la diferencia de velocidades, se determina las tensiones internas, dada la dependencia directa de éstas con dicha velocidad. Para calcular el valor de esfuerzo se utiliza la Ecuación 5.

$$V = V_0 + K\sigma \quad (\text{Ecuación 5})$$

Siendo V_0 la velocidad de la onda en el material sin tensionar, V la velocidad de la onda en el material con tensiones internas y K la constante acústico-elástica del material.

El procedimiento se basa en emitir las ondas ultrasónicas mediante un transductor, que se propaga por el interior del material y se detecta por otro transductor (Rossini et al. 2012). Por tanto, este proceso tiene la ventaja que se pueden medir tensiones residuales en el interior del material, fenómeno que no se puede realizar en el método por rayos X.

La diferencia de velocidades de la onda ultrasónica bajo sollicitaciones mecánicas es tan pequeña, que se necesitan equipos de medición con alta resolución y completamente informatizado. Por otro lado, el equipo es más económico y portátil.

3.2.4. Método de ruido magnético de Barkhausen

El método de ruido magnético desarrollado por el físico Heinrich Barkhausen, es uno de los principales métodos magnéticos más utilizados.

Los métodos magnéticos se basan en que las propiedades ferromagnéticas de los materiales (especialmente del acero), son sensibles a las tensiones internas del material debido al efecto magnético-elástico (Kandil et al. 2001). El principio en que se fundamenta esta técnica es por el comportamiento ferromagnético de algunos materiales.

Los materiales ferromagnéticos se caracterizan por tener los nombrados dominios magnéticos separados por paredes, denominadas como paredes de Bloch. En cada dominio los vectores magnéticos van en distintas direcciones según su orientación cristalina de magnetización, pero al aplicar un campo magnético creciente externo hacia una dirección, todos los vectores se orientan hacia la dirección del campo magnético aplicado. Además, los dominios magnéticos también sufren un desplazamiento, aunque las impurezas, segundas fases y límites de grano, son puntos de anclaje que dificultan el movimiento de las paredes de los dominios. Puesto que el campo magnético va aumentando su intensidad, llegará un punto donde se superará la fuerza que restringe el movimiento de las paredes. El movimiento de los dominios genera pulsos eléctricos que pueden ser detectados con una bobina de inducción. Estos pulsos se denominan ruido magnético de Barkhausen (Gauthier, Krause, and Atherton 1998). Midiendo la intensidad del ruido magnético se puede determinar la cantidad de tensiones internas del material, si se produce un aumento en la intensidad se debe a que las tensiones internas son a tracción, en cambio si la intensidad disminuye, las tensiones son compresivas (Rossini et al. 2012).

3.3. Medida de tensiones internas por métodos destructivos o semi destructivos

Los métodos destructivos para medir las tensiones internas se basan en el proceso de supresión de material de la muestra a analizar. Por tanto, el principio de funcionamiento consiste en eliminar el equilibrio en las tensiones residuales, mediante seccionar, perforar o eliminar capas de material (Kudryavtsev 2008).

El desplazamiento de las tensiones internas provoca que se generen deformaciones locales en la pieza, alrededor de la zona donde se ha eliminado material. Midiendo la deformación remanente, y utilizando el comportamiento elástico del material, se llega, mediante cálculos aproximados o de elementos finitos, al valor de las tensiones residuales (Kudryavtsev 2008).

Se encuentran distintas técnicas que se usan como métodos destructivos para analizar las tensiones internas: El método de “hole-drilling”, la técnica de “ring core”, el método de deflexión por flexión y el método de seccionamiento.

3.3.1. Técnica de “ring core”

La técnica de “ring core” es muy parecida al método de “hole-drilling”, ya que ambos son un método de análisis de tensiones residuales semi destructivos. En ambos es necesaria la supresión de material, pero en pequeñas cantidades comparándolas con los métodos destructivos.

En el caso del “ring core” se realiza un anillo en la superficie alrededor de unas galgas extensométricas, con las que se mide la deformación remanente al relajar las tensiones internas debido a la perforación de la probeta, como se observa en la Ilustración 4. La ranura anular se puede realizar mediante mecanizado con la cortadora apropiada (Šarga and Menda 2013).

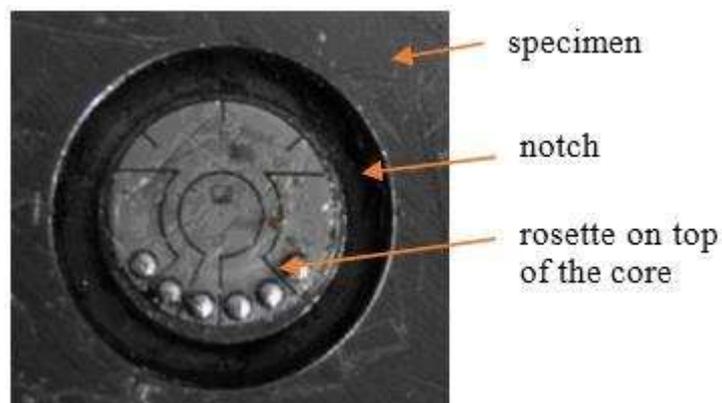


Ilustración 4.- Geometría de ensayo del método de “ring core” (Menda et al. 2014)

3.3.2. Método de “hole-drilling”

El método de medición de tensiones internas por “hole-drilling” es una técnica semi destructiva, ya que la destrucción de material es insignificante y, además, puede ser reparada mediante soldadura, tornillos o un pin (Šarga and Menda 2013). Esta técnica es muy parecida al método de “ring core”, pero en este caso, la perforación es un simple agujero, en vez de un anillo.

Tras suprimir el material, dadas las tensiones internas del material, y romper el equilibrio de éstas, al intentar volver a este estado, se produce una distorsión en el agujero creado. Se mide la deformación y, mediante cálculos o elementos finitos, se puede extraer el valor de tensiones residuales. Para medir la deformación se puede utilizar galgas extensométricas o métodos ópticos. Los métodos ópticos de medición, al ser significativamente recientes, no son muy utilizados actualmente. Además, no están normalizados, a diferencia del método con galgas extensométricas que se recoge en la norma ASTM.

Los métodos ópticos se fundamentan en el principio de observar con cámaras la deformación producida alrededor del agujero. El proceso consta de 6 etapas: En la primera etapa se calibran las cámaras, tomando fotos (40 fotos ya sería suficiente para garantizar una calibración adecuada) a una pieza con un patrón de agujeros que detectarán las cámaras para saber el espacio donde se realizará la medida.

Posteriormente, se aplica a la pieza una capa de pintura a la superficie, con un patrón que detectará la cámara, este patrón es una capa de pintura blanca con puntos de pintura negros. A continuación, se

realiza una fotografía a la superficie. Después, se perfora la superficie con el taladro y se toma otra fotografía. Con las fotografías, la cámara detectará el desplazamiento de los puntos negros al realizar el agujero. Finalmente, se procesan las imágenes en el software, primero las imágenes de calibración y después las imágenes antes y después de la perforación. El software calculará las deformaciones producidas alrededor del agujero.

Por otro lado, los métodos con galgas extensométricas se basan en utilizar galgas extensométricas adheridas en la superficie y alrededor del agujero, para medir las deformaciones. Este proceso está normalizado por la norma ASTM E837-08 (ASTM International 2008). En la norma, previamente a calcular las tensiones, se calculan las constantes de calibración (Ecuación 6 y Ecuación 7) a partir de la geometría utilizada al colocar las galgas extensométricas.

$$\bar{A} = -\frac{(1+\nu)}{2E}\bar{a} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$\bar{B} = -\frac{1}{2E}\bar{b} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Siendo E el módulo elástico del material, ν el coeficiente de Poisson y \bar{a} y \bar{b} los coeficientes de calibración adimensionales que dependen de la configuración de las galgas. Los coeficientes se extraen de la Tabla 3 de la normativa ASTM (ASTM International 2008).

Tras tener las constantes, y a partir de las deformaciones obtenidas con las galgas, se calculan las tensiones (Ecuación 8).

$$\sigma_{x,y} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4\bar{A}} \pm \frac{\sqrt{2}}{4\bar{B}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Siendo \bar{A} y \bar{B} los coeficientes de calibración, ε_1 , ε_2 y ε_3 las deformaciones a 0°, 45° y 90°

3.3.3. Método por eliminación de capas

El método de medición de tensiones residuales por eliminación de capas se basa en eliminar las capas superficiales de la probeta. Al quitar estas capas superficiales, se rompe el equilibrio en las tensiones internas y para regresar al equilibrio se genera una curvatura en la muestra. Después de eliminar una capa se mide la curvatura utilizando métodos ópticos y, dado que la curvatura dependerá de las tensiones que tenía la probeta y de las propiedades elásticas del material, mediante cálculos simples, se pueden calcular estas tensiones internas. El esquema del proceso se muestra en la Ilustración 5.

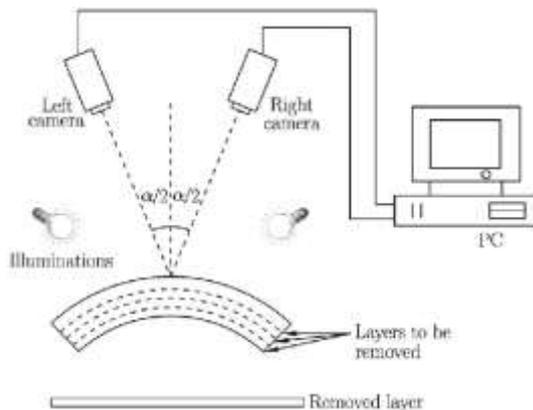


Ilustración 5.- Diagrama esquemático del método de medida de tensiones residuales por eliminación de capas (Huang, Liu, and Xie 2013)

Hay que destacar ciertos criterios a tener en cuenta para realizar este método correctamente. Las capas eliminadas deben ser de un espesor pequeño, ya que, en caso contrario, se generaría inestabilidad mecánica y la curvatura podría ser multiaxial, en vez de ser uniaxial (Eijpe and Powell 1997). La geometría de la probeta es necesaria que sea plana en superficie y simple para evitar la curvatura multiaxial, puesto que las tensiones internas no se encontraban en el equilibrio.

3.3.4. Método de seccionamiento

El método de análisis de tensiones internas por seccionamiento consiste en cortar la sección de la probeta en pequeñas tiras (Yang et al. 2017). Tras realizar los cortes, debido a las propias tensiones internas, las probetas cortadas, sufren una expansión, ya que, al seccionar, se rompe el estado de equilibrio tensional y se relajan. Entonces, para recuperar ese equilibrio, la probeta se expande.

Calculando la diferencia de longitudes justo después de cortar, y tras la expansión, se determina la deformación mediante la Ecuación 9.

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_i}{L_i} - \frac{L_{Tf} - L_{Ti}}{L_{Ti}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Siendo L_f la longitud medida por la galga después de cortar, L_i la Longitud medida por la galga antes de cortar, L_{Tf} la longitud final medida por la galga de la tira de referencia y L_{Ti} la longitud final medida por la galga de la tira de referencia

A partir de la deformación medida y usando la ley de Hooke del comportamiento elástico, se calcula el valor de tensión con la Ecuación 10.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{Ecuación 10})$$

Siendo σ el valor de tensión, E el módulo elástico y ε la deformación.

Para facilitar los cálculos se desprecia las deformaciones tangenciales, únicamente se tiene en cuenta las deformaciones longitudinales (Huang, Liu, and Xie 2013; Može et al. 2014). Por tanto, se trata de un método económico, sencillo y rápido de realizar, si se tiene el cuidado necesario en la preparación de la muestra y el proceso de medida (Huang, Liu, and Xie 2013).

4. Proceso de deformación incremental

La tecnología de conformado por deformación incremental se basa en el principio de deformar una plancha plana de metal hasta obtener una geometría 3D. Estos procesos han experimentado una evolución durante los últimos años para el diseño de prototipos o piezas a pequeña escala. (Suntaxi et al. 2019). En este proyecto, las probetas han sido laminadas por el método de “shear spinning” con geometría cónica.

En este proceso, se parte de una pieza metálica plana en forma de disco con un agujero en el centro. La pieza se coloca en la máquina DENN y mediante la rotación de un mandril y la rotación del cilindro, aportan la geometría cónica de las probetas a analizar. En la Ilustración 6 se esquematiza el proceso de “shear spinning” junto a sus parámetros. Modificando el ángulo de contacto del mandril, se consigue diferentes ángulos en la geometría cónica. En este trabajo, como se ha comentado, se desarrolla a 11,13 y 15°, siendo este el ángulo límite en el que se ha conseguido laminar, lo que implica una reducción del espesor del 75% (Coyoy, Elizalde and Cabrera 2021).

Los procesos de “shear spinning” comportan beneficios en comparación con los métodos de laminación convencionales. En primer lugar, suponen un ahorro de material importante, ya que solo despazan el material, no eliminan material. La laminación provoca la formación de un gradiente de textura en todo el espesor, por tanto la orientación de los granos causa un aumento a la resistencia mecánica de la pieza. Esta textura, además, aporta un buen acabado superficial.

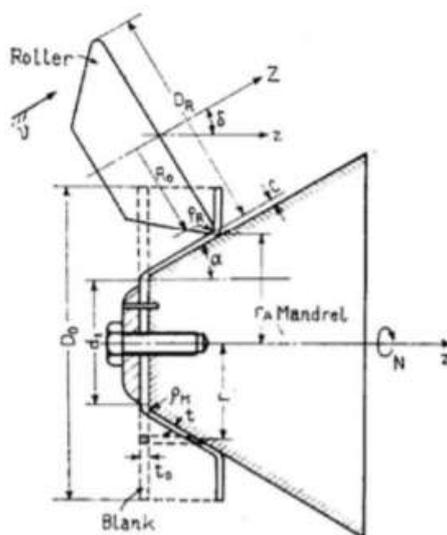


Ilustración 6.- Esquema del proceso de "shear spinning" (Hayama, Murota, and Kudo 1965)

5. Método de “hole-drilling” para medir tensiones internas por correlación de imagen digital (DIC)

En el presente trabajo se utiliza el método de “hole-drilling” combinado con la técnica de correlación de imagen digital (DIC, por sus siglas en inglés) en 3-D para medir las tensiones internas de probetas laminadas en geometría cilíndrica y cónica.

