

Tensiones residuales generadas en acero F-522 por distintos tipos de mecanizado(*)

V. García-Navas*, I. Ferreres**, J.A. Marañón**, C. García-Rosales* y
J. Gil-Sevillano*

Resumen

Las operaciones de mecanizado generan deformación plástica y calor en la zona próxima a la superficie de la pieza mecanizada, dando lugar a tensiones residuales. Dependiendo de su magnitud y signo, estas tensiones pueden ser perjudiciales o beneficiosas para la vida en servicio de la pieza. El estado final de tensiones depende del proceso de mecanizado aplicado, así como de los parámetros del mismo. Por tanto, el establecimiento de unas pautas de mecanizado adecuadas requiere una medida precisa de las tensiones residuales generadas, tanto en la superficie, como en el interior del material. En este trabajo se han medido, mediante difracción de rayos-X, las tensiones residuales en un acero F-522 templado y revenido, generadas por dos procesos de torneado (torneado duro convencional y torneado duro asistido por láser) y dos procesos de rectificado (de afino y de producción). Asimismo, se ha estudiado la evolución a lo largo de la profundidad de la fracción volumétrica de austenita retenida, de la microestructura y de nanodureza con el objetivo de relacionar estos resultados con los estados de tensiones obtenidos para cada mecanizado. Se ha observado que el torneado genera fuertes tensiones de tracción en la superficie y el rectificado tensiones de compresión. Inmediatamente, bajo la superficie, el rectificado genera tensiones ligeramente tractivas o nulas, mientras que el torneado genera tensiones fuertemente compresivas. Estos resultados indican que el proceso óptimo de mecanizado (prescindiendo de consideraciones económicas) sería aquel que combinase un torneado duro con un ligero rectificado final.

Palabras clave Tensión residual. Difracción de rayos-X. Torneado. Rectificado.

Residual stresses generated in F-522 steel by different machining processes

Abstract

Machining operations induce plastic deformation and heat generation in the near surface area of the machined part, giving rise to residual stresses. Depending on their magnitude and sign, these stresses can be detrimental or beneficial to the service life of the part. The final stress state depends on the machining process applied, as well as on the machining parameters. Therefore, the establishment of adequate machining guidelines requires the measurement of the residual stresses generated both at the surface and inside the material. In this work, the residual stresses generated in F-522 steel by two hard turning (conventional and laser assisted) and two grinding (production and finishing) processes were measured by X-ray diffraction. Additionally, depth profiles of the volume fraction of retained austenite, microstructure and nanohardness were obtained in order to correlate those results with the residual stress state obtained for each machining process. It has been observed that turning generates tensile stresses in the surface while grinding causes compressive stresses. Below the surface grinding generates weak tensile or nearly null stresses whereas turning generates strong compressive stresses. These results show that the optimum machining process (disregarding economical considerations) implies the combination of turning plus elimination of a small thickness by final grinding.

Keywords Residual Stress. X-ray diffraction. Turning. Grinding.

1. INTRODUCCIÓN

Los principales problemas asociados con el mecanizado de aceros de herramienta están relacionados con la integridad de la superficie^[1-6]: tensiones residuales, martensita sin revenir (capa blanca, fase dura pero frágil), martensita sobrevenida (fase blanda) y aparición de grietas. Durante el mecanizado, se inducen tensiones residuales en la superfi-

cie e, inmediatamente, bajo ésta, que pueden afectar a la vida en servicio de la pieza. El origen de estas tensiones está en la combinación de efectos mecánicos, térmicos y químicos^[7-9]. La fuerza normal aplicada por la herramienta sobre la superficie de la pieza genera deformación plástica, dando lugar a tensiones residuales de compresión en la capa más superficial. Por otra parte, la fricción entre pieza y herramienta puede dar lugar a temperaturas

(*) Trabajo recibido el día 17 de septiembre de 2004 y aceptado en su forma final el día 12 de julio de 2005.

(*) CEIT y Tecnum (Universidad de Navarra). Manuel de Lardizábal, 15, 20018 San Sebastián (Guipúzcoa), España.

(**) IDEKO, Grupo DANOBAT y Mondragón Corporación Cooperativa (MCC). Arriaga Kalea, 2, 20870 Elgoibar (Guipúzcoa), España.

elevadas, capaces de producir transformaciones de fase en las capas más superficiales del material, así como tensiones residuales de tracción. Estas tensiones de tracción son perjudiciales para la vida en servicio de la pieza, puesto que favorecen la formación y propagación de grietas. La magnitud de las tensiones residuales generadas en los procesos de mecanizado viene determinada, no sólo por las propiedades físicas y mecánicas del material a mecanizar sino por las características y parámetros del propio proceso de mecanizado. Para conseguir un proceso de mecanizado satisfactorio se requiere llegar a un compromiso entre los efectos térmico y mecánico; para ello, es necesario controlar la generación de calor y conseguir que la superficie final se deforme plásticamente, para lo cual es preciso elegir unos parámetros de mecanizado adecuados. Por tanto, el establecimiento de unas pautas de mecanizado adecuadas requiere un estudio preciso de las tensiones residuales generadas en el material, tanto en la superficie como su evolución con la profundidad.

Las tensiones residuales se clasifican en dos tipos: macroscópicas y microscópicas. Las macro tensiones se extienden a lo largo de distancias relativamente grandes comparadas con el tamaño de grano del material y se caracterizan mediante un tensor. Las micro tensiones son aquéllas que se dan en torno a defectos y juntas de grano y, en general, se suelen caracterizar por un escalar.

P. Vomacka y H. Walburger^[10] recogen la clasificación realizada por Parrish^[11] de las macro tensiones residuales generadas por mecanizado. En esta clasificación se distinguen tres tipos de distribución de tensiones residuales (Fig. 1). La

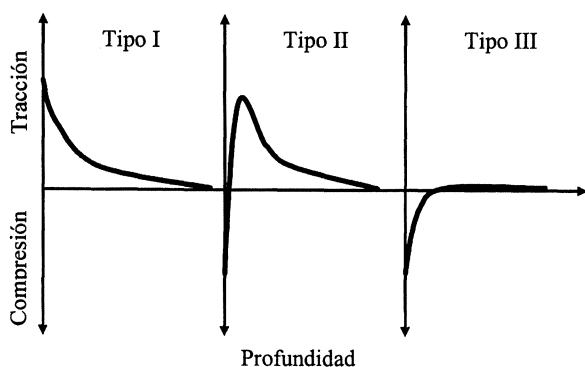


Figura 1. Tipos de distribución de tensiones residuales generadas por mecanizado de acuerdo a la clasificación de Parrish^[11].

Figure 1. Types of machining stress distributions according to Parrish^[11].

curva Tipo I representa las tensiones generadas por un proceso de mecanizado abusivo: la fricción pieza/herramienta ha generado temperaturas elevadas que han dado lugar a tensiones de tracción. Esta es la peor distribución de tensiones, ya que se han generado tensiones de tracción en la superficie y, también, bajo ésta. La curva Tipo III representa un mecanizado con condiciones extremadamente buenas: solo tiene lugar efecto mecánico (endurecimiento por deformación plástica en la superficie). Esta es la distribución ideal de tensiones, ya que al no presentar tensiones de tracción se previene la formación y propagación de grietas. La curva Tipo II indica que se ha generado calor suficiente para producir un pico de tracción, pero la deformación plástica ha dado lugar a tensiones de compresión en la misma superficie. En general, este tipo de distribución de tensiones es el obtenido tras un “proceso normal de mecanizado”^[10].

En trabajos previos^[8 y 9], se puso a punto la técnica de medida del tensor completo de tensiones residuales en función de la profundidad mediante difracción de rayos-X. Para ello se estudió el estado de tensiones generado por torneado duro en un acero F-521 para dos grados de desgaste de la herramienta^[8 y 9]. Asimismo, se comparó el estado de tensiones obtenido en dos materiales (acero inoxidable 17/7PH y Ti6Al4V), tras ser sometidos a dos operaciones diferentes de rectificado^[9].

