

## GENERACIÓN DE TENSIONES RESIDUALES DE CORTADURA MEDIANTE TORSIÓN

*D. Pérez Gallego<sup>1</sup>, J. Ruiz Hervías<sup>1</sup>, D.A. Cendón Franco<sup>1</sup>*<sup>1</sup> Departamento de Ciencia de Materiales.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.

C/ Profesor Aranguren 3, 28040-Madrid, España

[d.perez@upm.es](mailto:d.perez@upm.es)

**Resumen:** En la norma de ensayo para el análisis de la tensión residual por difracción de rayos X, se establece una validación del método empleando patrones con tensiones residuales normales conocidas donde se indican restricciones tanto para las tensiones normales como para las de cortadura. Al no tener un método de validación independiente de valores de cizalla, se plantea una incertidumbre en la aplicación de la norma, resultando interesante disponer de patrones con tensiones residuales tangenciales conocidas. En el presente trabajo se han realizado ensayos de torsión con el objetivo de generar tensiones residuales de cortadura de forma controlada y reproducible. Las tensiones residuales se han determinado experimentalmente por difracción de rayos X. Se ha diseñado un modelo numérico que reproduce adecuadamente el ensayo de torsión. El estado de tensiones residuales de cortadura predicho por el modelo numérico es muy similar a los valores medidos experimentalmente por difracción de rayos X.

**Palabras clave:** Tensiones residuales, tensión de cortadura, difracción de rayos X, torsión, elementos finitos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las tensiones residuales son aquellas que permanecen en los materiales o componentes en ausencia de cargas externas. Pueden originarse en diversos procesos de fabricación y condiciones de servicio que den lugar a deformaciones no uniformes.

A diferencia de las tensiones aplicadas, que suelen ser conocidas (cálculo o especificaciones de diseño), las tensiones residuales son a menudo desconocidas. Eso hace que las tensiones a las que está realmente sometido el componente tengan una indeterminación que puede condicionar su durabilidad. Por ello, es necesario determinar con precisión las tensiones residuales y establecer controles de fabricación y de calidad en aquellos componentes que puedan resultar críticos.

La técnica más extendida para la determinación de las tensiones residuales es la difracción de rayos-X. La norma de ensayo UNE-EN 15305 [1] es la encargada de establecer la metodología para llevar a cabo este análisis. Como validación del método de ensayo, la norma establece que es necesario realizar medidas en muestras de referencia patrón de tensiones residuales conocidas. Estos patrones suelen fabricarse mediante la técnica del *shot peening* la cual genera tensiones residuales de compresión en la superficie del material. Los resultados en estas muestras han de ser cualificados mediante programas de intercomparación entre laboratorios [2].

Mediante la técnica del *shot peening* es posible obtener una distribución homogénea de las tensiones de compresión en la región superficial del patrón, con tensiones de cortadura despreciables en general. Sin embargo, la norma de ensayo establece restricciones tanto para las tensiones normales como para las de cortadura, a pesar de que la forma de fabricar dichos patrones no produce tensiones de cortadura apreciables.

Esta aparente contradicción podría resolverse si se dispusiera de muestras patrón con tensiones de cortadura conocidas.

El principal objetivo de este trabajo es crear muestras patrón con tensiones residuales de cortadura conocidas. Para ello se han realizado ensayos de torsión en un acero en donde se han medido las tensiones residuales mediante difracción de rayos X una vez descargado el material. Dichos ensayos se han modelizado mediante simulaciones numéricas (método de los elementos finitos) en 3D y se han calculado las tensiones residuales generadas tras descargar el material.

## 2. MATERIAL.

El material que se ha escogido es una barra de acero de 20 mm de diámetro empleado en estudios previos de tensiones residuales [3]. Se trata de acero perlítico con un contenido en carbono cercano al 0.8%, coincidiendo con el punto eutectoide del diagrama Fe-C metaestable. La composición del material puede verse en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Composición química de la barra de acero empleada **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

|       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| C%    | Mn%   | Si%   | P%    | S%    |
| 0.77  | 0.69  | 0.22  | 0.010 | 0.024 |
| Cr%   | Ni%   | Mo%   | Cu%   | V%    |
| 0.239 | 0.076 | 0.010 | 0.129 | 0.118 |

La densidad de este acero se ha calculado a partir de un fragmento de la barra, obteniendo un valor de  $\rho=7810\text{kg/m}^3$ .