El método de “hole-drilling”, tal y como se comentó anteriormente, consiste en realizar un agujero, en el centro de la probeta, de 1-4 mm de diámetro y la misma distancia de profundidad (Jian 1996). El agujero es aconsejable que se elabore por tramos de 0.05mm a 0.12mm, en vez de agujerear de golpe, de este modo, se desemboca al método de “incremental hole-drilling” (Jian 1996). Con este método se obtienen mejores resultados, ya que se analiza más en detalle las tensiones residuales en todo el espesor, pero en probetas que se conozca que presenten un gradiente de tensiones internas elevado no se recomienda el uso de este método. Puesto que, en la mayoría de los casos, no se conoce la distribución de tensiones y, a pesar de la posibilidad de que se presente un gradiente de tensiones, el método de “incremental hole-drilling”, sigue siendo el que se aplique en todos los casos.

Tras perforar el material, se rompe el estado de equilibrio tensional y, al querer regresar a este estado, genera una distorsión en el agujero. Midiendo la deformación y a partir de ecuaciones se extrae el valor de las tensiones internas.

El método de “hole-drilling”, dado que se basa en la eliminación de elevadas cantidades de material, las micro tensiones internas de tipo II i tipo III son negligibles, ya que la escala en que se encuentran es muy pequeña. Por tanto, únicamente se medirán las macro tensiones internas o de tipo I.

El procedimiento habitual, para medir las deformaciones, es mediante galgas extensométricas en una determinada posición alrededor del agujero. Las galgas deben medir la deformación en todas las direcciones posibles La posición se detalla en la esquematización de la Ilustración 7.

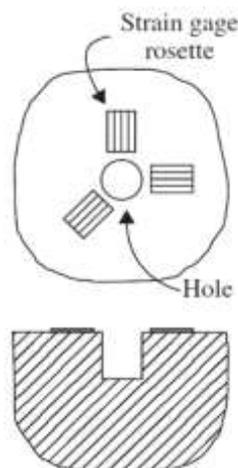


Ilustración 7.- Diagrama de la posición de las galgas extensométricas para medir la deformación alrededor del agujero (Šarga and Trebuña 2016)

Las condiciones de ensayo siguen la normativa ASTM-E837-08 (ASTM International 2008), donde especifica todos los pasos a seguir, tanto tamaños del agujero como la posición de las galgas extensométricas.

Por otro lado, en este caso, no se utiliza las galgas como medidores de deformación, sino que se utiliza el método de DIC. Durante los últimos años, se han realizado estudios para utilizarlo como método para medir las tensiones internas después del proceso de “hole-drilling”. De este modo, se sustituye el uso de las galgas, las cuales son un método ya obsoleto y, además, es necesaria la correcta alineación entre ellas.

El funcionamiento de la técnica de DIC combinado con el método de “hole-drilling”, consiste en medir la deformación alrededor del agujero, provocada por la relajación de las tensiones internas de la probeta. Para medir la deformación se utilizan cámaras que registran dos fotos, una previa al proceso de “hole-drilling” y una después. Por lo que se podrá obtener la modificación que ha sufrido el agujero, al comparar las dos imágenes. Para ello, se pinta una capa de puntos aleatorios en la superficie (Véase Ilustración 8), con el cuál las cámaras detectan el movimiento de los píxeles, y, por tanto, se extrae la deformación.

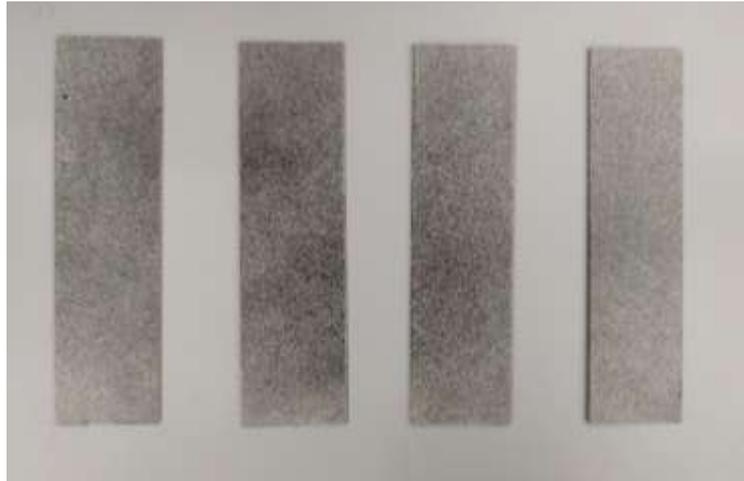


Ilustración 8.- Patrón utilizado en la superficie de las probetas para medir la deformación, a partir del método DIC

6. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental se basa principalmente en dos etapas: calcular las tensiones residuales mediante el método de “hole-drilling”, complementado con la medición de las deformaciones mediante el sistema de correlación de imagen digital (DIC). Y como segunda etapa, se verifican y comparan los resultados obtenidos por el método de “hole-drilling” con una simulación numérica por elementos finitos. En primer lugar, es necesario realizar un ensayo de validación. Par ello se realizaron diferentes ensayos de tracción a diferentes porcentajes de alargamiento, sin llegar a romper el material, para así calcular y comparar las tensiones internas con las obtenidas de las simulaciones numéricas bajo las mismas condiciones.

Finalmente, una vez que se ha obtenido la validación del método de “hole drilling” complementado con el sistema de correlación de imagen digital, se repite este proceso para calcular las tensiones residuales en probetas que han sido procesadas mediante a laminación cónica a distintos ángulos respecto el eje, a 11º, 13º y 15º. Con los resultados, se presenta el efecto que tiene el ángulo de laminación con las tensiones residuales introducidas.

6.1. Materiales y equipo

Para realizar la medición de las tensiones residuales se realizó el montaje del sistema de correlación de imagen digital en una estructura de aluminio, donde se disponen las cámaras con el foco en la zona que se quiere analizar de la pieza previamente procesada por laminación cónica. El montaje del equipo utilizado se muestra en la Ilustración 9.

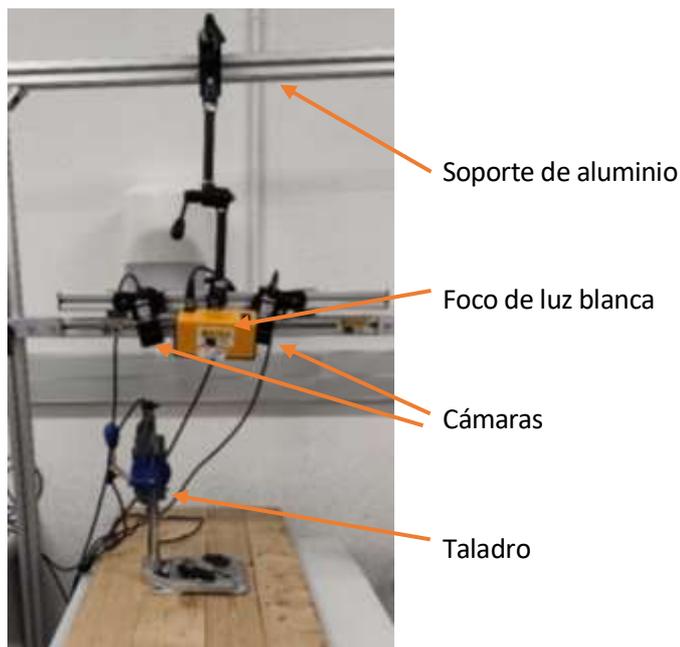


Ilustración 9.- Montaje del equipo utilizado para el "hole-drilling" combinado con el método de DIC

El montaje consta de 3 elementos esenciales para medir las deformaciones. En primer lugar, se necesita de un taladro para realizar el agujero. En este caso se utiliza una broca de 1.5mm de diámetro. Otro elemento importante es el foco de luz blanca, para focalizar la luz adecuadamente sobre la superficie de las probetas y que las cámaras lean el patrón pintado superficial. El foco de luz utilizado se trata de la marca GS VITEC de modelo Multiled PT-V9 con una potencia de 84W y 7.700lm. (GSVitec, n.d.).

Finalmente, el elemento más importante son las cámaras Basler, modelo aCA2440-75um, las cuales puede tomar fotografías a 75 fotogramas por segundos y a 5MP (Basler 2021).

La hoja de datos del equipo empleado en el montaje se presenta en el Anexo A.

Por otro lado, el material utilizado se trata del acero DC-04, el cual es un acero para embutición y laminación en frío debido a su excelente ductilidad. Las principales propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 1, dichos datos se han extraído al realizar el ensayo a tracción para añadir tensiones residuales a las muestras (véase Ilustración 10).

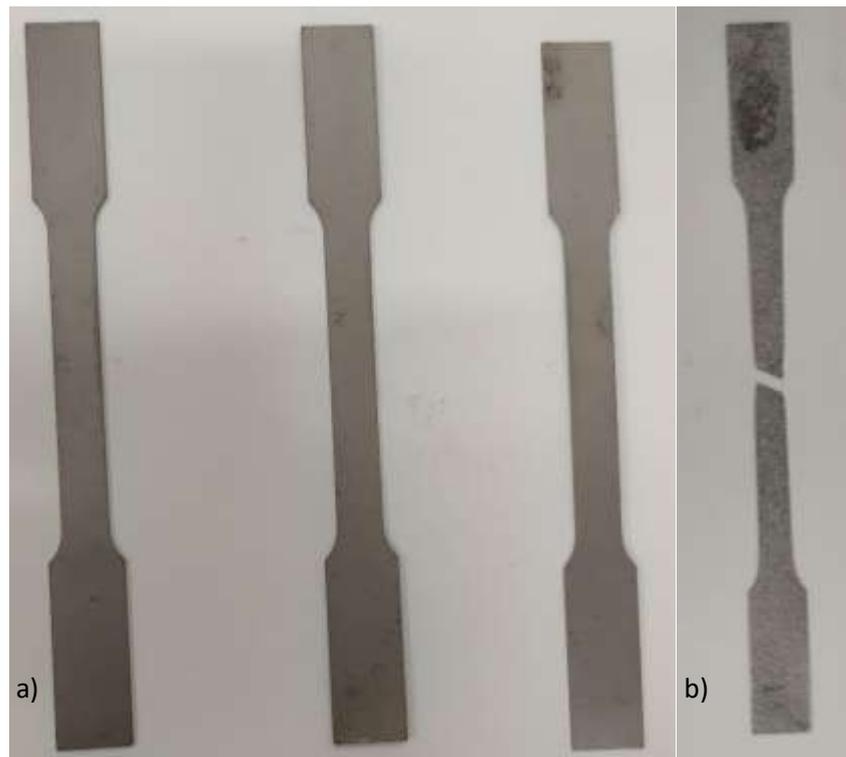


Ilustración 10.- Probetas sometidas a tracción a) Antes de romper b) Tras romper

La geometría de las probetas sigue la normativa ASTM E8M-00b (American National Standard 2000). Además, en el Anexo B se inserta el plano con las medidas de las probetas.

Durante todo el proceso del ensayo a tracción, se ha realizado un análisis video-extensométrico para tener un seguimiento de la deformación y poder extraer las curvas tensión-deformación. En la Ilustración 11 se presenta el diagrama tensión-deformación del acero, con el cual se ha extraído las propiedades mecánicas.

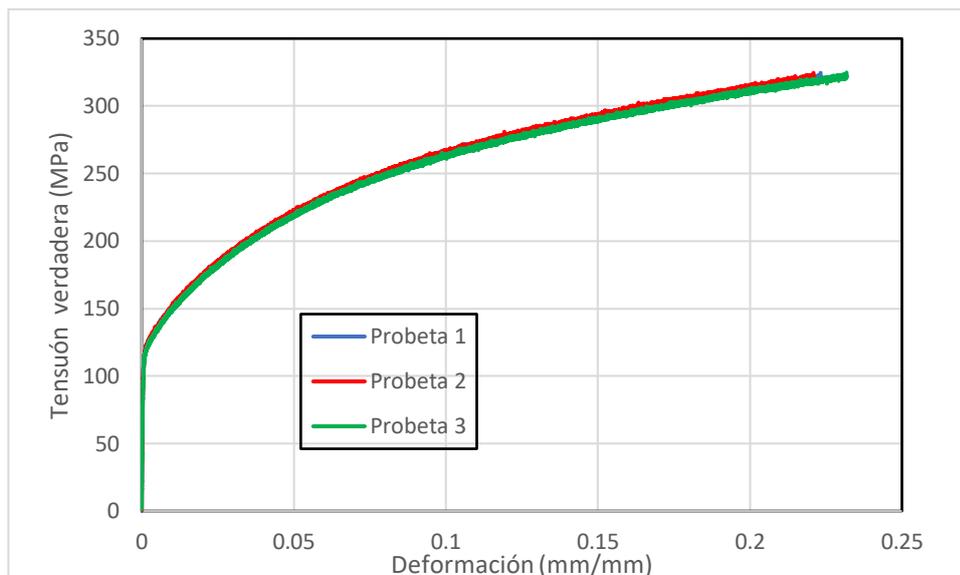


Ilustración 11.- Diagrama tensión-deformación del acero DC-04

Para calcular la deformación necesaria para la simulación de laminación cónica, se utiliza la Ecuación 11 para calcular la deformación de von Mises, a partir de la deformación cortante, asumiendo que se trata de un proceso cortante perfecto.

$$\varepsilon = \frac{\cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\sqrt{3}} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Siendo ε la deformación de von Mises y α el ángulo de laminación (11,13 y 15°).

La deformación de von Mises calculada para los ángulos de laminación de 11, 13 y 15° es de 2.97, 2.50 y 2.15 mm/mm.

En este caso, además, se presenta plasticidad. Por tanto, para predecir este hecho, se utiliza la ecuación de Hollomon (Ecuación 12)

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (\text{Ecuación 12})$$

Siendo σ el valor de esfuerzo a una determinada deformación, K el coeficiente de endurecimiento, ε la deformación de von Mises y n el exponente de endurecimiento.

Para extrapolar el comportamiento elástico hacia la deformación insertada en la simulación se utiliza la Ecuación 13, graficando los resultados a tracción en escala logarítmica y excluyendo la zona elástica. A continuación, se realiza una regresión cuya pendiente será el exponente de endurecimiento (n) y la exponencial de la ordenada al origen, el coeficiente de endurecimiento (K).

$$\log(\sigma) = \log(K) + n \log(\epsilon) \quad (\text{Ecuación 13})$$

El coeficiente de endurecimiento K equivale a 457 ± 1 MPa y el exponente de endurecimiento equivale a 0.2398 ± 0.0014 .

Con estos valores, y utilizando la Ecuación 12, se extrapola la zona plástica hasta la deformación determinada anteriormente (véase Ilustración 12).