En este trabajo se han estudiado, mediante difracción de rayos-X, las macro tensiones residuales generadas por cuatro procesos diferentes de mecanizado (torneado duro convencional, torneado duro con ranura o asistido por láser, rectificado de afino y rectificado de producción) en un acero de herramientas F-522 (AISI O1) tratado. La aportación de este trabajo en relación a los anteriormente mencionados^[8 y 9] consiste en comparar el efecto de diferentes mecanizados en un mismo material con el objeto de determinar el proceso de mecanizado óptimo, de especial importancia en el caso de piezas de responsabilidad. Asimismo, se ha estudiado un tipo de mecanizado novedoso, como es el torneado duro con ranura o asistido por láser, que se encuentra actualmente en fase de investigación y desarrollo. Al mismo tiempo, todo este estudio se ha completado con un estudio microestructural exhaustivo, incluyendo medidas de fracción volumétrica de austenita retenida y de perfiles de nanodureza. Esto permite determinar no solo el estado de tensiones generado por cada mecanizado, sino también los cambios estructurales que los mismos generan en el material.

Para los cuatro mecanizados objeto de estudio en este trabajo, se ha obtenido la evolución con la profundidad de las tensiones eliminando capas de material mediante pulido electrolítico, por lo que se ha realizado posteriormente una corrección por eliminación de capas^[12], para tener en cuenta la relajación de tensiones tras el electro-pulido. Asimismo, a partir de la evolución de la anchura de los picos de difracción, se obtiene la evolución de las microtensiones con la profundidad. Este estudio de las microtensiones es puramente cualitativo; para obtener, cuantitativamente, las microtensiones es necesario un equipo de difracción de alta resolución. Por otra parte, como se ha mencionado anteriormente, se ha llevado a cabo un estudio de la evolución de la microestructura, de la cantidad de austenita retenida y de la dureza con la profundidad, con objeto de correlacionar estos resultados con los de tensiones residuales y con las características de los distintos procesos de mecanizado.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Material y procesos de mecanizado

El material objeto de este estudio es el acero de herramienta F-522 (AISI O1), cuya composición se presenta en la tabla I. Se trata de un acero templado en aceite desde la temperatura de austenización y posteriormente revenido. Su alto contenido en carbono le proporciona alta resistencia al desgaste. Posee elevada dureza superficial (entre 56 y 62 HRC).

Sobre piezas cilíndricas de la misma serie y composición de acero F-522, se han aplicado cuatro procesos diferentes de mecanizado: torneado duro convencional, torneado duro con ranura, rectificado de producción y rectificado de afino. Se ha obtenido una rodaja para cada tipo de mecanizado, más una rodaja del material base sobre el que se han aplicado los mecanizados objeto de estudio. De cada rodaja se han extraído probetas (“tejas”)

para el estudio de las tensiones residuales, tal y como se indica en la figura 2. Asimismo, en dicha figura se indica, con un aspa, el punto de medida de las tensiones, sobre el que se han indicado los ejes de coordenadas y la dirección de las tensiones principales.

La pieza base tiene un diámetro inicial de 65,9 mm. El diámetro final de las piezas, tras ser mecanizadas, varía entre 54,4 y 60,7 mm

El torneado con ranura o torneado asistido por láser consiste en un torneado convencional tras la realización de una ranura longitudinal, por medio de láser, sobre la superficie a mecanizar. Esta ranura previa, con una profundidad inferior a la profundidad prevista para el torneado, se emplea para facilitar la rotura y evacuación de la viruta durante el mecanizado, dado que la excesiva longitud de viruta es uno de los principales problemas del torneado duro. Con el objeto de estudiar el efecto de la realización de esta ranura, se han estudiado las tensiones residuales en una probeta situada sobre la ranura y en otra situada a 180° de la misma. Asimismo, de las rodajas obtenidas para los otros mecanizados se han extraído también dos “tejas”, con el objeto de hacer un estudio de la reproducibilidad de los efectos de los mecanizados.

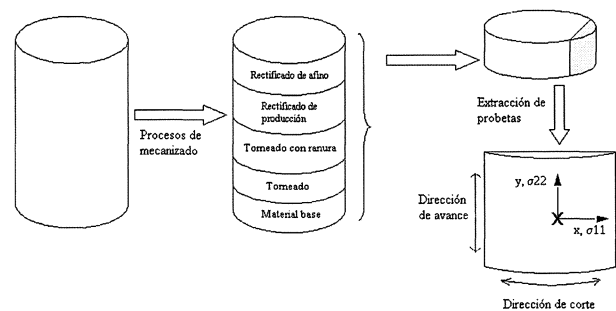


Figura 2. Obtención de las probetas, sistema de coordenadas y punto de medida de tensiones residuales.

Figure 2. Obtaining the samples, coordinate system and residual stresses measurement point.

Tabla I. Composición nominal (wt. %) del acero de herramienta F-522 (AISI O1)

Table I. Nominal composition (wt. %) of F-522 (AISI O1)

F-522	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	P	S	Co	Fe
Comp.	0,85	1,00		0,40			0,10					
Nominal	-	-	0,50	-	0,30	-	-	0,30	-	-	-	Balance
(wt%)	1,00	1,40	máx.	0,60	máx.		0,60	máx.				

2.2. Electropulido y corrección por eliminación de capas

Para los cuatro procesos de mecanizado, además del material base, se ha estudiado la evolución con la profundidad de las tensiones residuales. Para ello, se ha recurrido a la técnica de pulido electro-lítico, como método de eliminación de capas. Este método es el que menos altera la estructura y el estado de tensiones en el material, si bien produce relajación de tensiones. Para tener en cuenta esta relajación, se aplica a las tensiones obtenidas la corrección propuesta por Moore y Evans^[12]. Se ha verificado que esta corrección es prácticamente nula. Esto es lo esperado, dado que para que la corrección comience a ser apreciable han de eliminarse espesores del orden del milímetro, y en este trabajo la profundidad máxima alcanzada ha sido inferior a 250 μm .

Para la eliminación de capas de acero F-522 se ha empleado un electrolito con la siguiente composición: 70 % de etanol absoluto, 11 % de agua destilada, 11 % de 2-butoxietanol y 8 % de HClO_4 . El voltaje aplicado ha sido de 17 V. Dado que las probetas tienen un cierto radio de curvatura, se ha empleado un cátodo de acero inoxidable con forma de semicilindro hueco, con objeto de crear un campo eléctrico homogéneo. Asimismo, se ha empleado agitación para evitar la formación de surcos y baño de hielo para evitar un calentamiento excesivo del electrolito.

2.3. Medidas de difracción de rayos-X y análisis de datos

La medición de tensiones residuales mediante técnicas de difracción de rayos-X se basa en la determinación de las variaciones en la posición del pico de difracción, que tienen lugar como consecuencia de las distorsiones de la red cristalina. La presencia de macrotensiones hace que el espaciado interplanar varíe de distinta forma para las distintas orientaciones de los planos respecto a la dirección de la tensión.

La relación entre la deformación elástica, ε , y la variación del espaciado interplanar, $\Delta d = d - d_0$, se obtiene derivando la ley de Bragg^[13 y 14]:

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0} = -(\theta - \theta_0) \cdot \cot\theta_0 = -\Delta\theta \cdot \cot\theta_0 \quad (1)$$

donde, d es el espacio interplanar de la muestra con tensiones, d_0 , el espaciado interplanar de la muestra libre de tensiones, θ , la posición del pico

en el que se realiza la medida en el material con tensiones y θ_0 , la posición del mismo pico en el material libre de tensiones.