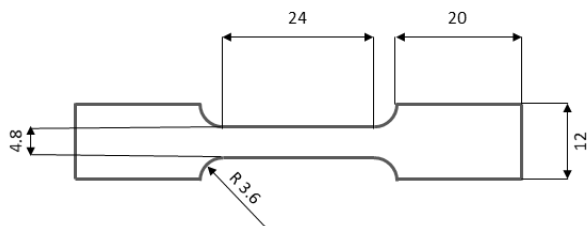
A la hora de mecanizar la barra de acero inicial para obtener las probetas de ensayo pueden generarse

tensiones residuales en el material. Con el fin de minimizar la magnitud de estas tensiones se ha realizado un tratamiento térmico de recocido a una temperatura de 600°C durante un tiempo de 2,5 horas.

### 3. ENSAYOS MECÁNICOS.

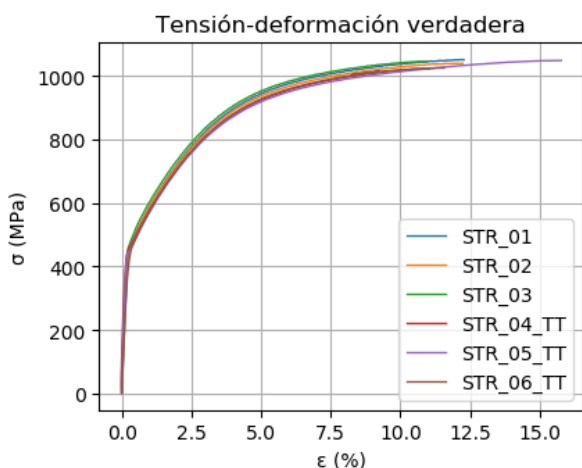
#### 3.1. Ensayo de tracción

Con el fin de caracterizar el comportamiento mecánico del material, se han realizado ensayos de tracción en probetas cilíndricas cuyo perfil puede verse en la Figura 1.



**Figura 1.** Esquema de las probetas de ensayo de tracción simple (medidas en mm).

En la Figura 2 se muestra la curva tensión-deformación para las tres muestras ensayadas a tracción simple hasta rotura sin el tratamiento térmico de alivio de tensiones (STR\_01, STR\_02 y STR\_03) y para las tres con dicho tratamiento (STR\_04\_TT, STR\_05\_TT y STR\_06\_TT). Como se puede observar, las propiedades mecánicas del material no se han visto alteradas por el proceso de recocido. Para la caracterización mecánica del material se han escogido los resultados de la muestra STR\_05\_TT. El módulo elástico tiene un valor de 238 GPa, el límite elástico al 0.2% es igual 438 MPa y el valor de la tensión última de tracción de 1048 MPa.

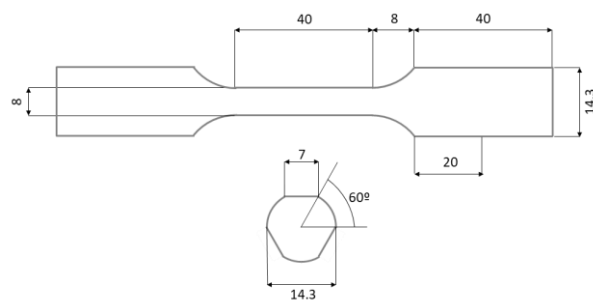


**Figura 2.** Curvas tensión-deformación verdadera de los ensayos de tracción simple.

#### 3.2. Ensayo de torsión

Para llevar a cabo el ensayo de torsión se mecanizaron probetas cilíndricas respetando los mismos criterios que los empleados para fabricar las probetas de tracción. El tamaño de las probetas se ha definido como el máximo posible teniendo en cuenta la capacidad de la máquina de ensayos. Como resultado, el diámetro de la sección

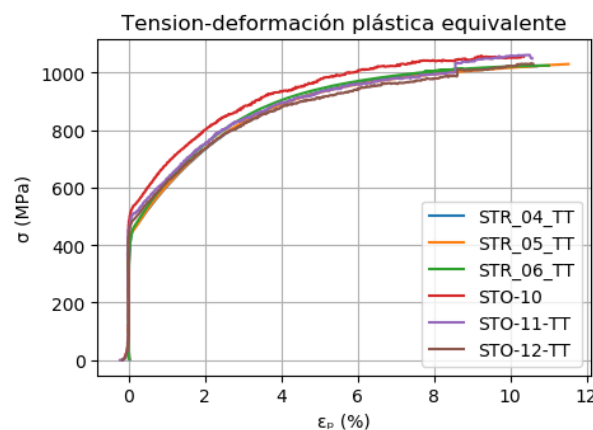
reducida es 8 mm. En la Figura 3 se muestra un esquema de la geometría de las probetas para estos ensayos.