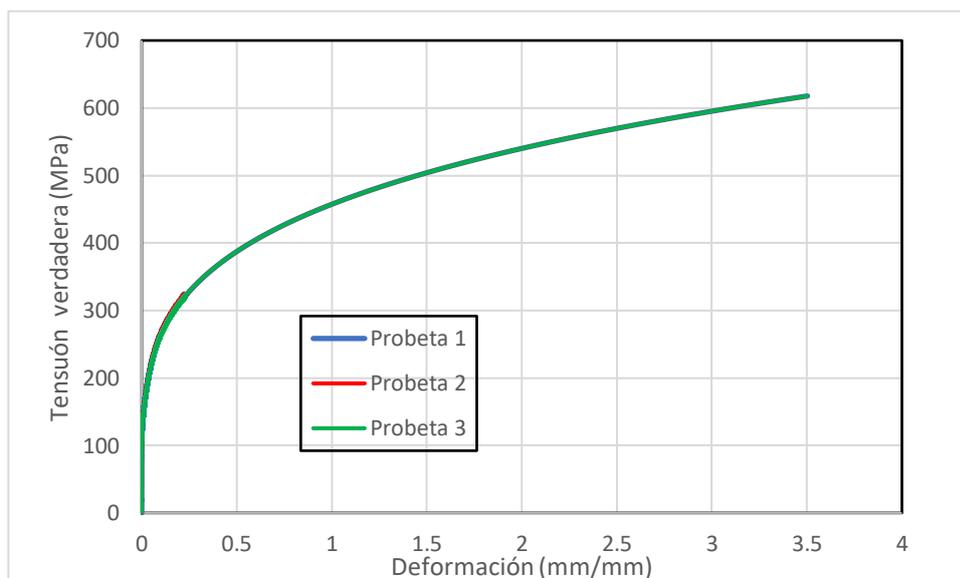


Ilustración 12.- Curva tensión-deformación del acero DC-04 extendida

La progresión de la gráfica de la Ilustración se inserta en el software para simular el comportamiento del material durante la simulación de la probeta a tracción y de la laminación cónica.

Tabla 1.- Propiedades mecánicas del acero DC-04

Módulo elástico (GPa)	Límite elástico (MPa)	Esfuerzo a rotura (MPa)	Elongación a rotura (%)
210	108.67	310	50

6.2. Verificación del método

6.2.1. Método teórico

La simulación se ha realizado mediante el software comercial Abaqus/Explicit, en el cual se ha diseñado una chapa de dimensiones iguales a las utilizadas en el método práctico.

Las probetas son rectangulares y las medidas son de 151.47 x 40.26mm. En la Ilustración 13 se muestra la probeta diseñada en el software Abaqus/Explicit.

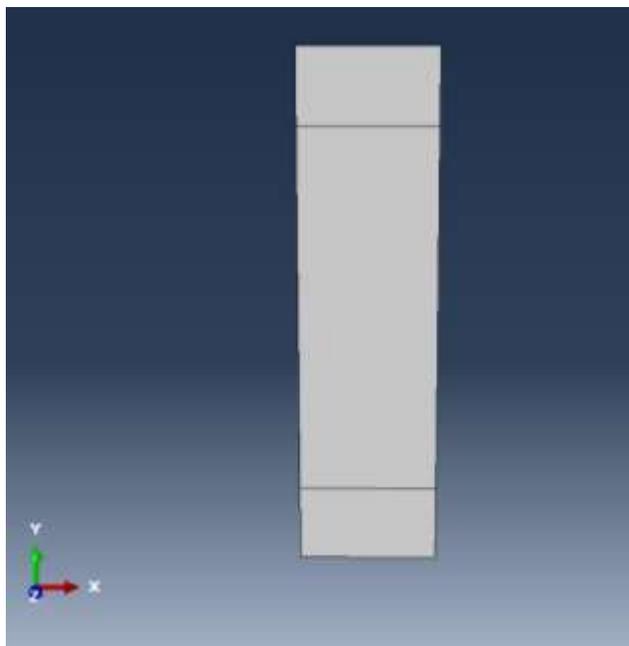


Ilustración 13.- Probeta rectangular representada en Abaqus

A continuación, para simular las condiciones de añadir las tensiones residuales, la probeta será sometida a deformación axial. Para ello, se fija el extremo superior y se estira el extremo inferior para aplicar esfuerzos de tracción, de este modo, se simula el ensayo de tracción mecánico. En la Ilustración 14 se representa las condiciones comentadas.

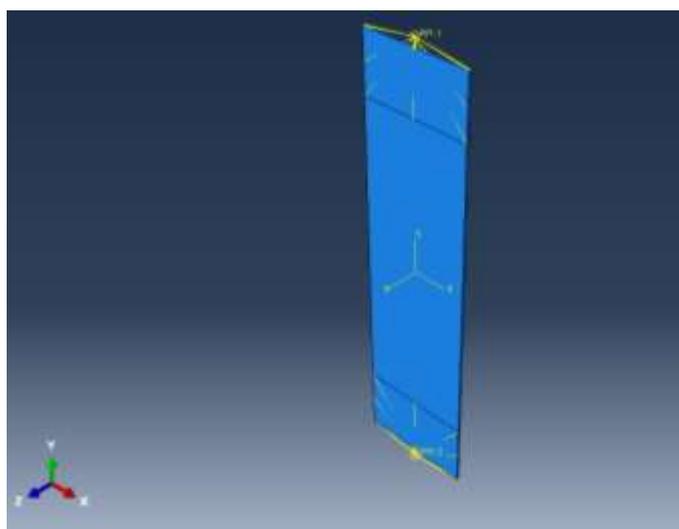


Ilustración 14.- Condiciones de tracción en la probeta simuladas con Abaqus

Los pasos realizados consisten en desplazar el extremo inferior hasta -28.24 mm, de igual manera que en el método práctico, y posteriormente se libera el extremo inferior, por lo que se relaja la probeta. En la Ilustración 15 se muestra una comparación de la probeta antes y después de deformar.

Antes de proceder con el ensayo de tracción, se aplica un mallado con lo que el software calculará las diferentes variables, en este caso tensiones en la dirección “x”, “y” y la tensión equivalente de von Mises. La malla aplicada está constituida por 9702 nodos y 7600 elementos hexaédricos de tipo C3D8R. En la Ilustración 15 se puede apreciar la malla generada.

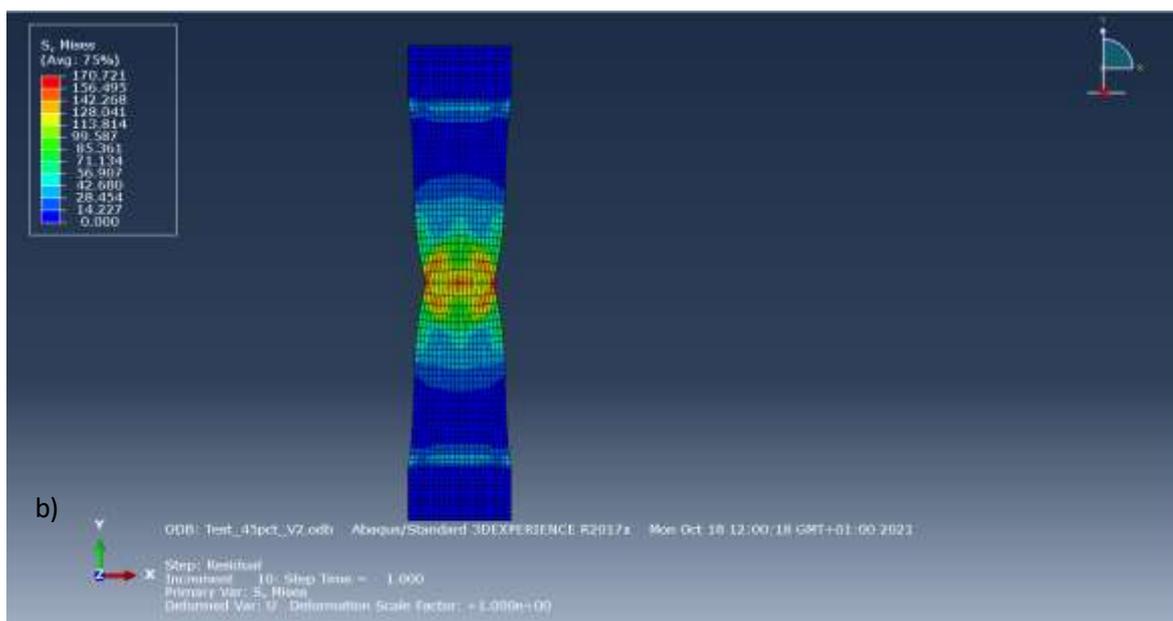
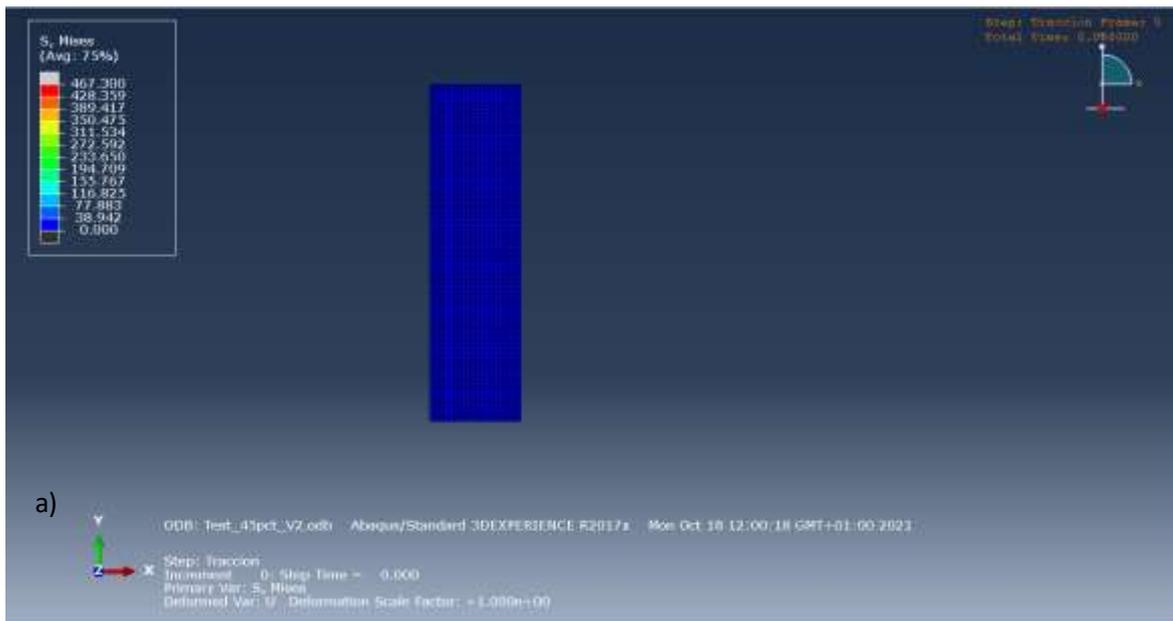


Ilustración 15.- Comparación de las probetas antes (a) y después de deformar (b)

A continuación, se muestra el mapa de colores de la probeta después del esfuerzo de tracción (antes de la relajación inducida) y después de liberar el extremo inferior. En la Ilustración 16 e Ilustración 17 se enseña ambos mapas de colores respectivamente.

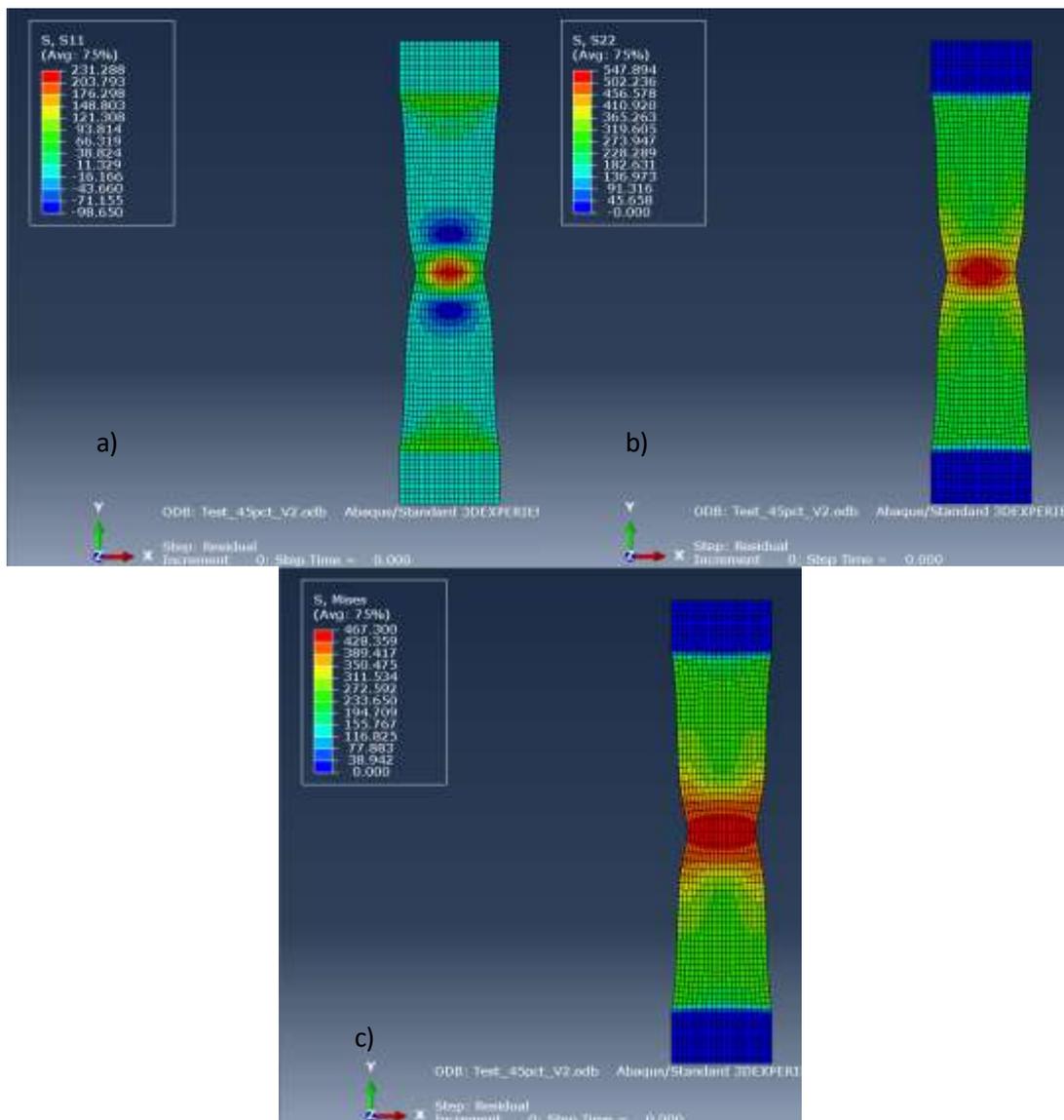


Ilustración 16.-Simulación de las probetas deformadas al 45% con mapa de color. a) Tensiones residuales en la dirección x b) Tensiones residuales en la dirección z c) Tensiones residuales von Mises