Aplicando el cambio de sistema de coordenadas muestra-goniómetro y utilizando la ley de Hooke para pasar de deformación a tensión, se obtiene la ecuación general para el cálculo de tensiones residuales a partir de medidas de difracción^[13 y 14]:

$$\begin{aligned} \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = & \frac{1 + \nu}{E} \{ \sigma_{11} \cdot \cos^2\phi + \sigma_{12} \cdot \sin 2\phi + \sigma_{22} \cdot \sin^2\phi - \sigma_{33} \} \sin^2\psi \\ & + \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{33} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \\ & + \frac{1 + \nu}{E} \{ \sigma_{13} \cdot \cos\phi + \sigma_{23} \cdot \sin\phi \} \sin 2\psi \end{aligned} \quad (2)$$

donde, $d_{\phi\psi}$ es el espaciado interplanar medido para la orientación (ϕ, ψ) de la muestra con tensiones, d_0 es el espaciado interplanar de la muestra libre de tensiones, σ_{ij} son las componentes del tensor de tensiones y ν y E son, respectivamente, el coeficiente de Poisson y módulo de Young del material (para el acero F-522: $\nu = 0,30$ y $E = 210$ GPa). Por lo tanto, midiendo el espaciado interplanar, d , para distintas orientaciones (ϕ, ψ) de la muestra, es posible obtener el tensor completo de tensiones.

Las medidas de difracción de rayos-X se han llevado a cabo en un goniómetro horizontal Philips X'Pert MRD (PW3050/20 HR).

Para la medida de tensiones residuales se ha empleado radiación K_{α} de Cr, de longitud de onda $\lambda = 2,2897$ Å. Se han medido las tensiones residuales a partir del pico (211) de martensita (estructura tetragonal centrada en el cuerpo), que para radiación de Cr está localizado a $2\theta \cong 156^\circ$. Se ha utilizado configuración de Bragg-Brentano y geometría de goniómetro- ψ . En todos los casos se ha medido el espaciado interplanar en trece inclinaciones ψ y tres orientaciones ϕ de la muestra. Es decir, se ha medido en un total de 39 orientaciones diferentes respecto de los ejes de la muestra. A las intensidades medidas se han aplicado las siguientes correcciones^[13]: polarización de Lorentz, fondo y desdoblamiento del doblete K_{α} . La posición de los picos se ha determinado haciendo un ajuste de los mismos a una curva gaussiana. La presencia de estados triaxiales de tensiones, así como de gradientes de tensiones (caso del presente trabajo) imposibilita la aplicación del tradicional método del $\sin^2\psi$ y hace necesaria la aplicación de un método integral, como el denominado método RIM^[15 y 16], consistente en una integración ponderada (debido a la absorción, las capas

superficiales contribuyen más a la amplitud de la señal) de la deformación normal a la superficie. Esta matriz de deformaciones puede desarrollarse en serie de Taylor, introduciendo, así, los tensores gradientes de deformaciones en dirección longitudinal, transversal y en profundidad. La medida de la posición del pico de difracción para 39 orientaciones diferentes permite resolver el sistema de ecuaciones del que se obtiene el tensor de tensiones y los tensores gradientes de tensiones en las tres direcciones (transversal, longitudinal y en profundidad)^[8, 9, 13 y 14]. Este cálculo se ha llevado a cabo utilizando el software comercial PC-Stress, versión 2.61, de Philips.

Se ha medido la fracción volumétrica de austenita retenida empleando el mismo equipo de difracción de rayos-X, si bien en este caso se ha utilizado radiación K_{α} de Cu, de longitud de onda $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ y geometría de haz paralelo (lente policapilar + colimador) con monocromador plano de grafito. Para determinar la fracción volumétrica de austenita retenida se emplean dos picos de difracción de austenita, (220) y (311), y un pico de martensita, (211), de acuerdo al método propuesto por Miller^[8 y 17]:

$$X_{\gamma} = \frac{1,4 \cdot I_{\gamma}}{I_{\alpha} + 1,4 \cdot I_{\gamma}} = \frac{1,4 \cdot (I_{\gamma}^{220} + I_{\gamma}^{311})/2}{I_{\alpha}^{211} + 1,4 \cdot (I_{\gamma}^{220} + I_{\gamma}^{311})/2} \quad (3)$$

donde, $I_{\alpha, \gamma}^{hkl}$ es la intensidad del pico hkl de la respectiva fase.

2.4. Estudio metalográfico

La microestructura del material sin mecanizar (acero de herramienta F-522) está compuesta por una matriz de martensita con pequeños carburos de forma globular (Fig. 3).

Con objeto de correlacionar la microestructura con las tensiones residuales generadas por cada tipo de mecanizado, se han extraído, de cada rodaja de material mecanizado, dos probetas para estudio microestructural: una perpendicular a la dirección de avance y otra perpendicular a la dirección de corte. Estas probetas han sido lijadas y pulidas, y posteriormente atacadas mediante inmersión en picral + HCl. Se ha utilizado microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM) para observar las probetas atacadas.

2.5. Nano-indentación

En probetas similares a las utilizadas para el estudio microestructural se han realizado medidas de

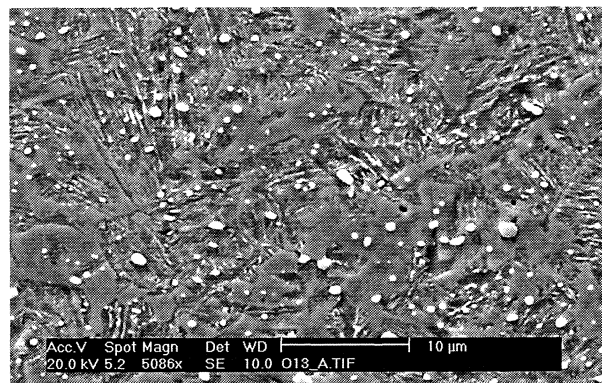


Figura 3. Microestructura (imagen de SEM) del acero de herramienta F-522 sin mecanizar (pícrico + HCl).

Figure 3. Microstructure (SEM image) of F-522 before machining (picric + HCl etching).

dureza en un indentador con punta Berkovich Nano Indenter II, MTS, Oak Ridge, TN (USA). La secuencia seguida en cada ensayo de indentación es: 1) aproximación hasta contacto; 2) carga (la profundidad de indentación utilizada es de 113 nm); 3) mantenimiento; 4) descarga, hasta el 90 %; 5) mantenimiento; 6) descarga total. Se han realizado indentaciones desde la superficie hacia el interior del material, con un espaciado de $3 \mu\text{m}$ entre indentaciones, obteniendo así perfiles de dureza. El valor representado en los perfiles de dureza corresponde al valor promedio de la realización de 10 indentaciones para cada profundidad (distancia a la superficie) de medida. Se pretende correlacionar la dureza medida con la microestructura observada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Tensiones residuales macroscópicas

Para cada una de las probetas estudiadas se han realizado medidas de difracción, para el cálculo de tensiones residuales, en la superficie y en 8 profundidades diferentes, hasta un máximo de $226 \mu\text{m}$ de profundidad. Las medidas a diferentes profundidades se han realizado tras la eliminación de capas mediante electropulido. En algunas de las profundidades se han repetido las medidas de difracción, con el objeto de estimar el error instrumental. Se ha obtenido para dicho error un valor medio de $\pm 70 \text{ MPa}$.

El método de análisis empleado permite obtener los valores de todas las componentes del tensor de tensiones, así como de los gradientes longitudinal, transversal y en profundidad. Se ha observado que, tanto las componentes de cortadura (σ_{12} , σ_{13} y

σ_{23}) como los gradientes longitudinal y transversal, $\nabla\sigma_l$ y $\nabla\sigma_t$ son prácticamente nulos, por lo que, para simplificar, se han realizado los cálculos tomando dichas componentes nulas de partida. Por ello se presentarán a continuación únicamente los resultados obtenidos para las componentes principales del tensor de tensiones, σ_{11} y σ_{22} . σ_{11} es la tensión en la dirección transversal (Fig. 2), que coincide con la dirección de corte. σ_{22} es la tensión en la dirección longitudinal (Fig. 2), que coincide con la dirección de avance en el torneado.

Una vez obtenidos los valores de las tensiones para todas las profundidades, se utiliza un método de ajuste mediante β -"splines" cúbicos^[18], para trazar la curva de la evolución de la tensión con la profundidad.

Los cuatro procesos de mecanizado han sido aplicados sobre material base, sometido previa-

mente a diferentes pruebas de mecanizado. Dado que los cuatro procesos de mecanizado objeto de estudio implican eliminación de varios milímetros de material, el propio proceso de mecanizado elimina la historia previa del material base. Por tanto, el estado de tensiones obtenido para cada mecanizado corresponde únicamente al generado por el propio mecanizado, independientemente del estado de tensiones del material base. Por este motivo, en lo que sigue se presentan únicamente los resultados obtenidos para las probetas sometidas a los cuatro mecanizados objeto de estudio.