**Figura 3.** Esquema de las probetas de ensayo de torsión (medidas en mm).

Se ha ensayado la probeta STO-10 para conocer el límite de rotura del material a torsión. Las muestras STO-11-TT y STO-12-TT se han descargado un giro de  $\theta = 450^\circ$  y  $\theta = 200^\circ$ , respectivamente.

A partir de las ecuaciones de Nadai [4] es posible obtener la curva tensión-deformación plástica equivalente a partir de los valores del momento torsor y el ángulo de giro obtenidos de los ensayos experimentales. En la Figura 4 se han representado los valores de tensión equivalente y deformación plástica equivalente, junto con los correspondientes a las muestras del ensayo de tracción.



**Figura 4.** Curvas momento torsor-ángulo de giro de los ensayos de torsión.

Si analizamos en detalle los valores de deformación, es posible observar que todas las curvas muestran una trayectoria similar, lo que significa que el comportamiento del material es el mismo para ambos ensayos. Esto implica que el comportamiento plástico es independiente de la presión hidrostática (plasticidad de tipo J2).

### 4. MEDIDA DE TENSIONES RESIDUALES

Las medidas se han realizado en el *Laboratorio de Medida de Tensiones Residuales (LMTR)* perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid. El laboratorio se encuentra acreditado por ENAC como laboratorio de ensayos (1308/LE2435). El equipo que se ha empleado es el difractorómetro *X-Raybot*.

Para obtener el tensor de tensiones residuales completo se ha realizado un ensayo triaxial. Esto implica realizar

medidas en tres direcciones de la muestra correspondientes a distintos valores del ángulo  $\phi$ . Estas direcciones se corresponden con la dirección axial de la muestra ( $\phi=0^\circ$ ), circunferencial ( $\phi=90^\circ$ ) y a la bisectriz de las dos anteriores ( $\phi=45^\circ$ ). Los parámetros escogidos para las medidas se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Parámetros escogidos para la toma de medida de tensiones residuales por difracción de rayos X.

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Material                       | Ferrita  |
| Familia de planos              | {211}  |
| Ángulo de difracción $2\theta$ | 156.4º   |
| Radiación                      | CrK $\alpha$ : 2.291Å  |
| Colimador                      | $\phi=1.5\text{mm}$  |
| Tiempo de exposición           | 30s  |
| $\phi$                         | [0º,45º,90º]   |
| $\psi$                         | x13 [-40º hasta 40º]   |
| XEC                            | $\frac{1}{2}S_2=5.76 \cdot 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$<br>$-S_1=1.25 \cdot 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$ |
| Corrección LPA                 | Sí   |
| Ajuste de $2\theta$            | PseudoVoigt  |

Cuando ha sido posible, las medidas de tensiones residuales se han realizado en distintos estados del material de ensayo siempre sobre el mismo punto de la superficie de la muestra. En la Tabla 3 se muestran los valores del tensor de tensiones residuales como resultado de todas las medidas realizadas. La componente  $\sigma_x$  del tensor se corresponde a la tensión en la dirección longitudinal de la muestra, mientras que la componente  $\sigma_y$  representa el valor de la tensión en dirección circunferencial. La componente  $\sigma_z$  (perpendicular a la superficie de la muestra) es siempre nula porque se considera un estado de tensión plana.

**Tabla 3.** Tensiones residuales: A (muestra mecanizada); B (tratamiento térmico); C (descarga de la probeta).

|   | STO-11-TT<br>$\theta = 450^\circ, [\text{MPa}]$  | STO-12-TT<br>$\theta = 200^\circ, [\text{MPa}]$  |
|---|--|--|
| A | $\sigma = \begin{pmatrix} -180 & -37 & 4 \\ -37 & -202 & 53 \\ 4 & 53 & 0 \end{pmatrix}$<br>$\Delta\sigma = \pm \begin{pmatrix} 12 & 11 & 2 \\ 11 & 12 & 2 \\ 2 & 2 & 9 \end{pmatrix}$ | -  |
| B | $\sigma = \begin{pmatrix} 20 & -8 & -3 \\ -8 & -60 & 17 \\ -3 & 17 & 0 \end{pmatrix}$<br>$\Delta\sigma = \pm \begin{pmatrix} 8 & 7 & 1 \\ 7 & 8 & 1 \\ 1 & 1 & 5 \end{pmatrix}$        | -  |
| C | $\sigma = \begin{pmatrix} -63 & -285 & 31 \\ -285 & 0 & -7 \\ 31 & -7 & 0 \end{pmatrix}$<br>$\Delta\sigma = \pm \begin{pmatrix} 14 & 14 & 3 \\ 14 & 16 & 3 \\ 3 & 3 & 7 \end{pmatrix}$ | $\sigma = \begin{pmatrix} -54 & -274 & 20 \\ -274 & 0 & -8 \\ 20 & -8 & 0 \end{pmatrix}$<br>$\Delta\sigma = \pm \begin{pmatrix} 12 & 12 & 3 \\ 12 & 14 & 3 \\ 3 & 3 & 6 \end{pmatrix}$ |