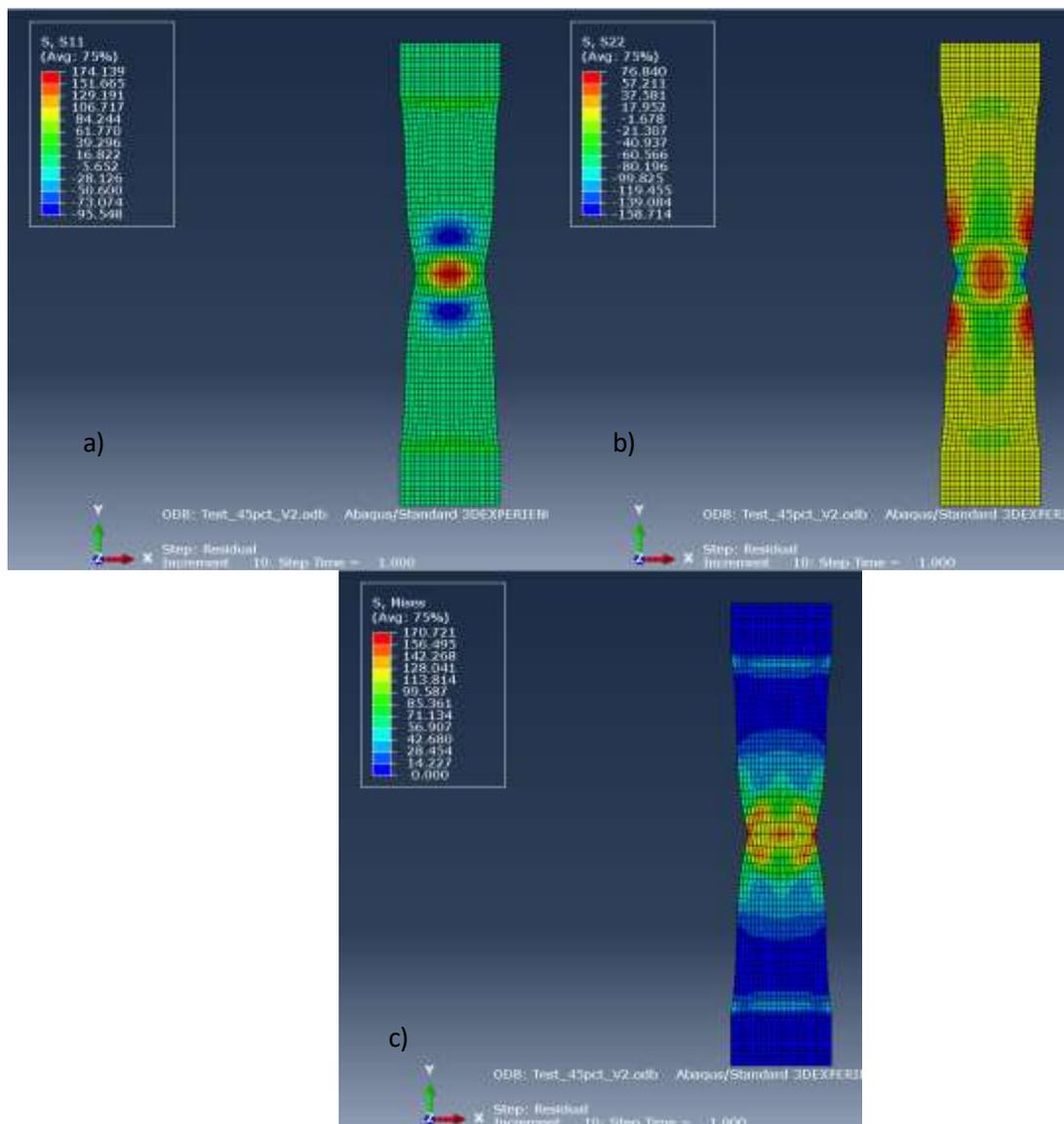


Ilustración 17.- Simulación de las probetas al liberar el extremo inferior con mapa de color. a) Tensiones residuales en la dirección x b) Tensiones residuales en la dirección z c) Tensiones residuales von Mises

En la Ilustración 16, se observa que las tensiones, en la zona céntrica de la probeta, son muy elevadas, ya que se concentran más las tensiones dada la geometría de la probeta. Se genera estricción al aplicar esfuerzos de tracción, por tanto, se encuentra más deformación.

Al liberar el extremo inferior, y provocar una relajación de la probeta, la deformación elástica remanente, vuelve a su punto inicial, dejando únicamente la deformación plástica, la cual deja la probeta con las dimensiones finales (véase Ilustración 17). Con este efecto se provoca que la probeta mantenga tensiones remanentes. Estas tensiones residuales son las que se van a extraer para compararlas con las obtenidas en el método práctico.

Los esfuerzos residuales se miden en 3 puntos (véase Ilustración 19), los mismos puntos en los que se perfora la probeta en el método práctico. De este modo, se compara los esfuerzos con un método teórico y el método práctico, para validar si el método proseguido es correcto. En la Tabla 2 se presentan los valores de esfuerzo para cada punto.

Tabla 2.- Tensiones residuales medidas en la simulación en las probetas sometidas a tracción, deformadas con un alargamiento de 45%

	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)
Punto 1	171.37 ± 2.28	48.64 ± 0.75
Punto 2	8.9 ± 1.2	-10.3 ± 2.7
Punto 3	-19 ± 7	-48.85 ± 7.32

Los resultados de la Tabla 2 muestran que los puntos más alejados del centro presentan esfuerzos residuales menores. Dadas las condiciones, los valores son los esperados, ya que en la zona céntrica se espera valores de esfuerzo mayores, debido a la alta deformación presente. Por otro lado, las zonas alejadas revelan una menor deformación y, por tanto, menores esfuerzos residuales.

Además, en el punto 3, se aprecian que los esfuerzos residuales están sometidos a compresión, a diferencia de los otros puntos, que están sometidos a tracción.

6.2.2. Método práctico

6.2.2.1. Preparación de las probetas

Por otro lado, se emplea un método práctico para calcular las tensiones residuales y poder comparar las obtenidas mediante el método teórico y el práctico. De este modo, se asegura que ambos procesos están correctamente desarrollados.

Este método consiste en simular las condiciones de un estado tensional en unas probetas físicas del mismo material de las que posteriormente, se van a medir las tensiones residuales. De tal forma que, se han cortado cuatro probetas de la plancha de acero DC-04 las cuales serán sometidas a un ensayo de tracción y, posteriormente mediante el método de "hole-drilling" se miden las deformaciones para calcular las constantes de calibración. Las probetas tienen unas medidas de 150x40x0.8mm.

Tras cortar las probetas se ha pulido la rebaba utilizando una pulidora rotatoria automática y un disco abrasivo de grano 80, dado que hay que eliminar las imperfecciones que se generan a causa del proceso de corte. Una vez se ha eliminado el material sobrante, se aplica una capa de pintura superficial para implantar el patrón mostrado en la Ilustración 8 que, el software de captura de imágenes, VIC-Snap, leerá las deformaciones sufridas en la probeta tras realizar el agujero.

A continuación, se procede con el ensayo a tracción para generar tensiones internas en el material. En primer lugar, se utiliza una probeta para determinar hasta que deformación a la rotura es capaz de llegar el material. De este modo, las otras tres probetas se podrán deformar a diferentes valores de deformación, pero sin llegar a la rotura, únicamente dejar tensiones internas en la probeta. Al tener diferentes valores de deformación en distintas probetas se obtendrán unos resultados significativos. La deformación a rotura de la primera probeta ha sido del 50%, por tanto, las otras tres probetas se han deformado hasta un 15,30 y 45%. En la Ilustración 18 se presenta una foto de las probetas tras realizar el ensayo a tracción.

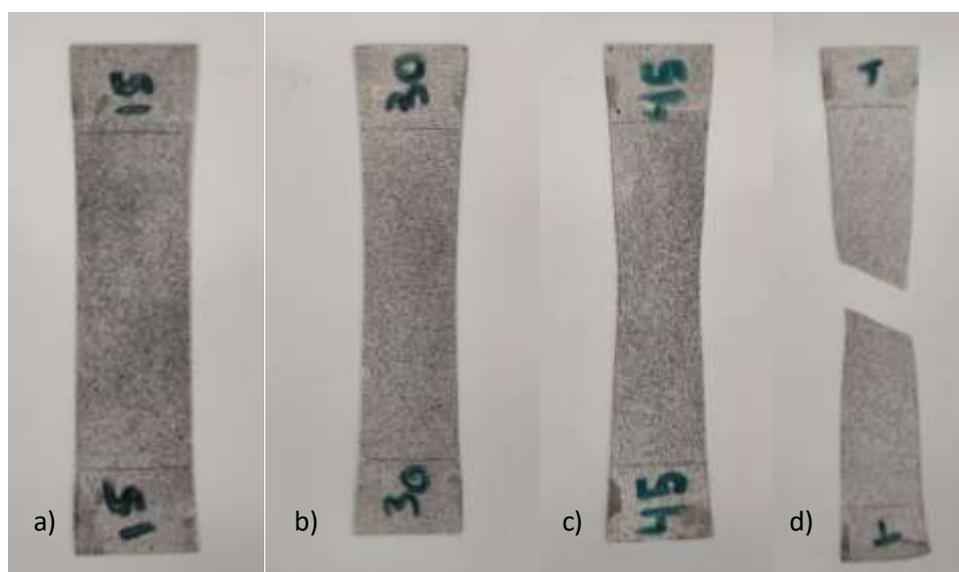


Ilustración 18.- Probetas ensayadas a tracción. a) deformación al 15% b) deformación al 30% c) deformación al 45% d) rotura

6.2.2.2. Proceso de “hole-drilling” con DIC

Una vez se tienen las probetas deformadas, se realiza el proceso de “hole-drilling” con el método de DIC. Seguidamente, hay que calibrar la zona de medida del equipo, utilizando una pieza con un patrón de agujeros que serán detectados por las cámaras mediante fotografías, realizadas por el software VIC-Snap, rotándola ligeramente, pero siempre mostrando el patrón de agujeros a las cámaras. Para finalizar la calibración, se utiliza el software VIC-3D, en el que se suben las fotos realizadas y calibrará la distancia entre las cámaras para determinar el espacio de medida.

Finalmente, se procede a calcular las tensiones residuales. Dadas las limitaciones de tiempo, únicamente se emplea la probeta deformada a 45%, ya que se obtendrán las tensiones más grandes. El procedimiento de medida se utiliza una mezcla del método óptico y del método con galgas extensométricas. En primer lugar, se fotografía la superficie de la probeta a analizar, antes de agujerearla. Cabe destacar que, es necesario esperar un tiempo antes de tomar la fotografía para asegurar que la foto no esté movida, ya que la estructura metálica no estaba fija.

Seguidamente se conecta el taladro y se le realiza un agujero en el centro de la probeta, además, para obtener diferentes puntos de medida, se ha realizado 2 agujero más (véase Ilustración 19). Por último, se toma una última fotografía de la superficie.



Ilustración 19.- Puntos de medida en la probeta deformada a 45%

6.2.2.3. Cálculo de tensiones residuales

Para calcular las tensiones residuales de la probeta, se adjuntan las imágenes tomadas antes y después del agujero, al software VIC-3D. El mismo software realizará los cálculos, de la zona de análisis seleccionada, mediante elementos finitos y devolverá un gráfico por colores de la superficie analizada con sus valores de los parámetros correspondientes. El gráfico obtenido para un agujero realizado en la probeta deformada al 45% se presenta en la Ilustración 20 .

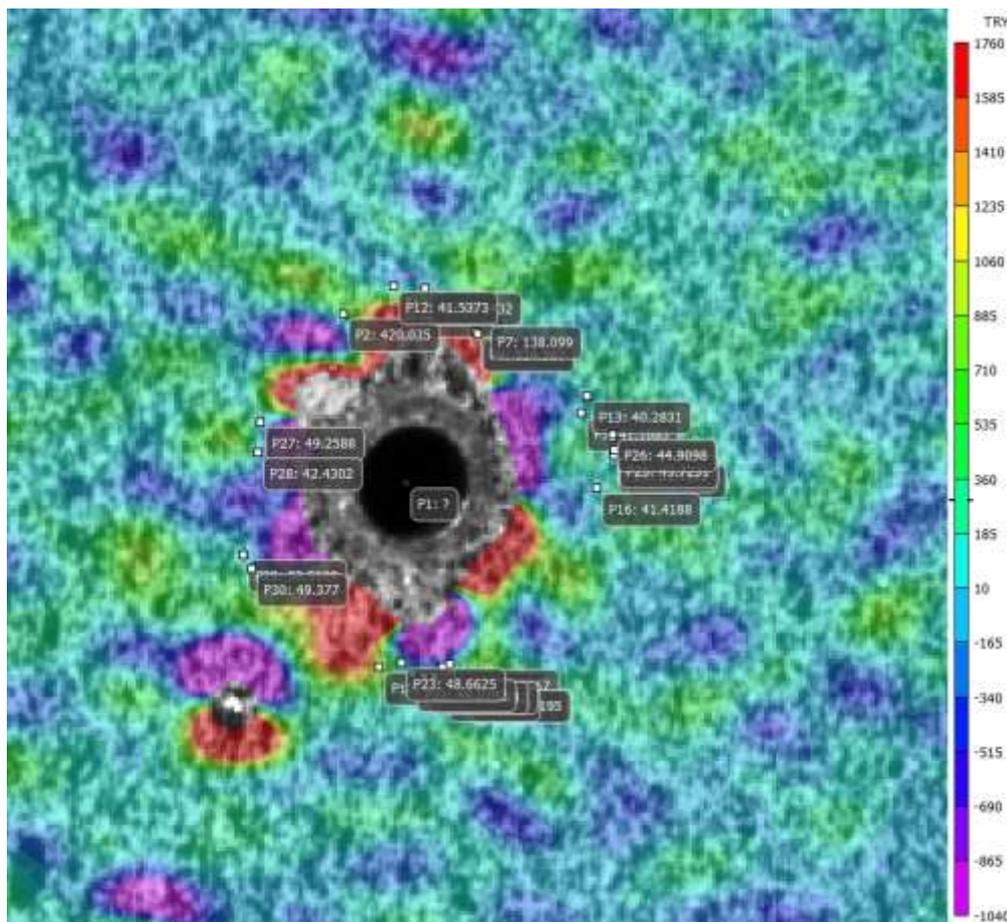


Ilustración 20.- Gráfico de la distribución de tensiones residuales en la dirección y de la superficie de la probeta deformada al 45%.