En la figura 4 se presentan las curvas tensión-profundidad obtenidas. En cada gráfica se muestran las componentes principales del tensor de tensiones para las dos probetas extraídas de cada rodaja de material mecanizado. Para mayor claridad, se representan únicamente las curvas de ajuste

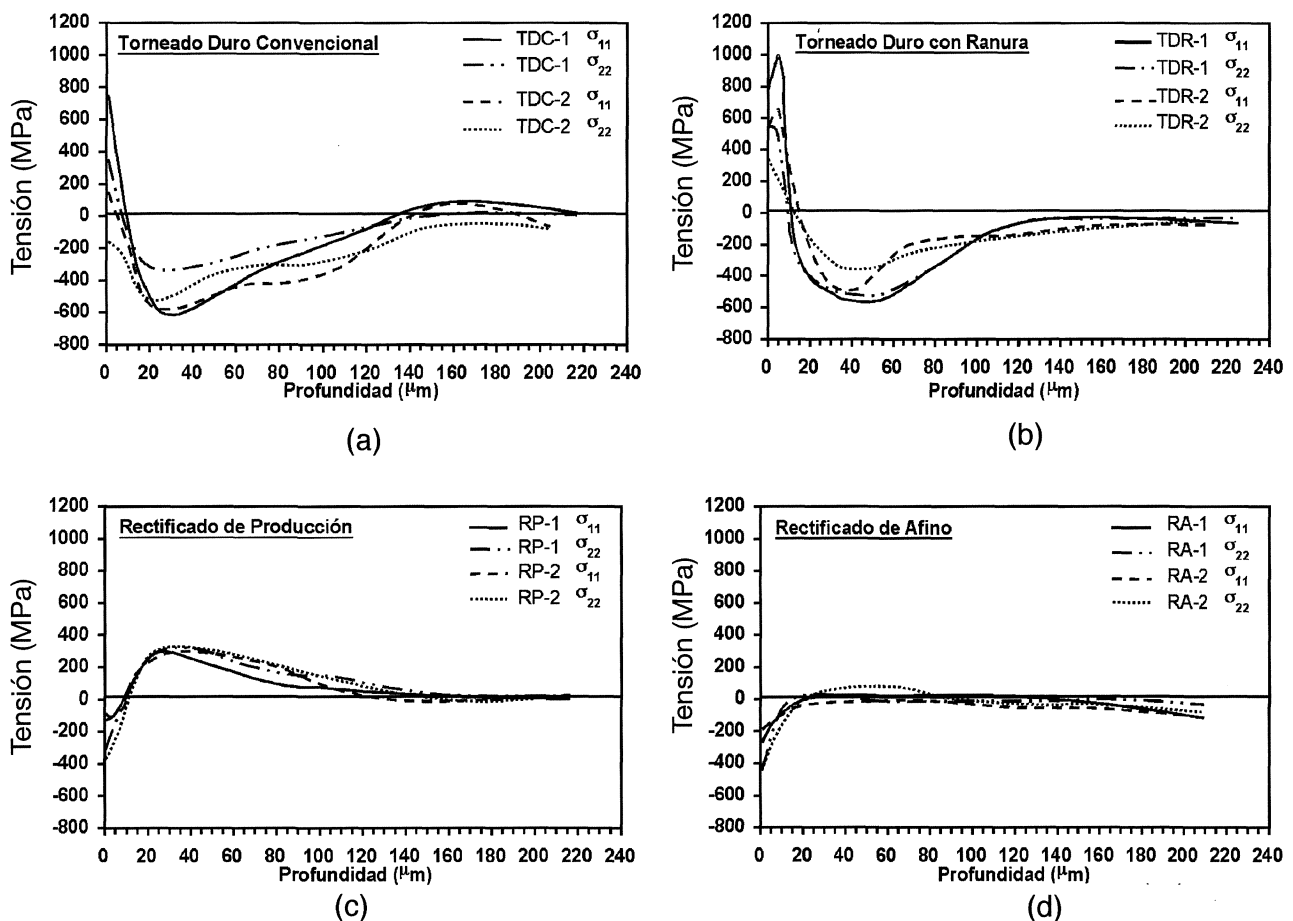


Figura 4. Evolución de las tensiones residuales con la profundidad para las probetas sometidas a los diferentes mecanizados objeto de estudio. (a) Torneado duro convencional (TDC). (b) Torneado duro con ranura o asistido por láser (TDR): probeta TDR-1 sobre la ranura y probeta TDR-2 a 180° de la ranura. (c) Rectificado de producción (RP). (d) Rectificado de afino (RA).

Figure 4. Depth profiles of residual stresses in the machined samples (a) Conventional hard turning (TDC) (b) Laser assisted hard turning (TDR) (c) Production grinding (RP) (d) Finishing grinding (RA).

(no los puntos experimentales). Para facilitar la comparación, en todos los casos se ha utilizado la misma escala.

Para las probetas sometidas a procesos de torneado (Fig. 4 (a) y (b)) se ha obtenido un estado de tensiones de tracción en la superficie, que se vuelve de compresión inmediatamente bajo ésta y a lo largo de un cierto espesor, para después tender a un estado nulo de tensiones en el interior del material. Esto indica que ha tenido lugar un mecanizado abusivo^[10], ya que se ha generado demasiado calor por fricción entre pieza y herramienta que es lo que ha dado lugar a tensiones de tracción en la superficie, que son altamente perjudiciales para la vida en servicio de la pieza. No obstante, no se corresponde con el más abusivo de los mecanizados que puede tener lugar (por ejemplo, mecanizado con herramienta gastada), puesto que inmediatamente bajo la superficie no se tienen, también, tensiones de tracción (Fig. 1, Tipo I), sino que se ha conseguido un estado de tensiones de compresión.

Para las probetas sometidas a rectificado de producción (Fig. 4 (c)) se ha obtenido un estado de tensiones de compresión en la superficie, que se vuelve de tracción inmediatamente bajo la misma, y que tiende a cero en el interior del material. Esto indica que se ha generado calor en el proceso de mecanizado, lo que da lugar a tensiones de tracción. Pero la deformación plástica originada por la presión de la herramienta sobre la pieza ha dado lugar a la formación de un estado de tensiones de compresión en la superficie. Este tipo de curvas corresponde al encontrado habitualmente tras un proceso convencional de mecanizado^[10] (Fig. 1, Tipo II).

Para las probetas sometidas a rectificado de afino (Fig. 4 (d)), la tendencia obtenida para las tensiones residuales es similar al comportamiento observado en el material sometido a rectificado de producción si bien, en este caso (rectificado de afino), se pasa de un estado de compresión en la superficie a tensiones prácticamente nulas en el interior del material. Este tipo de curva indica que las condiciones de mecanizado han sido muy buenas, dado que sólo ha tenido lugar, en la superficie, endurecimiento por deformación debida al mecanizado y no se ha generado calor suficiente para inducir tensiones de tracción. Esta es la distribución ideal de tensiones^[10] (Fig. 1, tipo III).

Comparando los resultados obtenidos en este trabajo con los de trabajos anteriores^[8 y 9], puede concluirse que los dos procesos estudiados, torneado y rectificado, generan, en diferentes materiales,

estados de tensiones que son similares cualitativamente pero cuantitativamente son diferentes: la evolución de las tensiones con la profundidad es similar, pero los valores de tensiones cambian de un material a otro. Esta diferencia en los valores de tensiones puede deberse tanto a las diferentes propiedades mecánicas de cada material como a diferencias en los parámetros de mecanizado.