En la probeta mecanizada se ha podido comprobar que el material presenta tensiones residuales superficiales debido a los procesos de fabricación y mecanizado. La presencia de estas tensiones residuales podría alterar el estado tensional final del material una vez descargada la muestra en el ensayo de torsión. Por ese motivo se ha realizado un tratamiento térmico de alivio de tensiones que ha relajado dichas tensiones de manera considerable. Una vez aplicado el momento torsor sobre la muestra, podemos observar que se han generado tensiones de cortadura en el material después de la descarga. Por ello puede considerarse el ensayo de torsión como un método adecuado para inducir tensiones residuales de cortadura en la muestra.

4.1. Preparación de muestra patrón con tensiones residuales de cortadura conocidas

A partir de una de las muestras ensayadas a torsión y posteriormente descargadas, se ha preparado una primera aproximación de muestra patrón con tensiones residuales de cortadura conocidas. Para ello se ha usado la muestra STO-05-TT descargada a un ángulo de giro de 450º. Como resultado se han obtenido los siguientes valores de tensión residual:

$$\sigma = \begin{pmatrix} -47 & -253 & 0 \\ -253 & -47 & -4 \\ 0 & -4 & 0 \end{pmatrix}, \quad \Delta\sigma = \pm \begin{pmatrix} 15 & 14 & 3 \\ 14 & 15 & 3 \\ 3 & 3 & 11 \end{pmatrix}$$

5. SIMULACIONES NUMÉRICAS.

Se han realizado simulaciones numéricas basadas en el Método de Elementos Finitos en 3D. La herramienta de cálculo escogida para llevar a cabo dichas simulaciones es el software ABAQUS, versión 2017.

5.1. Ensayo de tracción

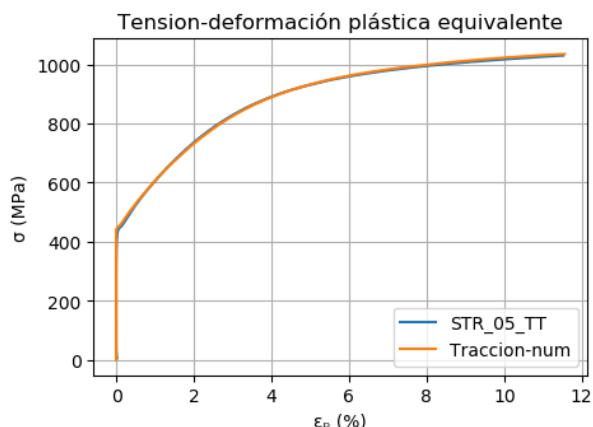
Con el objetivo de ajustar un modelo de comportamiento mecánico del material, se ha realizado una primera simulación numérica para reproducir el ensayo de tracción. El modelo de material empleado es de tipo elasto-plástico con una curva de endurecimiento por deformación plástica introducida por puntos. Para la parte elástica, se ha empleado el valor del módulo de elasticidad obtenido en los ensayos (238 GPa) y un coeficiente de Poisson  $\nu = 0.3$ . La curva de endurecimiento por deformación para la parte plástica se ha introducido por puntos, los cuáles se han determinado también a partir de los resultados experimentales.

En la Figura 5 se compara la curva tensión-deformación obtenida a partir de la simulación con los resultados experimentales. Como se puede observar, ambas curvas quedan solapadas, lo que permite validar el modelo de material empleado.