Para tomar los valores de tensiones residuales, se utiliza el planteamiento de medir con marcadores, los esfuerzos alrededor del agujero, pero que se encuentren a la misma distancia respecto al centro. La geometría con el radio dibujado se expone en la Ilustración 21.

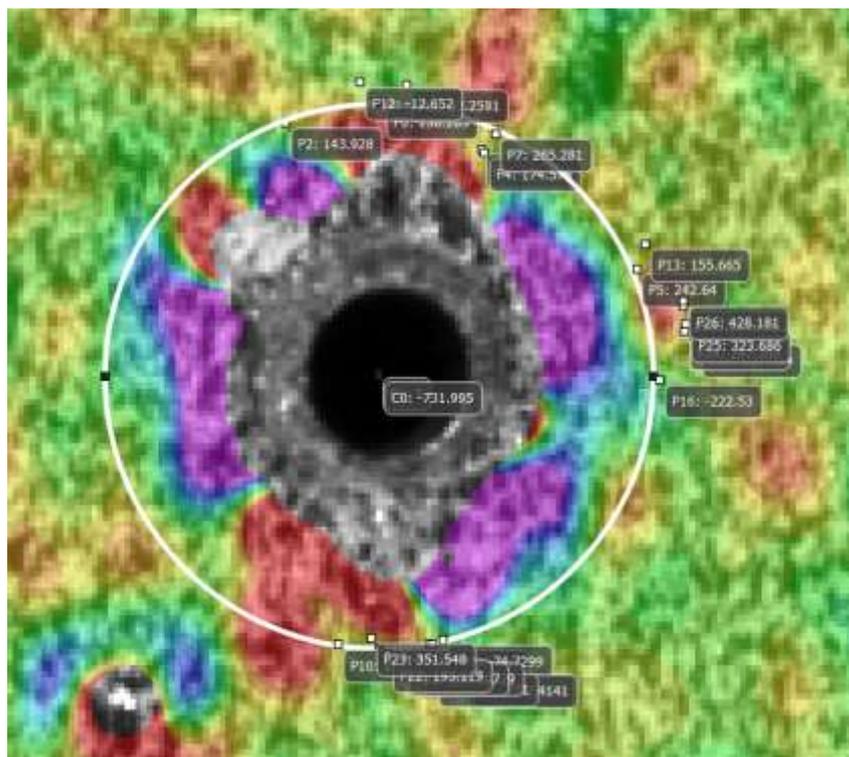


Ilustración 21.- Geometría de medición utilizado para medir los esfuerzos

Es importante destacar que la distancia en la que se miden los esfuerzos tiene un efecto en la precisión de las medidas. Al estar cerca del agujero, la deformación plástica tiene un efecto mayor que en zonas alejadas al agujero (Šarga and Trebuña 2016). El método tiene más precisión a $2-2.5r_0$ (Peng et al. 2021). Por limitaciones del software, impedía la colocación de las galgas a las distancias con mayor precisión, como se observa en la Ilustración 20, por exceso de deformación plástica en la zona cercana al agujero o por material desprendido durante la perforación.

En el trabajo, para calcular las tensiones residuales se utiliza las ecuaciones desarrolladas por el artículo redactado por M. Sebastiani (Sebastiani et al. 2014).

$$\sigma_{xx} = -\frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_{xx} + \nu\epsilon_{yy}) \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$\sigma_{yy} = -\frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_{yy} + \nu\epsilon_{xx}) \quad (\text{Ecuación 15})$$

Siendo E, el módulo de Young; ν el coeficiente de Poisson; ϵ_{xx} y ϵ_{yy} las deformaciones en las direcciones x e y.

A continuación, se calculan las tensiones en la dirección “x” e “y” para los 3 agujeros. Se realiza una media aritmética de las tensiones incluidas en el mismo radio para extraer un valor único para cada punto. Por ende, se introducen la Ecuación 14 y Ecuación 15 en el software VIC-3D para extraer directamente el valor de esfuerzo en el mapa de colores. Las tensiones calculadas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.- Tensiones residuales medidas en las probetas sometidas a tracción, deformadas a 45%

	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Radio (mm)
Punto 1	194.64 ± 60.17	42.75 ± 3.67	2.81 ± 0.17
Punto 2	14.53 ± 5.54	-14.83 ± 6.41	7.06 ± 1.18
Punto 3	-16.90 ± 5.17	-43.40 ± 9.77	6.51 ± 0.79

Los valores negativos corresponden a esfuerzos residuales de compresión, por contrario, los valores positivos corresponden a esfuerzos residuales de tracción. Además, a medida que los puntos se encuentran más alejados del centro de la probeta, los esfuerzos son menores. Por tanto, dada la semejanza de criterio, comentado en los resultados de la simulación, se aceptan como correctos los resultados de la Tabla 3.

Por un lado, se utilizó el método explicado en el apartado de “hole-drilling” comentado en la norma ASTM E837-08 (ASTM International 2008) pero adaptado al DIC. En vez de utilizar galgas extensiométricas de forma física, se simula con el software VIC-3D la misma geometría, como se observa en la Ilustración 21. Aunque por este método, los esfuerzos residuales calculados se alejaban mucho a los valores predichos en la simulación mediante Abaqus. Por consiguiente, se descartó el uso del método de combinar la normativa ASTM con DIC.

Viendo los valores de esfuerzo de la Tabla 3, dado que entran dentro del abanico de resultados esperados a partir de la simulación (véase Tabla 2) realizada en el anterior apartado, se prosigue con este método a calcular las tensiones residuales en laminación cónica.

En la Ilustración 22 se muestra una comparación de los valores de esfuerzo obtenido en la simulación con los obtenidos mediante el método práctico, de la probeta sometida a tracción.

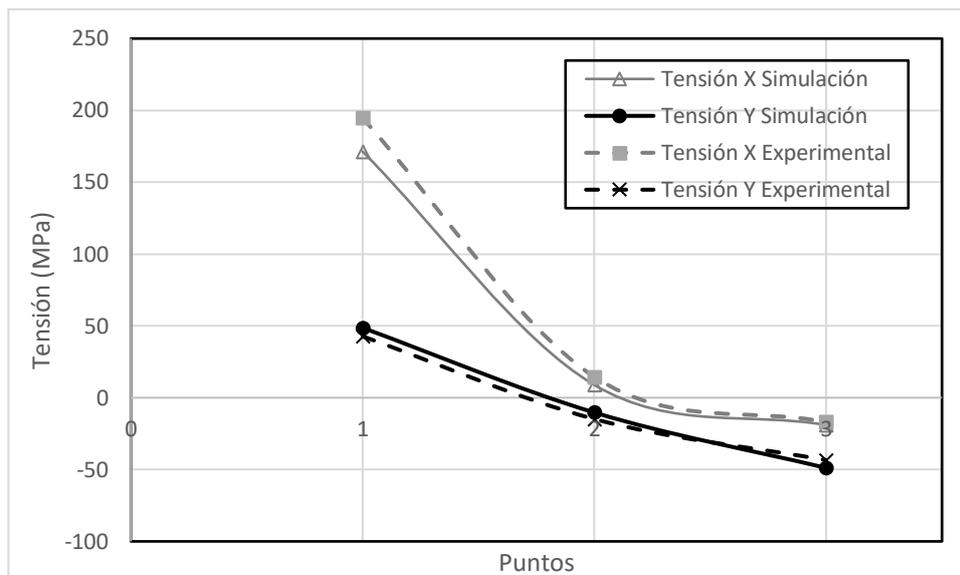


Ilustración 22.- Comparación de los esfuerzos en la dirección "x" e "y" de la simulación con los experimentales

En la Ilustración 22 se observa que los valores experimentales son muy similares a los esperados a partir de la simulación. En el punto 1, dado que es el punto céntrico es donde se concentra más deformación, y los esfuerzos son más elevados. A medida que se aleja del centro, las tensiones van disminuyendo, ya que la deformación también es en menor grado. Este efecto se observa tanto en la simulación como en los experimentales.

En el punto 2 de los esfuerzos de la simulación, dado que se trata del punto más alejado del centro, sus tensiones extraídas de la simulación son muy cercanas al cero, en este punto, las tensiones residuales son mínimas en comparación con el punto 1. En el caso de los resultados experimentales, también se sigue este fenómeno, ya que se ve una disminución de las tensiones desde el punto 1 y se aleja de la zona céntrica.

6.3. Cálculo de tensiones residuales de las probetas laminadas en geometría cónica y cilíndrica

6.3.1. Método teórico

Del mismo modo que en el caso comentado anteriormente, donde se utiliza las probetas planas, ahora ya se simulan las probetas laminadas con geometría cónica a 11,13 y 15°. La simulación se realiza mediante Abaqus y se recrea las condiciones de las probetas salidas de la laminación. Aplicando elementos finitos, el software calcula las tensiones en la probeta, en la dirección x, dirección z (siguiendo el eje de coordenadas dado por Abaqus) y la tensión equivalente o de von Mises. Además, se inserta en el software el valor de deformación de von Mises calculada mediante la Ecuación 11.

Correspondiendo a 2.15, 2.50 y 2.97 mm/mm en el caso de la laminación a 15, 13 y 11° respectivamente.

En la Ilustración 23 se presenta las capturas de la simulación con un mapa de color según el valor de esfuerzo.

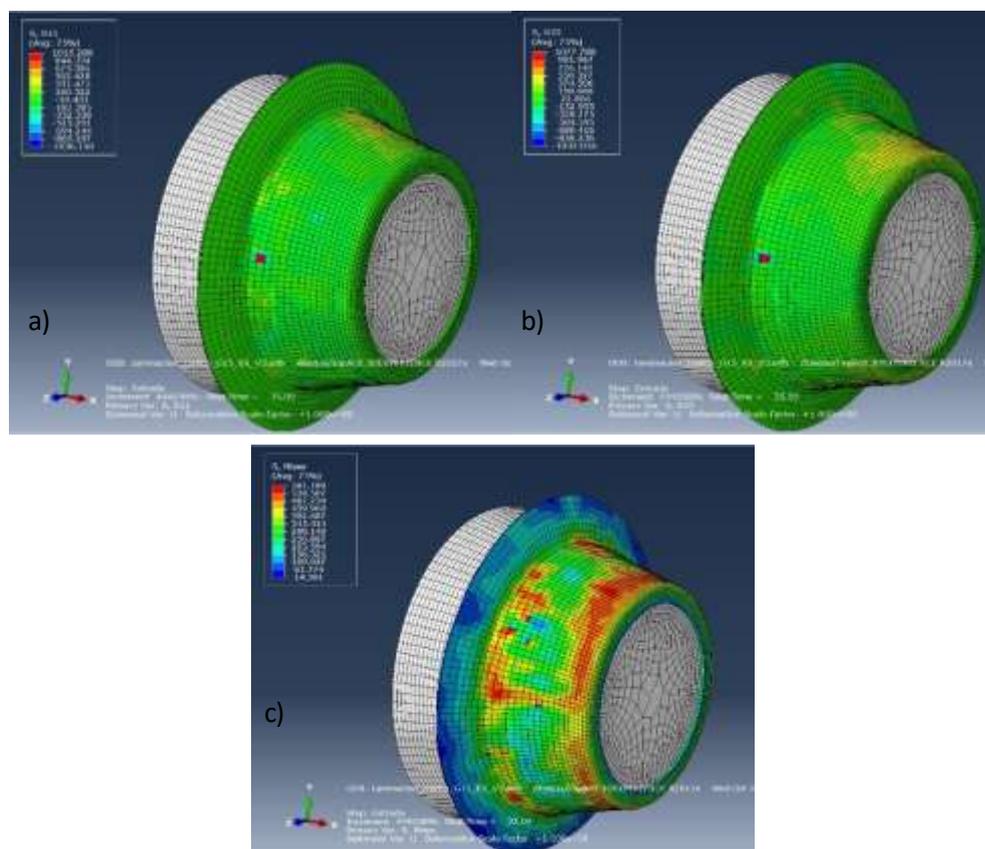


Ilustración 23.- Simulación de las probetas laminadas con geometría cónica a 15° presentadas con mapa de color. a) Tensiones residuales en la dirección x b) Tensiones residuales en la dirección z c) Tensiones residuales von Mises

Finalmente, se extraen los valores de esfuerzo para las probetas a 15° de las zonas donde se realizarán los agujeros. Dichos valores se muestran en la Tabla 4.

Es importante destacar, que las direcciones del eje de coordenadas utilizado en Abaqus, no coincide con las direcciones utilizadas en el método práctico, por lo que hay que convertir las tensiones medidas en Abaqus a las mismas direcciones que el eje en las probetas agujereadas. En este caso, las tensiones en la dirección z de Abaqus corresponden a la dirección x, y las tensiones en la dirección x corresponden a la dirección y.

Tabla 4.-Tensiones residuales de la probeta, laminada en geometría cónica a 15º, extraídos de la simulación. Siendo σ_x las tensiones en la dirección x, σ_y las tensiones en la dirección y

	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)
Punto 1	523.267 ± 80.25	333.22 ± 50.51
Punto 2	371.5 ± 64.6	252.44 ± 25.16
Punto 3	271.41 ± 151.47	393.75 ± 111.45

Debido a la complejidad de las simulaciones a nivel computacional y dadas las limitaciones de tiempo no se han extraído los valores de tensiones residuales para las probetas laminadas con geometría cónica a 11º y 13º.

A modo de comprobar la validez de los resultados obtenidos, se utiliza el método práctico de “hole-drilling” con DIC para comparar las tensiones. Para comparar los resultados experimentales de las probetas laminadas a 11º y 13º, se asume que, dado que el ángulo es menor, presentará mayor deformación y, por tanto, mayores valores de esfuerzo residuales.

En la Ilustración 24 se muestra la probeta simulada con el software y la zona de extracción (marcada en amarillo) de los valores de la Tabla 4. Los puntos marcados corresponden a los puntos 1 y 2. En estos mismos puntos se realiza el ensayo de “hole-drilling” posterior para obtener una comparación óptima de resultados.