Se observa (Fig. 4) que se tiene la misma evolución con la profundidad para las dos componentes principales del tensor de tensiones, σ_{11} y σ_{22} . En las probetas sometidas a procesos de rectificado (Figura 4 (c) y (d)) se obtiene la misma evolución y prácticamente los mismos valores de tensiones para ambas componentes (σ_{11} y σ_{22}). En las probetas sometidas a torneado duro (Fig. 4 (a) y (b)), si bien se obtiene la misma evolución para las tensiones, los valores de las mismas presentan mayores discrepancias que en el caso de probetas sometidas a rectificado, especialmente en la superficie. Estas diferencias en los valores de tensiones superficiales para las probetas sometidas a torneado duro puede explicarse por el hecho de que el proceso de torneado duro genera una mayor rugosidad superficial, lo que da lugar a un mayor error en las medidas de difracción y, por lo tanto, a un mayor error en los valores de tensiones obtenidos.

3.2. Evolución de la anchura de los picos de difracción

La variación de la anchura del pico de difracción es simultánea a la deformación plástica y caracteriza las microtensiones, que están directamente relacionadas con la microestructura del material^[14]. Por tanto, el estudio de la evolución de la anchura de los picos sirve para estudiar la evolución microestructural y de microtensiones del material^[8 y 9]. No obstante, el estudio de la evolución de la anchura de los picos de difracción proporciona únicamente información cualitativa, no cuantitativa, de la evolución de las microtensiones.

En la figura 5 se presenta, para los cuatro mecanizados objeto de estudio, la evolución con la profundidad de la anchura de los picos de difracción (211) de martensita, medidos para el cálculo de tensiones residuales. Para facilitar la comparación, en todos los casos se ha utilizado la misma escala.

La evolución obtenida en todos los casos es similar: la anchura tiende a disminuir en la superficie, hasta alcanzar un valor mínimo a cierta profundidad. Una vez alcanzado dicho mínimo,

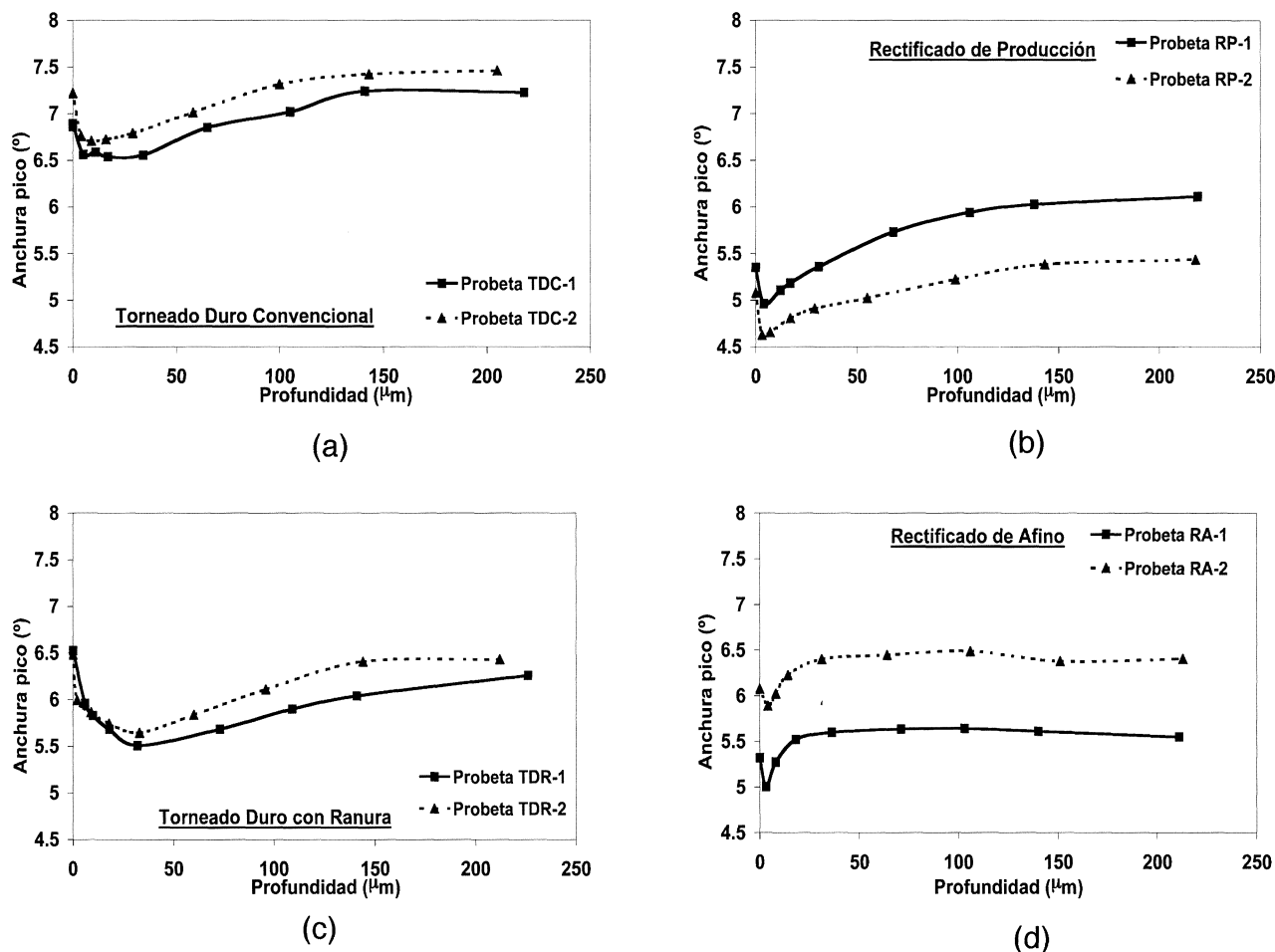


Figura 5. Evolución de la anchura de los picos de difracción con la profundidad para las probetas sometidas a los diferentes mecanizados objeto de estudio. (a) Torneado duro convencional (TDC). (b) Torneado duro con ranura (TDR): probeta TDR-1 sobre la ranura y probeta TDR-2 a 180° de la ranura. (c) Rectificado de producción (RP). (d) Rectificado de afino (RA).

Figure 5. Peak width evolution of the machined samples (a) Conventional hard turning (TDC) (b) Laser assisted hard turning (TDR): sample TDR-1 situated in the groove and sample TDR-2 situated at 180° of the groove (c) Production grinding (RP) (d) Finishing grinding (RA).

la anchura de los picos aumenta, hasta que, para una determinada profundidad, se alcanza un valor estacionario, que en la mayoría de los casos es superior al valor en la superficie. Las profundidades en las que se alcanzan el mínimo y el valor estacionario de la anchura de los picos es diferente en cada proceso de mecanizado. En los procesos de rectificado se alcanza el mínimo a una profundidad de, aproximadamente, 5 μm , mientras que en el caso de los procesos de torneado el mínimo se alcanza a profundidades de entre 20 y 30 μm . El estado estacionario se alcanza en torno a 150 μm en todos los casos, salvo en el caso del rectificado de afino en que se alcanza a, aproximadamente, 30 μm de profundidad. Estas profundidades coinciden con aquellas para las que se

llega a un estado nulo de macrotensiones (Fig. 4).

En los casos de torneado y para profundidades elevadas, se observa una cierta discrepancia entre las curvas obtenidas para cada par de probetas. Estas discrepancias se ven acentuadas en los casos de procesos de rectificado, en los que la forma de las curvas para las dos probetas es similar, pero “desplazada” una respecto de la otra. Estas discrepancias pueden ser consecuencia de la falta de redondez en las probetas mecanizadas. Se ha comprobado que el mayor error de redondez obtenido corresponde a las probetas sometidas a los dos procesos de rectificado, que son, justamente, los casos en los que se han observado mayores discrepancias entre probetas sometidas al mismo mecanizado.

3.3. Microestructura

En la figura 6 se muestran algunas de las micrografías obtenidas del material sometido a los cuatro mecanizados estudiados. Se ha llevado a cabo el estudio microestructural en dos superficies: una, perpendicular a la dirección de avance y, otra, perpendicular a la dirección de corte. En ambos casos se pretende observar la evolución de la microestructura desde la superficie hacia el interior del material. En todos los casos la escala es la misma para facilitar comparaciones.