5.2. Ensayo de torsión

Para el ensayo de torsión se ha empleado el mismo modelo de comportamiento de material validado a través del ensayo de tracción. Para definir la geometría se empleó un modelo 3D axisimétrico de revolución al que se ha aplicado el mismo giro que en los ensayos experimentales (450º y 200º) sobre la superficie de la base de la pieza. Posteriormente, se ha simulado la descarga de la muestra liberando a la misma de cualquier

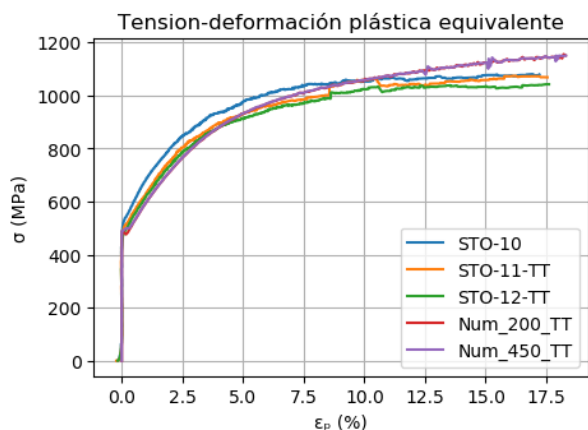
fuerza externa aplicada. De este modo, una vez alcanzado el equilibrio se pueden obtener las tensiones residuales en el material.



**Figura 5.** Validación del modelo numérico con los resultados experimentales de los ensayos de tracción.

Los elementos en el mallado se han distribuido de manera simétrica respecto al eje de revolución, tal y como se observa en la Figura 6. De este modo se han generado elementos del tipo C3D8R y C3D6, siendo estos últimos los que están en contacto con el eje de simetría. El tamaño de elemento varía a lo largo del radio entre 0.03 y 0.3 mm.

Como resultado de las simulaciones podemos calcular las curvas tensión-deformación equivalente. En la Figura 6 se han representado estas curvas junto con las obtenidas en los ensayos experimentales. Es posible observar que el comportamiento obtenido en los resultados numéricos se acerca al experimental para niveles por debajo del 10% de deformación plástica.



**Figura 6.** Validación del modelo numérico con los resultados experimentales de los ensayos de tracción simple.

Para el estudio de las tensiones residuales se ha elegido un elemento situado en el borde de la sección central de la probeta y, para que sea posible comparar el nivel de tensiones residuales de la probeta simulada y la experimental, se han calculado las tensiones principales para ambos casos. En la Tabla 4 se muestran las tensiones principales calculadas a partir del tensor de tensiones.

**Tabla 4.** Tensiones principales en MPa en el material de ensayo de la simulación numérica y los ensayos experimentales.

|                        | $\theta = 450^\circ$<br>[MPa]                              | $\theta = 200^\circ$<br>[MPa]                            |
|------------------------|--|--|
| Simulaciones numéricas | $\sigma_1 = 279$<br>$\sigma_2 = -24$<br>$\sigma_3 = -299$  | $\sigma_1 = 203$<br>$\sigma_2 = -5$<br>$\sigma_3 = -207$ |
| Ensayos experimentales | $\sigma_1 = 258$<br>$\sigma_2 = -1.5$<br>$\sigma_3 = -319$ | $\sigma_1 = 250$<br>$\sigma_2 = -1$<br>$\sigma_3 = -303$ |

Para la muestra descargada a  $200^\circ$ , la tensión máxima en la simulación numérica es el 80% del valor experimental y la tensión mínima es el 70% aproximadamente; mientras que para el caso de descarga a  $450^\circ$  la relación entre el valor numérico y experimental para la tensión máxima y mínima está cerca del 95%.

**6. CONCLUSIONES.**

- Se ha generado un estado de tensiones residuales tangenciales (de forma controlada y reproducible) en muestras de geometría cilíndrica mediante el ensayo de torsión.
- Modelo numérico para simular el ensayo de torsión.
- Muestra patrón con tensiones residuales tangenciales conocidas.
- Validez para la propuesta de cambio en la norma UNE-EN 15305.

**7. REFERENCIAS.**

[1] “Ensayos no destructivos. Método de ensayo para el análisis de la tensión residual por difracción de rayos X (EN 15305),” *Normativa Europea*, 2008.

[2] F. Lefebvre *et al.*, “External reference samples for residual stress analysis by X-ray diffraction,” in *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 996. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.996.221.

[3] J. Ruiz, J. M. Atienza, and M. Elices, “Residual stresses in wires: Influence of wire length,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 12, no. 4, pp. 480–489, 2003, doi: 10.1361/105994903770343042.

[4] V. S. Gálvez, U. P. de Madrid, and C. y P. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, *Curso de comportamiento plástico de materiales*. Universidad Politécnica de Madrid, 1999. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?id=8XZK0gAACAAJ>.

**AGRADECIMIENTOS.**

Los autores desean agradecer al Ministerio de Ciencia e innovación e Universidades de España por la financiación recibida (proyectos RTI2018-097221-B-I00 y PGC2018-097116-A-I00).