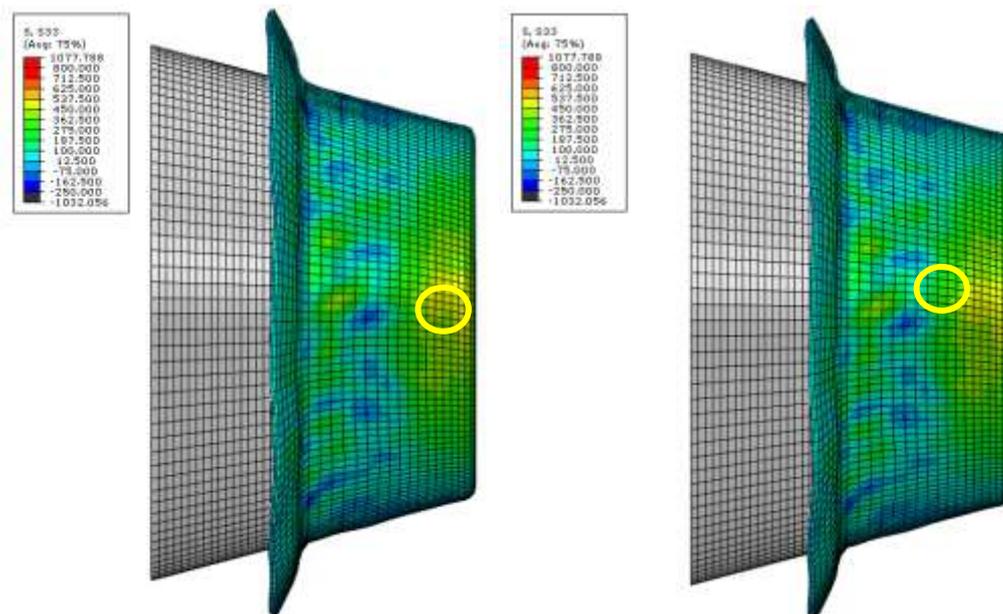


Ilustración 24.-Simulación de las probetas laminadas con geometría cónica a 15º, con el punto de extracción de resultados (amarillo)

6.3.2. Método práctico

6.3.2.1. Preparación de las probetas

Antes de empezar con el ensayo, es necesaria una preparación de las probetas, tanto de la limpieza superficial como de la sujeción de estas.

Dada la geometría cónica, existe cierta dificultad en conseguir el equilibrio mecánico de las probetas mientras se realiza el ensayo. Por este motivo, se ha buscado una solución a este problema. Dicha solución, ha consistido en imprimir mediante una impresora 3D un soporte de ácido poliláctico (PLA) para cada probeta (véase Ilustración 25). Dado que las probetas están laminadas a distintos ángulos, las dimensiones de estas no serán las mismas para todas. Por este motivo y por tal de minimizar el uso de filamentos de PLA, se adecúan las medidas del soporte para cada probeta.



Ilustración 25.- Soporte de PLA imprimido con impresora 3D

En el soporte se inserta una resina epoxy, donde se introducirá la probeta y, tras solidificar se mantendrá fija, tal y como se muestra en la Ilustración 26 .

Una vez la probeta está totalmente fija, se elimina la resina que haya podido quedar adherida a la superficie a perforar de la probeta. Para eliminarla se pasa un trozo de algodón impregnado con etanol por la superficie de la probeta metálica.



Ilustración 26.- Soporte con la probeta fija

Para finalizar la preparación, se pinta en la superficie el patrón expuesto en la Ilustración 8 que percibirán las cámaras. Secada la pintura, ya se procede con el ensayo de “hole-drilling” con DIC.

6.3.2.2. Proceso de “hole-drilling” con DIC

En primer lugar, como en el caso de la Verificación del método en el método práctico, antes de empezar con el ensayo, es necesaria la calibración. Se sigue el mismo procedimiento que en el caso comentado. Si la calibración ha sido realizada con éxito, se procede con el ensayo de “hole-drilling” con DIC.

El montaje del equipo es idéntico al presentado en la Ilustración 9, salvo la diferencia que, en este caso, la probeta utilizada es la laminada cónicamente a 15°. El montaje utilizado en este apartado se muestra en la Ilustración 27.



Ilustración 27.- Montaje utilizado en las probetas laminadas para el método de "hole-drilling" con DIC

El procedimiento también es análogo al comentado anteriormente en la Verificación del método, donde se realiza una fotografía previa a perforar y otra tras perforar la superficie. En este caso se efectúan 3 agujeros. A continuación, se insertan las imágenes en el software DIC, se selecciona la zona a analizar, el tamaño de malla y mediante elementos finitos, calculará las deformaciones.

6.3.2.3. Cálculo de tensiones residuales

Las tensiones residuales se calculan siguiendo el mismo procedimiento que en el Cálculo de tensiones residuales para verificar el método. Con el software VIC-3D, utilizando los marcadores, se simula la geometría comentada en la Ilustración 21. A partir de los marcadores, el mismo software devuelve los valores de las deformaciones Hencky en las 3 direcciones.

Utilizando la Ecuación 14 y Ecuación 15 del mismo modo que en la verificación del método, se calculan las tensiones residuales para las probetas laminadas cónicamente a 11º, 13º y 15º. Los resultados se muestran en la Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7 respectivamente.

Tabla 5.-Tensiones residuales de la probeta, laminada en geometría cónica a 15º. Siendo σ_x las tensiones en la dirección x, σ_y las tensiones en la dirección y

	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Radio (mm)
Punto 1	442.53 ± 55.45	406.15 ± 15.08	2.14 ± 0.42
Punto 2	437.10 ± 163.73	415.07 ± 148.40	2.1 ± 0.3
Punto 3	309.48 ± 110.11	346.75 ± 100.06	2.25 ± 0.40

Tabla 6.-Tensiones residuales de la probeta, laminada en geometría cónica a 13º. Siendo σ_x las tensiones en la dirección x, σ_y las tensiones en la dirección y

	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Radio (mm)
Punto 1	366.45 ± 84.05	367.62 ± 169.48	1.504 ± 0.089
Punto 2	411.35 ± 70.56	364.92 ± 182.51	1.80 ± 0.25
Punto 3	458.88 ± 0.12	487.77 ± 188.61	1.47 ± 0.12

Tabla 7.- Tensiones residuales de la probeta, laminada en geometría cónica a 11°. Siendo σ_x las tensiones en la dirección x, σ_y las tensiones en la dirección y

	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	Radio (mm)
Punto 1	417.55 ± 197.73	556 ± 188	1.28 ± 0.22
Punto 2	445.17 ± 145.21	473.96 ± 132.33	1.50 ± 0.10
Punto 3	478 ± 91	397.87 ± 86.04	1.50 ± 0.09

En primer lugar, se percibe que los valores de las tensiones residuales son superiores a lo esperado según las propiedades mecánicas del acero (Tabla 1) llegando a superar la resistencia a rotura. Este suceso, se debe a que las ecuaciones utilizadas para calcular los esfuerzos son ecuaciones que se basan en el principio elástico lineal. Además, se experimentan deformaciones de von Mises de 2.15, 2.50 y 2.97 mm/mm para los ángulos de laminación de 15,13 y 11° respectivamente. Por este motivo, si se observa la Ilustración 12, a estas deformaciones sí que es posible obtener estos valores de esfuerzos residuales.

Los radios de medida son mayores en las probetas con mayor ángulo de laminación, dado que sufren menor deformación y sus esfuerzos serán mayores. De tal forma que, los esfuerzos que se generan por el contacto del taladro con la probeta generan más ruido en las zonas cercanas al agujero, para la medida de las deformaciones

A partir de los resultados de la Tabla 5 se aprecia que los esfuerzos residuales son mayores en el punto de la zona 1 (punto 1), efecto que es óptimo, ya que en este punto se concentra mayor deformación y, por tanto, los esfuerzos serán mayores también, dada la ley de Hooke. En los puntos 2 y 3, del mismo modo que en las probetas sometidas a tracción (están más alejadas de la zona de contacto del mandril), los esfuerzos residuales son menores.

A continuación, se compara los valores obtenidos de esfuerzos en las direcciones “x” e “y” en las diferentes zonas de la probeta (véase Ilustración 29, Ilustración 30 e Ilustración 31). Por otro lado, se divide la probeta en 3 zonas, para comparar las diferencias de los resultados en la zona de contacto del mandril (zona 1) y las zonas más alejadas (zona 2 y 3). En la Ilustración 27 se presenta la división realizada.

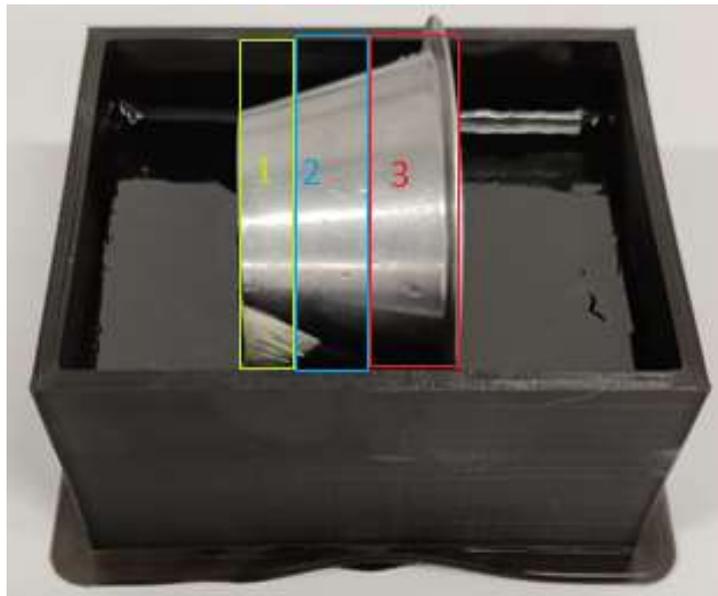


Ilustración 28.- División de zonas de la probeta.

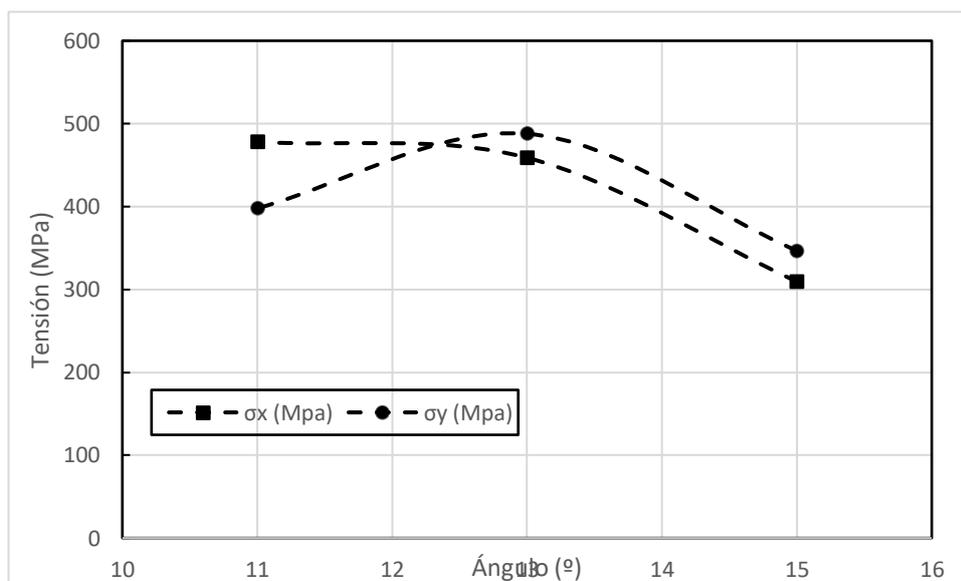


Ilustración 29.- Evolución de los esfuerzos "x" e "y" de la zona 3 para cada ángulo

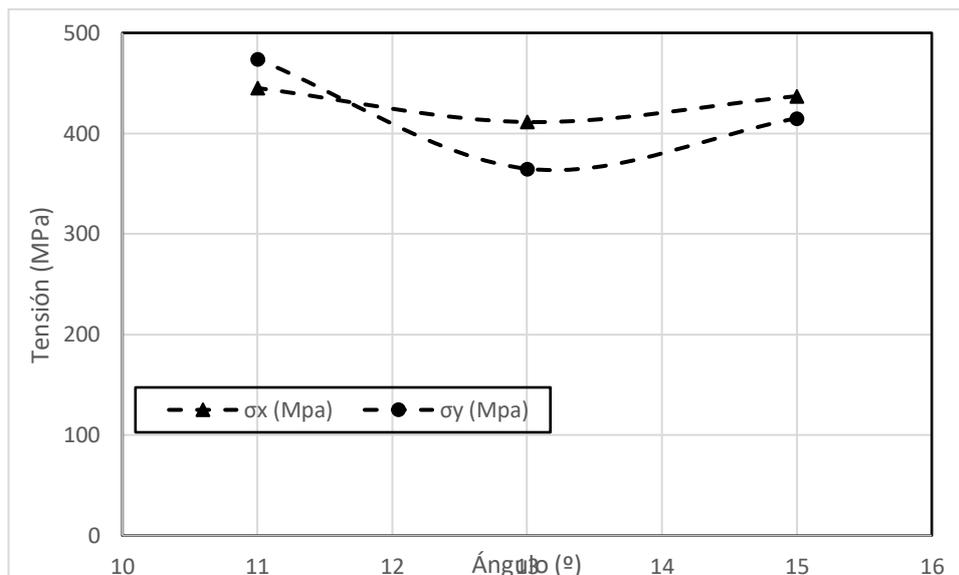


Ilustración 30.-Evolución de los esfuerzos "x" e "y" de la zona 2 para cada ángulo

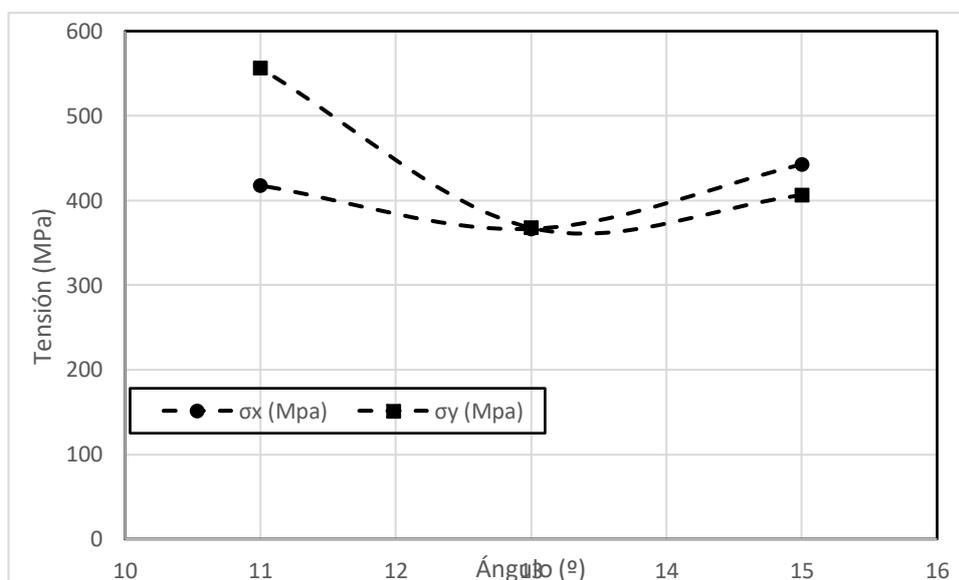


Ilustración 31.-Evolución de los esfuerzos "x" e "y" de la zona 1 para cada ángulo

Observando la Ilustración 29, se aprecia que a medida que disminuye el ángulo de laminación, se obtienen mayores valores de esfuerzo residuales en valor absoluto, ya que se deforma más la probeta y se generan más tensiones residuales. Aunque la diferencia entre ellos no es muy elevada. Por otro lado, en las probetas laminadas a 13º y 15º (Ilustración 30 e Ilustración 31) este efecto no se observa con claridad. Aunque visto que, los resultados se encuentran en el mismo o por encima del rango de las laminadas a 15º y las interferencias que causa este método en las cercanías del agujero que causan dificultades en la toma de medidas, se toman como resultados correctos.