De las micrografías mostradas en la figura 6 se puede concluir que la microestructura está íntimamente relacionada con el estado de tensiones presentes en el material. En los casos en los que en la superficie el estado de tensiones es de compresión (procesos de rectificado), no se observan cambios apreciables en la microestructura del material. Por el contrario, en el caso de torneado con ranura, se observa (Fig. 6 (b)) una capa superficial de menos de 5 μm de espesor, de estructura muy diferente al resto del material. Ésta parece ser la denominada "capa blanca"^[1, 4 y 5]. El espesor de esta capa coincide con el espesor en el que se tiene un estado fuertemente tractivo de tensiones y, como se mencionará a continuación, en esta capa blanca se observa, también, un incremento notable de dureza y de fracción de austenita retenida. Inmediatamente bajo esta capa blanca o capa ultradeformada, se observa una microestructura ligeramente diferente a la microestructura en el interior del material. En el caso de torneado duro convencional, también se observan tensiones de tracción en la superficie, si bien son de menor magnitud que en el caso del torneado con ranura. Esto puede explicar el hecho de que para el torneado convencional no se aprecie un cambio microestructural tan notable como el observado para el torneado asistido por láser.

Los cambios microestructurales observados tienen lugar en el mismo rango de espesores en el que se observan cambios en el estado de tensiones residuales. Esto ocurre no solamente para el material objeto de estudio sino también en otros materiales, como queda recogido en estudios anteriores^[9].

Para cada proceso de mecanizado se ha estudiado la microestructura en dos superficies: perpendicular a la dirección de corte y perpendicular a la dirección de avance. Esto ha permitido comprobar (Figura 6) cómo la mayor rugosidad en la superficie del material se da en la dirección de avance.

3.4. Fracción volumétrica de austenita retenida

En probetas similares a las utilizadas para el estudio de las tensiones residuales se ha medido la fracción volumétrica de austenita retenida a distintas profundidades. Al igual que en el caso de las tensiones residuales, las medidas a diferentes profundidades se han realizado tras la eliminación de capas mediante electropolido.

En la figura 7 se recoge, para los cuatro mecanizados objeto de estudio, la evolución con la profundidad de la fracción volumétrica de austenita retenida. En estas curvas, se observa que en las probetas sometidas a rectificado, la fracción volumétrica de austenita retenida permanece prácticamente constante en torno al que sería el valor correspondiente al material sin mecanizar (15 % en volumen). Por el contrario, para las probetas sometidas a torneado duro, se observa la siguiente evolución: en la superficie, la fracción volumétrica de austenita retenida es, aproximadamente, del 30 % en volumen, disminuyendo a un 10 % en volumen a una profundidad de, aproximadamente, 5 μm para posteriormente tender, en el interior del material, al valor del 15 % en volumen. En la probeta sometida a torneado duro convencional, el valor alcanzado en el interior del material se acerca al 19 %. Esto puede deberse al hecho de que, aunque todas las probetas provienen de la misma serie, puede haber ligeras diferencias composicionales entre unas barras y otras.

Este incremento de la cantidad de austenita en las superficies sometidas a torneado duro coincide con lo recogido por otros autores^[8 y 19] y se debe, probablemente, a una austenización parcial por insuficiente refrigeración o falta de revenido cuando las superficies mecanizadas sufren calentamiento (endurecimiento) y auto-temple durante el proceso de mecanizado. Las altas temperaturas alcanzadas en la superficie del material sometido a torneado duro puedan llevar a la disolución parcial de los carburos allí presentes. Como el posterior enfriamiento superficial es muy rápido, no es posible la difusión de carbono, resultando en un enriquecimiento en carbono de la matriz y, consecuentemente, la fracción volumétrica de austenita retenida aumenta. Inmediatamente bajo la superficie no se alcanzan temperaturas tan elevadas y la velocidad de enfriamiento es más lenta, permitiendo así la precipitación de carburos. Si precipitan carburos, disminuye el contenido en carbono de la matriz y, como consecuencia, disminuye, también, la fracción volumétrica de austenita retenida. Esto,

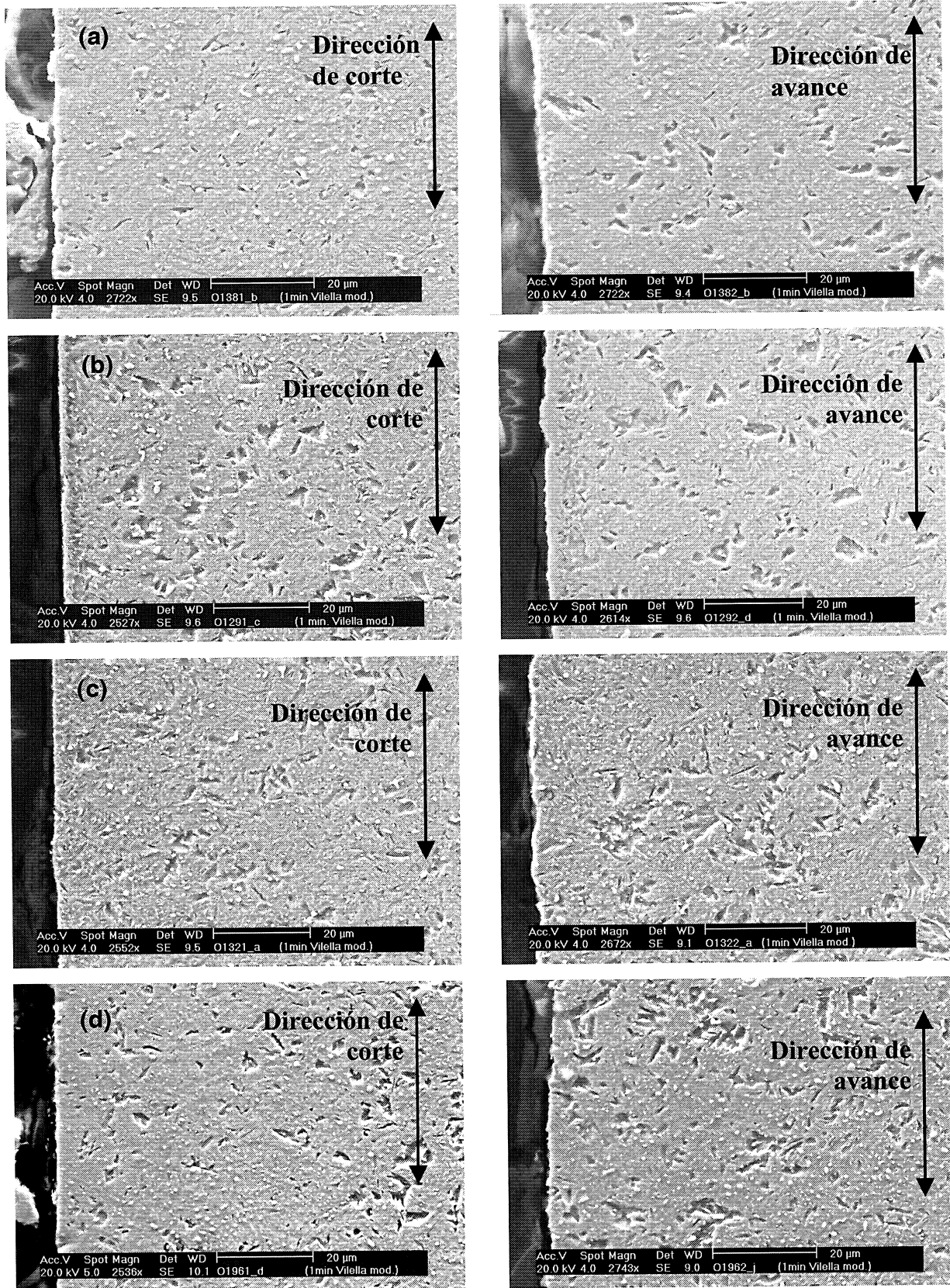


Figura 6. Micrografías obtenidas en SEM de las probetas sometidas a los cuatro mecanizados estudiados (Picral + HCl). (a) Torneado duro convencional. (b) Torneado duro con ranura. (c) Rectificado de producción. (d) Rectificado de afino.