Análisis de impacto ambiental

Durante el desarrollo del trabajo se han proseguido los protocolos de reciclaje impuestos por la Universitat Politècnica de Catalunya. En el caso de las probetas de acero DC-04 laminadas y las cortadas, posteriormente sometidas a ensayos de tracción, dada la reciclabilidad de los aceros, se han podido desechar con facilidad. Por este motivo, tras finalizar los ensayos, se han depositado en el contenedor correspondiente para su posterior procesado para ser reciclado. Cabe destacar, que previamente a deshacerse de las probetas de acero, se les aplica una limpieza superficial, mediante un algodón impregnado con acetona, para eliminar el patrón de pintura utilizado para el DIC.

En el caso de las lijas utilizadas para pulir la rebaba remanente por el corte mediante plasma de las probetas planas, con las que se realizan ensayos a tracción, no ha sido necesaria deshacerse de ellas, ya que aún se les podía dar más usos. De este modo, ha sido guardada para posteriores ensayos.

Conclusiones

Una vez finalizado el trabajo, se pueden extraer varias conclusiones. Primeramente, las tensiones residuales serán de mayor valor en los puntos donde se concentró mayor deformación, siguiendo la ley de Hooke. En el caso de la laminación con geometría cónica, las tensiones residuales son mayores para grados del mandril menores. Los esfuerzos menores han supuesto un radio de medición mayor, ya que la perforación con el taladro tiene un efecto mayor en estas, generando un exceso de ruido en las mediciones y valores muy superiores a la resistencia de rotura en distancias cercanas al agujero.

Finalmente, cabe destacar que este método, a pesar de aportar resultados irregulares, sí que tienen cierta aproximación con los valores reales. Además, se trata de un método sencillo, poco costoso y relativamente rápido, sin tener en cuenta el uso de las simulaciones. Aun así, se obtienen resultados más exactos que la normativa ASTM E837-01 y es más sencillo de aplicar.

A niveles de trabajo futuro, sería importante desarrollar este método con otras técnicas para obtener mejores resultados, sobre todo en cuanto al software VIC-3D, dadas las dificultades para hacer mediciones con exactitud. Así mismo, tener en cuenta que las simulaciones realizadas son muy complejas, por lo que necesitan de tiempos largos para completarse y poder extraer los valores. Otro posible trabajo futuro es laminar a 90° para determinar los esfuerzos residuales, a pesar de la dificultad de realizar, dada la elevada reducción de espesor. Sería interesante laminar más probetas para cada ángulo para tener más ensayos y poder descartar los resultados que no sean adecuados. Finalmente, otro aspecto a mejorar sería la disminución (hasta un diámetro igual al del agujero) del agujero de la base del taladro para disminuir el efecto que tiene durante la perforación. El agujero causa que el material se doble, y se generen tensiones demasiado elevadas en el ensayo de DIC.

Presupuesto y Análisis Económico

El coste del trabajo se ha dividido en 2 secciones: Los costes de ingeniería dirigidos hacia los tiempos de trabajo asociados a cada miembro y los costes de equipo y materiales utilizados durante el desarrollo del trabajo.

Costes de ingeniería

Con relación a los costes de ingeniería se asume un coste de servicio de estudiante de 10 €/h y de 12 €/h en el caso de los costes de tutor. En la Tabla 8 se desglosa las actividades de ingeniería con su respectivo coste por hora, los tiempos empleados para cada actividad, los miembros con los cuales se ha realizado cada una y los costes totales.

Tabla 8.-Costes de ingeniería asociados al trabajo

Actividad	Miembro	Coste (€/h)	Tiempo (h)	Coste (€)
Estudio conocimientos de tensiones residuales	Estudiante	10	60	600
Estudio conocimientos de "hole-drilling" y DIC	Estudiante	10	72	720
Preparación de probetas para validación de proceso	Estudiante	10	2	20
Ensayos de tracción	Estudiante/Tutor	10/12	2	44
"Hole-drilling" de las probetas	Estudiante/Tutor	10/12	1	22
Recolección de resultados de probetas	Estudiante	10	4	40
Preparación de probetas laminadas cónicamente	Estudiante/Tutor	10/12	2	44

“Hole-drilling” de las probetas laminadas cónicamente	Estudiante/Tutor	10/12	2	44
Simulaciones con Abaqus	Tutor	12	300	3600
Recolección de resultados de probetas	Estudiante	10	10	100
Reuniones	Estudiante/Tutor	10/12	2	22
Redacción informe	Estudiante	10	300	3000
Total				8256

Costes de equipo y materiales

En la Tabla 9 se presenta los costes de equipo y materiales para cada actividad realizada.

Tabla 9.-Costes de equipo y materiales asociados al trabajo

Actividad	Equipo	Coste(€/ud.)	Unidades	Coste (€)
Plancha acero DC-04	Acero DC 04	13	1	13
Cortadora laser	Cortadora laser	2.5	4	10
Patrón de pintura	Aerosoles	6.5	2	13
Pulidora	Pulidora	80	4	320
Ensayo de tracción	Máquina de tracción	33.33	7	233.31
Equipo “hole-drilling”	Taladro, cámaras, software...	66.67	7	466.67
Total				1055.98

Costes totales

En la Tabla 10 se muestra el coste económico total del trabajo a modo de resumen.

Tabla 10.-Coste total asociado al trabajo

Tipo de costes	Coste (€)
Ingeniería	8256
Equipo/Materiales	1055.98
Total	9311.98

Bibliografía

- American National Standard. 2000. "Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials." *American National Standard*.
- American National Standard. 2008. "Standard Test Method for Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method." American National Standard.
- Basler. 2021. "Aca2440-75um - Basler Ace." <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace/aca2440-75um/>. 2021.
- Coyoy, Pablo Saúl, Sergio Alberto Elizalde, and José María Cabrera. 2021. "Study of Shear Spinning Processing." Barcelona.
- Eijpe, I M, and P C Powell. 1997. "Residual Stress Evaluation in Composites Using a Modified Layer Removal Method." *Composites Structures* 37 (314): 335–42.
- García Rodero, Gorka. 2014. "Alivio de Tensiones Residuales: Tratamiento Térmico vs. Vibración." Pamplona.
- Gauthier, J., T. W. Krause, and D. L. Atherton. 1998. "Measurement of Residual Stress in Steel Using the Magnetic Barkhausen Noise Technique." *NDT&E International* 31 (1): 23–31.
- GSVitec. n.d. "Multiled PT." <https://gsvitec.com/en/light/value-line/multiled-pt/>.
- Hauk, Viktor. 1997. *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods Methods*. Amsterdam: Elsevier.
- Hayama, Masujiro, Tadao Murota, and Hiroaki Kudo. 1965. "Experimental Study of Shear Spinning." *JSME* 8 (31): 453–60.
- Huang, Xianfu, Zhanwei Liu, and Huimin Xie. 2013. "Recent Progress in Residual Stress Measurement Techniques." *Acta Mechanica Solida Sinica* 26 (6).
- Jian, Lu. 1996. *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. Fairmont PR.
- Jimenez Peña, Elvis Mauricio, and Javier Guzmán Duxtán. 2018. "Síntesis y Caracterización de Nanoestructuras Tipo Cobreselenio Obtenidas Mediante Las Técnicas de Microondas y Mecanosíntesis." Lima.

- Kandil, F. A., J. D. Lord, A. T. Fry, and P. v. Grant. 2001. "A Review of Residual Stress Measurement Methods- A Guide to Technique Selection." Middlesex.
- Kudryavtsev, Yuri F. 2008. "Residual Stress." In *Handbook of Experimental Solid Mechanics*, 371–88. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30877-7_15.
- Menda, Františele, Patrik Šarga, Erik Prada, and František Trebuňa. 2014. "SolidWorks API for Ring-Core Simulations." In *SAMI 2014 - IEEE 12th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, Proceedings*, 151–55. IEEE Computer Society. <https://doi.org/10.1109/SAMI.2014.6822397>.
- Može, Primož, Luis Guy Cajot, Franc Sinur, Klemen Rejec, and Darko Beg. 2014. "Residual Stress Distribution of Large Steel Equal Leg Angles." *Engineering Structures* 71 (July): 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.03.040>.
- Peng, Yang, Jun Zhao, Lan shu Chen, and Jun Dong. 2021. "Residual Stress Measurement Combining Blind-Hole Drilling and Digital Image Correlation Approach." *Journal of Constructional Steel Research* 176 (January). <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106346>.
- Rossini, N. S., M. Dassisti, K. Y. Benyounis, and A. G. Olabi. 2012. "Methods of Measuring Residual Stresses in Components." *Materials and Design* 35 (March): 572–88. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.022>.
- Šarga, Patrik, and František Menda. 2013. "Comparison of Ring-Core Method and Hole-Drilling Method Used for Determining Residual Stresses." *American Journal of Mechanical Engineering* 1 (7): 335–38. <https://doi.org/10.12691/ajme-1-7-36>.
- Šarga, Patrik, and František Trebuňa. 2016. "Modern Trends in the Field of Measurement of Residual Stresses Using Hole-Drilling Method." *American Journal of Mechanical Engineering* 4 (7): 353–56. <https://doi.org/10.12691/ajme-4-7-21>.
- Sebastiani, M., C. Eberl, E. Bemporad, A. M. Korsunsky, W. D. Nix, and F. Carassiti. 2014. "Focused Ion Beam Four-Slot Milling for Poisson's Ratio and Residual Stress Evaluation at the Micron Scale." *Surface and Coatings Technology* 251 (July): 151–61. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.04.019>.
- Suntaxi, Carlos, Willian Monar, Christian Maigua, and Santiago Velasteguí. 2019. "Aplicación Del Proceso de Deformación Incremental Para El Conformado de Chapas de Aluminio AA 1200 H14." *Revista Politécnica* 44 (1): 15–20. <https://doi.org/10.33333/rp.vol44n1.02>.
- Totten, George, Maurice Howes, and Tatsuo Inoue. 2002. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. Edited by G. Totten, M. Howes, and T. Inoue. Ohio: ASM International.

Uzun, Fatih, and Ali Nezihi Bilge. 2011. "Investigation of Total Welding Residual Stress by Using Ultrasonic Wave Velocity Variations." *Gazi University Journal of Science* 24 (1): 135–41. www.gujs.org.

Yang, Bo, Shidong Nie, Shao Bo Kang, Gang Xiong, Ying Hu, Jubo Bai, Weifu Zhang, and Guoxin Dai. 2017. "Residual Stress Measurement on Welded Q345GJ Steel H-Sections by Sectioning Method and Method Improvement." *Advanced Steel Construction* 13 (1): 78–95. <https://doi.org/10.18057/IJASC.2017.13.1.5>.

Anexo A

A1. Datasheet del foco multiled

GSVITEC High Power LED
MULTILED PT



- Pulsed or continuous Light
- 30% overdrive when pulsed
- White LED
- Option: color LED
- Long lifetime (50.000 h+)
- Small size
- Low heat radiation
- Less power consumption

WE BUILD THINGS THAT WORK THE WAY YOU WISH THEY WOULD.

Multiled products cover all applications of high speed cameras and many applications in the machine vision market. Some family members e.g. cover sub microsecond exposure time, monochromatic light or give you enough light to fully close aperture at some microseconds exposure time. Designed from a decade of experience with thousands of customer projects in mind, Multiled products offer ultra strong lighting at an affordable price.

MULTILED PT - KEY FEATURES

- 24 High power LEDs, 84 Watt, 24 Volt (7.700 lm in continuous mode, 10.000 lm in overdrive mode)
- Potentiometer for brightness control
- BNC TTL trigger input up to 30 kHz, invertable or continuos
- Robust and highly available XLR jack
- fan inside
- Environmental protection: as IP20
- bottom 1/4" standard thread for photographic accessories and mount
- Lenses: standard 15° FWHM
- Dimensions: 160*117*80 mm
- Power supply and 5m XLR cable included.
- Option: longer cables or other cable types on request.