Figure 6. SEM micrographs of the machined samples (picral + HCl). (a) Conventional hard turning. (b) Laser assisted hard turning. (c) Production grinding. (d) Finishing grinding.

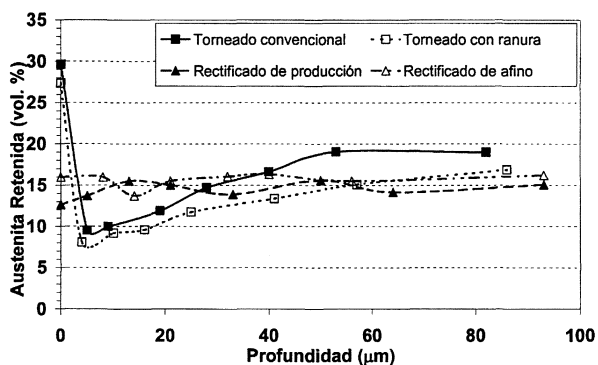


Figura 7. Evolución con la profundidad, para los cuatro mecanizados objeto de estudio, de la fracción volumétrica de austenita retenida.

Figure 7. Depth evolution of the volume fraction of retained austenite in the machined samples.

explica, por lo tanto, el hecho de que para las muestras torneadas se obtenga una fracción de austenita elevada en la superficie, que disminuye inmediatamente bajo la misma para, después, aumentar nuevamente hasta alcanzar el valor estacionario correspondiente al material sin mecanizar.

3.5. Nanodureza

En la figura 8 se muestran dos perfiles de dureza: uno, muestra la evolución de la dureza en una probeta en la que el estudio microestructural revela la presencia de capa blanca en la superficie y, el otro

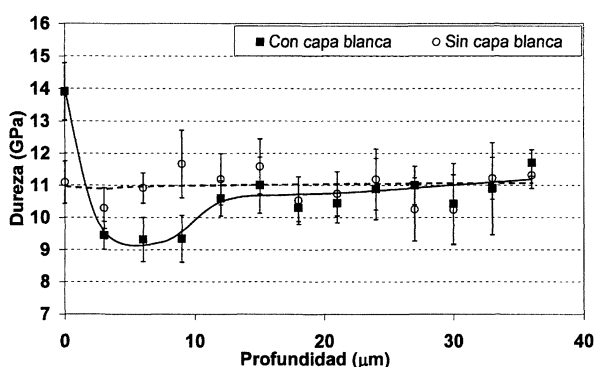


Figura 8. Evolución de la dureza con la profundidad en dos probetas de acero F-522 mecanizado: una probeta donde el mecanizado ha sido agresivo y ha generado capa blanca en la superficie y otra probeta que presenta microestructura final homogénea (no hay capa blanca).

Figure 8. Depth evolution of the hardness of two machined samples of F-522: one sample where the machining has generated white layer and another one without white layer.

perfil, corresponde a la evolución de la dureza en una probeta donde la microestructura es homogénea y no se observa capa blanca.

Los perfiles de dureza mostrados en la figura 8 están directamente relacionados con la microestructura observada, así como con las fracciones volumétricas de austenita retenida obtenidas. En los casos en los que el mecanizado no genera cambios estructurales notables y no se observa la presencia de capa blanca, la dureza se mantiene prácticamente constante. Por el contrario, se observa un incremento notable de dureza en la capa blanca generada en los procesos más abusivos de torneado duro, al igual que también se ha observado un incremento notable de la cantidad de austenita retenida. Esto es debido probablemente al endurecimiento producido, tanto por la deformación como por la generación excesiva de calor.

3.6. Reproducibilidad de los procesos de mecanizado

De cada rodaja de material mecanizado se han extraído, para el estudio de las tensiones residuales, dos probetas (“tejas”, Fig. 2) situadas a 180° una respecto de la otra. Se han estudiado las tensiones residuales en dos probetas de cada mecanizado, con el objeto de hacer un estudio de la reproducibilidad de los mecanizados y, en el caso del torneado con ranura, para estudiar el efecto de la ranura en el estado final de tensiones residuales.

De las curvas presentadas en la figura 4 se deduce lo siguiente:

Para los procesos de rectificado (tanto de afino como de producción), las curvas tensión residual frente a profundidad obtenidas para las dos probetas de cada mecanizado son, prácticamente, coincidentes al 100 %. Las pequeñas diferencias entre unas curvas y otras entran dentro del rango del error instrumental. Esto indica que los procesos de rectificado son perfectamente reproducibles.

En las probetas sometidas a torneado (tanto torneado duro convencional como torneado duro con ranura) se obtiene, para las dos probetas de cada mecanizado, la misma evolución de las tensiones, si bien se observan algunas discrepancias en cuanto a la magnitud del pico de tracción que aparece en la superficie y del pico de compresión que aparece inmediatamente bajo la misma. Esta discrepancia se debe, probablemente, más que a falta de reproducibilidad del mecanizado, al hecho de que, como ya se ha mencionado anteriormente, tras el proceso de torneado se obtiene una superficie

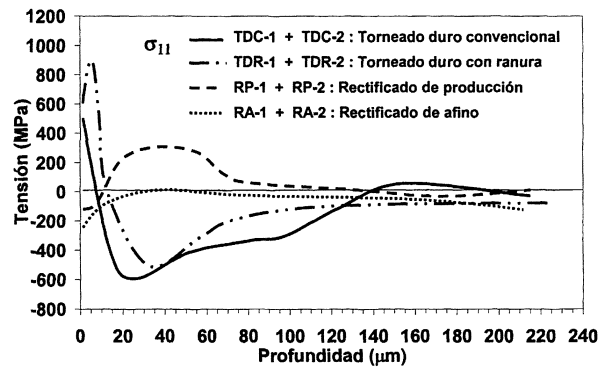
con mayor rugosidad que tras los procesos de rectificado. Cuanto mayor es la rugosidad, el error en las medidas de difracción es mayor y, por lo tanto, los errores para los valores de tensiones obtenidos son mayores.

Para las probetas sometidas a torneado con ranura se observa (Fig. 4) que el pico es más tractivo en la superficie de la probeta situada sobre la ranura (probeta TDR-1) que en la de la probeta situada a 180° de la misma (probeta TDR-2). Asimismo, el pico de compresión que aparece inmediatamente bajo la superficie es ligeramente más compresivo y a lo largo de mayor espesor, en la probeta situada sobre la ranura que en la probeta a 180° de la ranura. Estas discrepancias sistemáticas pueden estar originadas por dos factores: la rugosidad de las probetas por el torneado hace que el error en la determinación de las tensiones sea mayor, como se ha mencionado en el párrafo anterior y, por otra parte, parece que la realización de la ranura por medio de láser produce una generación de calor en esa zona del material, dando lugar a tensiones más tractivas y a cambios microestructurales en el material.

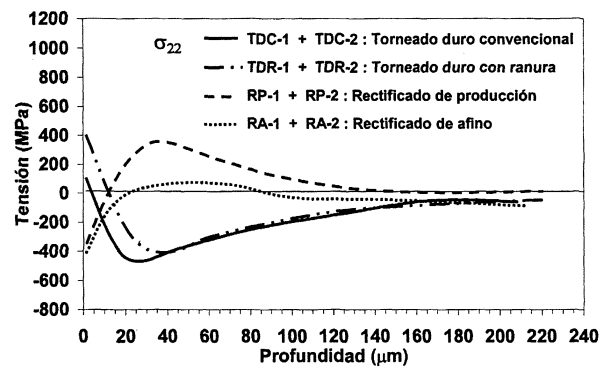
3.7. Comparación entre mecanizados: optimización del proceso de mecanizado

En la figura 9 se recogen las curvas que muestran la evolución con la profundidad de las tensiones residuales generadas por los cuatro procesos de mecanizado objeto de estudio. En estas gráficas, se han condensado, en una sola curva de ajuste, los puntos experimentales obtenidos para cada par de probetas extraídas de una misma rodaja. Es decir, se presenta el ajuste de todos los puntos experimentales obtenidos para cada dos probetas del mismo mecanizado. Se han separado las dos componentes principales del tensor de tensiones en dos gráficas diferentes: componente σ_{11} en la figura 9 (a) y componente σ_{22} en la figura 9 (b). Esta figura 9 permite, por lo tanto, una comparación más directa de las tensiones residuales generadas por cada uno de los mecanizados objeto de estudio. Esto va a permitir determinar cuál o cuáles son los procesos de mecanizado óptimos para el material.