PT 15 DEGRESS LENS - PULSED MODE (OVERDRIVE)		
DISTANCE	INNER CIRLCE (DIAMETER/LUX)	OUTER CIRLCE
2m	300 mm / 18.000	500 mm / 10.500
1.5m	200 mm / 30.000	450 mm / 12.000
1.2m	200 mm / 42.000	350 mm / 24.000
0.5m	100 mm / 180.000	-
0.1 mt.	00 mm / 720.000	-

Available lenses
White
15°
20°
30°
50°
60°
120°

ALTERNATIVE LED TYPES (STANDARD: COLD WHITE 7.700 lm for continuous)			
Color	Med Wavelenght nm	Luminous Flux lm	Radiant Flux mw
80 CRI White	Warm white	6.000	-
Royal Blue	455	-	20.160
Blue	475	2.000	-
Green	530	4.700	-
Amber	590	2.250	-
Red Orange	615	3.400	-
Red	625	2.850	-
Photo Red	660	-	20.160
Far Red	730	-	13.100

All specifications without guarantee, errors and omissions expected, subject to changes

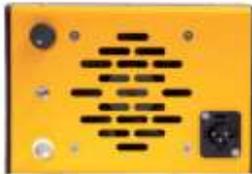


gsvitec.com



MULTILED PT - TECHNICAL DATA SHEET



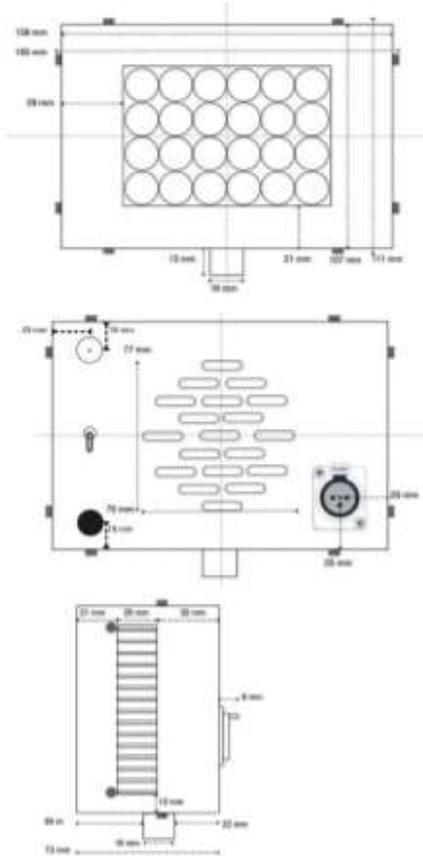


MultiLED PT

MULTILED PT	
Emitter	24 High Power Leds
Power Consumption	100W
Supply Voltage	24 Vdc
Bundled Power Supply	Standard Desktop PS 24 V 120 W
Luminous Flux	white, 7700 Lumen
Power Connector	XLR 3 Pin
Heat Dissipation	heat sink w. temperature controled fan
Environmental temp. (operation)	-25° - 40° C
Environmental temp. (storage)	-25° - 80° C
Overheat Protection	Thermo switch 80°C (fuse 80°C before 1-oct-2011). Thermo switch turns of power at 80°C and turns on when temperature falls < 60°C.
Environmental Protection	as IP 20
Mounting Options	bottom 1/4" standard thread
Standard Lenses	15° FWHM
Alternative Lenses	20°, 30°, 50°, 60°, 120°
Dimensions	+/- 5mm 165x120x82 mm
Weight	1100 g

ALTERNATIVE POWER SUPPLIES (EXCEPT R100)

DIN Rail	1 - n units
G3	3 units, 1 BNC TTL Trigger input
G3 19"	3 units, 1 BNC TTL Trigger input
G6 19"	6 units, 2x BNC TTL Trigger input





gsvitec.com

All specifications without guarantee, errors and omissions expected, subject to changes

A2. Datasheet de las cámaras

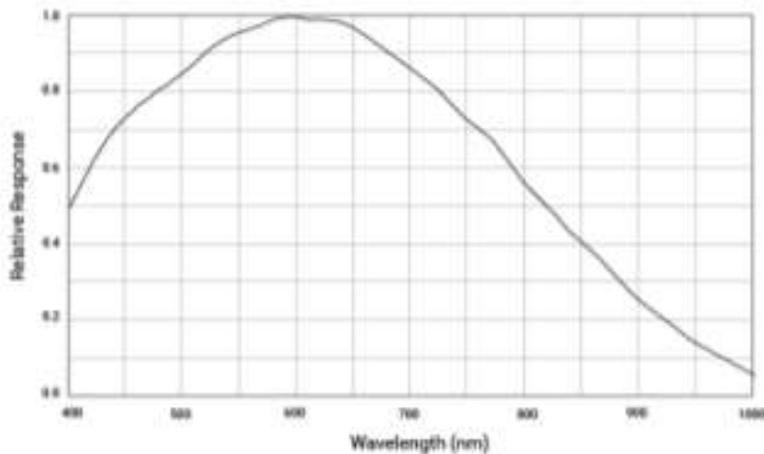
Specifications

General Specifications

Specification	acA2440-75um
Resolution (H x V Pixels)	2464 x 2056 (full resolution) 2448 x 2048 (default resolution) You can change the resolution by changing the Image ROI .
Sensor Type	Sony IMX250LLR-C Progressive scan CMOS Global shutter
Optical Size	2/3"
Effective Sensor Diagonal	11.1 mm
Pixel Size (H x V)	3.45 μm x 3.45 μm
Frame Rate (at Default Settings)	75 fps
Product Line	ace U
Mono / Color	Mono
Image Data Interface	USB 3.0, nominal max. 5 Gbit/s (SuperSpeed)
Pixel Formats	See Pixel Format .
Synchronization	Via hardware trigger Via software trigger Via free run
Exposure Time Control	Via hardware trigger Programmable via the camera API
Camera Power Requirements	Nominal 5 VDC supplied via the camera's USB 3.0 port ≈3.2 W (typical) @ 5 VDC

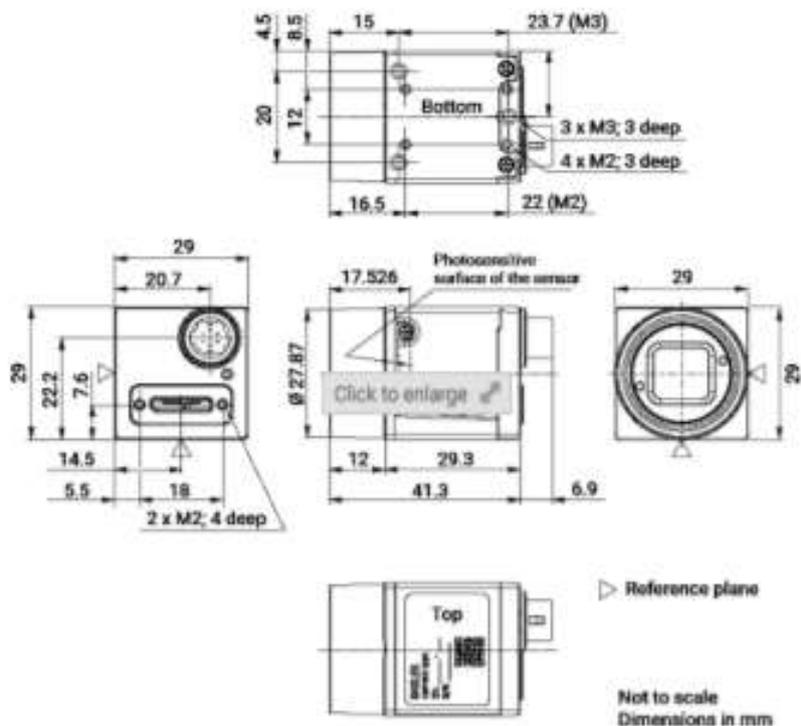
I/O Lines	1 opto-coupled input line 1 opto-coupled output line 2 general purpose I/O (GPIO) lines
Lens Mount	C-mount
Size (L x W x H)	29.3 mm x 29 mm x 29 mm (without lens mount or connectors) 48.2 mm x 29 mm x 29 mm (with lens mount and connectors)
Weight	<80 g
Conformity	CE (includes RoHS), UL Listed, FCC, GenICam 2.x (including PFNC 2.x and SFNC 2.x), IP30, USB3 Vision, REACH The EU Declaration of Conformity is available on the Basler website .
Software	Basler pylon Camera Software Suite (version 4.0 or higher) Available for Windows, Linux x86, Linux ARM, and OS X
Accessories	Cables for your camera model Lenses for your camera model Additional accessories for your camera model

Spectral Response



Mechanical Specifications

Camera Dimensions and Mounting Points



Maximum Allowed Lens Intrusion

→ See [Maximum Allowed Lens Intrusion](#).

Mounting Instructions

→ See [Mounting Instructions](#).

Stress Test Results

→ See [Stress Test Results](#).

Requirements

Environmental Requirements

Temperature and Humidity

Housing temperature during operation	0–50 °C (32–122 °F)
Humidity during operation	20–80 %, relative, non-condensing
Storage temperature	-20–80 °C (-4–176 °F)

Storage humidity	20–80 %, relative, non-condensing
Housing temperature according to UL 60950-1	max. 70 °C (158 °F)
Ambient temperature according to UL 60950-1	max. 30 °C (86 °F)
UL 60950-1 test conditions: no lens attached to camera; no heat dissipation measures; ambient temperature kept at 30 °C (86 °F).	

Heat Dissipation

→ See [Providing Heat Dissipation](#).

Electrical Requirements

⚠ DANGER	
Electric Shock Hazard	▼
⚠ WARNING	
Fire Hazard	▼
NOTICE	
Incorrect voltage can damage the camera.	▼

Camera Power

You must supply camera power that complies with the Universal Serial Bus 3.0 specification.

The camera's nominal operating voltage is 5 VDC, effective on the camera's connector.

Opto-Coupled I/O Input Line

Voltage	Description
30 VDC	Absolute maximum. This voltage must never be exceeded. Doing so may damage the camera and voids the warranty.
0–24 VDC	Safe operating range.
0–1.4 VDC	Indicates a logical 0 (with inverter disabled).
>1.4–2.2 VDC	Region where the logic level transition occurs; the logical status is not defined in this region.
>2.2 VDC	Indicates a logical 1 (with inverter disabled).

- **Minimum current:** 5 mA
- **Current draw:** 5–15 mA

Opto-Coupled I/O Output Line

Voltage	Description
30 VDC	Absolute maximum. This voltage must never be exceeded. Doing so may damage the camera and voids the warranty.
3.3–24 VDC	Safe operating range.
<3.3 VDC	Unreliable I/O output.

- **Leakage current:** <60 μ A. Actual leakage depends on operating temperature and production spread of electronic components.
- **Maximum load current:** 50 mA
- **Minimum load current:** Not specified. Consider the following:
 - Leakage current will have a stronger effect when load currents are low.
 - Propagation delay of the output increases as load currents decrease.
 - Higher-impedance circuits tend to be more susceptible to EMI.
 - Higher currents cause higher voltage drops in long cables.

General Purpose I/O Lines

NOTICE

Applying incorrect electrical signals to the camera's GPIO line can severely damage the camera.

Operation as Input

Voltage	Description
30 VDC	Absolute maximum. This voltage must never be exceeded. Doing so may damage the camera and voids the warranty.
0–5 VDC	Safe operating range. The minimum external pull-up voltage is 3.3 VDC.
0–0.8 VDC	Indicates a logical 0 (with inverter disabled).
>0.8–2.0 VDC	Region where the logic level transition occurs; the logical status is not defined in this region.
>2.0 VDC	Indicates a logical 1 (with inverter disabled).

- **Current draw (high-level):** <100 μ A
- **Sink current:** Your application must be able to accept 2 mA sink current from the GPIO input line without exceeding 0.8 VDC.

Operation as Output

Voltage	Description
30 VDC	Absolute maximum. This voltage must never be exceeded. Doing so may damage the camera and voids the warranty.
3.3–24 VDC	Safe operating range.
<3.3 VDC	Unreliable GPIO output.

- **Internal pull-up resistor:** \approx 2 k Ω , with open collector. Many applications will have to provide an additional pull-up resistor.
- **Residual voltage ("on" state):** \approx 0.4 V at 50 mA and 25 °C (77 °F) housing temperature. Actual residual voltage depends on operating temperature, load current, and production spread of electronic components.
- **Leakage current:** <60 μ A. Actual leakage depends on operating temperature and production spread of electronic components.
- **Maximum load current:** 50 mA
- **Minimum load current:** Not specified. However, consider the following:
 - Leakage current will have a stronger effect when load currents are low.
 - Propagation delay of the output increases as load currents decrease.
 - Higher-impedance circuits tend to be more susceptible to EMI.
 - Higher currents cause higher voltage drops in long cables.

Circuit Diagrams

→ See [Circuit Diagrams for Basler ace Cameras](#).

Cable Requirements

USB 3.0 Cable

- Use a high-quality USB 3.0 cable with a Micro-B plug.
- To *avoid EMI*, cables must be shielded, as specified in the USB 3.0 standard.
- Basler recommends using USB 3.0 cables from the [Basler Vision Components](#) range.

For more information about recommended USB 3.0 cables, see the [Recommended Accessories for Basler USB 3.0 Cameras](#) document.

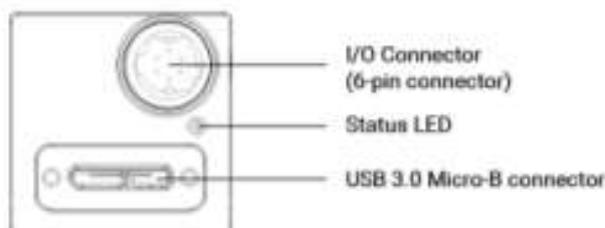
I/O Cable



- The I/O cable must be shielded.
- The I/O cable must have a cross-section at least 0.14 mm² (close to AWG26).
- Use twisted pair wire cables:
- Maximum recommended cable length: 10 m
- Camera-side connector: Hirose micro plug (part number HR10A-7P-6S) or equivalent
- Close proximity to strong magnetic fields should be avoided.
- Basler recommends using I/O cables from the [Basler Vision Components](#) range:
 - [GPIO cable, 10 m](#) (yellow cable): For use with the [GPIO lines](#) of your camera. To avoid interferences due to crosstalk, the [opto-coupled I/O lines](#) are not connected.
 - [Opto-I/O cable, 10 m](#) (blue cable): For use with the [opto-coupled I/O lines](#) of your camera. To avoid interferences due to crosstalk, the [GPIO lines](#) are not connected.
 - [Opto-GPIO Y-cable, 2 x 10 m](#) (yellow-blue cable): Allows you to use the [GPIO lines](#) and the [opto-coupled I/O lines](#) simultaneously without interferences due to crosstalk. There are two separate wires to split both I/O types.

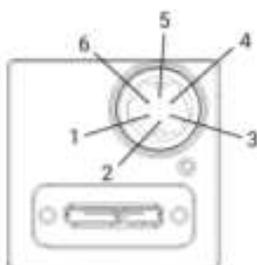
Physical Interface

Camera Connectors and Status LED



6-pin connector	Hirose micro receptacle (part number HR10A-7R-6PB) Recommended mating connector: Hirose micro plug (part number HR10A-7P-6S)
USB 3.0 Micro-B connector	Standard USB 3.0 Micro-B connector with screw lock Recommended mating connector: Standard connector with screws
Status LED	Indicates camera operation (LED lit = camera operating).

Connector Pin Numbering and Assignments



Pin	Line	Function
1	Line 3	General purpose I/O (GPIO) line
2	Line 1	Opto-coupled I/O input line
3	Line 4	General purpose I/O (GPIO) line
4	Line 2	Opto-coupled I/O output line
5	-	Ground for opto-coupled I/O lines
6	-	Ground for General Purpose I/O (GPIO) lines

Precautions

→ See [Safety Instructions for Basler ace Cameras](#).

Installation

→ See [Camera Installation](#).

Features

→ See the [camera features section](#).

Suggestions for improving the documentation? Send us your [feedback on this topic](#).

For technical questions, please contact your [local distributor](#) or use the [support form](#) on the Basler website.

Anexo B

B1. Planos de las probetas sometidas a tracción