Lo más perjudicial para la vida en servicio de la pieza es la presencia en la superficie de un estado de tensiones de tracción, puesto que esto facilita la formación y propagación de grietas. Observando la figura 9, queda, por lo tanto, claro, que los procesos de torneado son más perjudiciales para el material que los procesos de rectificado, dado que los dos procesos de torneado generan tensiones de



(a)



(b)

Figura 9. Comparación de la evolución con la profundidad de las tensiones residuales obtenidas para cada proceso de mecanizado. Se han condensado en un mismo ajuste los puntos experimentales de las dos probetas estudiadas para cada mecanizado. (a) Componente principal σ_{11} del tensor de tensiones (dirección transversal o dirección de corte). (b) Componente principal σ_{22} del tensor de tensiones (dirección longitudinal o dirección de avance).

Figure 9. Comparison of the stress distributions as a function of depth for each machining process. It has been condensed in the same fitting the experimental points of the two samples of each machining. (a) σ_{11} component (transversal direction) (b) σ_{22} component (longitudinal direction).

tracción en la superficie, mientras que los dos procesos de rectificado generan tensiones de compresión en la misma. Por otra parte, inmediatamente bajo la superficie, los procesos de rectificado generan tensiones de tracción o nulas, mientras que los procesos de torneado generan tensiones de compresión a lo largo de un cierto espesor, antes de tender a cero. Por lo tanto, los procesos de torneado generan un estado de tensiones menos perjudicial inmediatamente bajo la superficie.

En las curvas (Fig. 9) obtenidas para los dos procesos de torneado duro (convencional y con ranura) y en las microestructuras generadas por cada

proceso (Fig. 6 (a) y (b)), se observa que el torneado con ranura resulta más agresivo para el material que el torneado convencional, ya que el torneado con ranura genera tensiones más tractivas en la superficie y menos compresivas en el interior, además de generar un cambio microestructural fuerte. Esta diferencia puede ser consecuencia de la generación de calor que tiene lugar en la formación de la ranura mediante láser.

De las curvas (Fig. 9) obtenidas para los dos procesos de rectificado (de producción y de afino) puede concluirse que, el menos perjudicial es el rectificado de afino, puesto que el rectificado de producción da lugar a estados de tensiones de tracción inmediatamente bajo la superficie, que no aparecen en el caso de rectificado de afino. El rectificado de afino da lugar, por tanto, a un estado de tensiones más adecuado, pero la productividad disminuye, por lo que es necesario llegar a un compromiso y determinar los parámetros de mecanizado adecuados para conseguir una buena calidad sin perder los niveles de producción necesarios.

A la vista de la figura 9 y de las observaciones apuntadas en los párrafos anteriores, podría concluirse que el proceso ideal de mecanizado (prescindiendo de consideraciones económicas) consistiría en un torneado convencional, seguido de un breve proceso de rectificado de afino que elimine un espesor de alrededor de 20 μm .

4. CONCLUSIONES

- En la superficie, los procesos de rectificado del acero F-522 generan tensiones de compresión, mientras que los de torneado duro generan tensiones de tracción, siendo, por tanto, éstos últimos, más agresivos en lo que respecta a la calidad y tensiones residuales superficiales.
- Inmediatamente bajo la superficie, el torneado duro genera tensiones de compresión, mientras que con el rectificado se obtienen tensiones nulas o de tracción, dependiendo de los parámetros de rectificado. Por tanto, en lo que respecta al estado de tensiones bajo la superficie, resulta más apropiado cualquiera de los procesos de torneado duro.
- Los resultados obtenidos de la evolución de las tensiones residuales con la profundidad para los cuatro procesos de mecanizado estudiados son perfectamente reproducibles.
- Las diferencias en las curvas tensión-profundidad obtenidas en los casos de probetas so-

metidas a torneado duro (torneado duro convencional y torneado duro con ranura) se atribuyen, más que a falta de reproducibilidad, al hecho de que estos mecanizados generan mayor rugosidad superficial y esta rugosidad provoca una mayor imprecisión en las medidas de difracción.

- Por lo que respecta al rectificado de afino y rectificado de producción, resulta más idóneo el rectificado de afino, ya que éste genera un estado de tensiones de compresión en la superficie y nulo en el interior, mientras que el rectificado de producción genera un pico tractivo, inmediatamente bajo la superficie, lo que resulta desfavorable, ya que las tensiones de tracción favorecen la formación y propagación de grietas.
- En lo referente al torneado duro convencional y torneado duro con ranura, el más perjudicial es el torneado con ranura ya que, si bien ambos presentan la misma tendencia para la evolución de las tensiones con la profundidad, en el caso del torneado duro con ranura se obtienen tensiones más tractivas en la superficie y menos compresivas en el interior, lo que resulta más perjudicial para la vida en servicio de la pieza.
- Se ha comprobado que el estado de tensiones residuales generado en un material por un determinado proceso de mecanizado está íntimamente relacionado con la microestructura, dureza y fracción volumétrica de austenita retenida en el material mecanizado. Así, se ha observado que, en los casos en que el mecanizado genera picos de tracción en la superficie el cambio microestructural es notable: aumenta considerablemente la fracción volumétrica de austenita retenida en la superficie y aparece la denominada capa blanca, que presenta una mayor dureza que el resto del material.
- A la vista de los resultados obtenidos puede concluirse que, la medida de tensiones residuales combinada con un análisis microestructural exhaustivo constituye una herramienta de diagnóstico muy buena para seleccionar procesos de mecanizado para piezas de responsabilidad. En el caso estudiado, el proceso óptimo de mecanizado desde el punto de vista de las tensiones residuales y los cambios estructurales generados, consistiría en un torneado duro convencional, seguido de un rectificado de afino que eliminase un espesor de aproximadamente 20 μm .

Agradecimientos

Los resultados de este trabajo son parte de la investigación llevada a cabo en el marco de un Proyecto de Cooperación (Ref. 121402), dentro del Programa INTEK, financiado por el Gobierno Vasco.

Los autores agradecen al Dr. Antonio Martín Meizoso su colaboración en la realización de los ajustes mediante β -“splines” cúbicos y a la Dra. Reyes Elizalde su colaboración en la obtención de los perfiles de dureza mediante nanoindentación. Asimismo, agradecen al Dr. Justino Fernández su apoyo en el desarrollo del Proyecto de colaboración que ha dado lugar este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] A.M. ABRAO Y D.K. ASPINWALL, *Wear* 196 (1996) 279-284.
- [2] A. BARBACKI, M. KAWALEC Y A.HAMROL, *J. Mater. Proc. Technol.* 133 (2003) 21-25.
- [3] W. KÖNIG, A. BERKTOLD Y K.-F. KOCH, *Ann. CIRP* 42 (1993) 39-43.
- [4] S. P. MOYLAN, S. KOMPPELLA, S. CHANDRASEKAR Y T.N. FARRIS, *Trans. ASME* 125 (2003) 310-314.
- [5] K. NEAILEY, *Met. Mater.* 1 (1988) 93-96.
- [6] J. RECH Y A. MOISAN, *Int. J. Mach. Tools & Manuf.* 43 (2003) 543-550.
- [7] M.J. BALART, A. BOUZINA, L. EDWARDS Y M.E. FITZPATRICK, *Mater. Sci. Eng.*, A 367 (2004) 132-142
- [8] N. ORDÁS, M.L. PENALVA, J. FERNÁNDEZ Y C. GARCÍA-ROSALES, *J. Appl. Cryst.* 36 (2003) 1135-1143.
- [9] V. GARCÍA, N. ORDÁS, M.L. PENALVA, J. FERNÁNDEZ, K. OSTOLAZA Y C. GARCÍA-ROSALES, *Bol. Soc. Esp. Ceram. V.* 43 (2004) 251-254.
- [10] P.VOMACKA Y H. WALBURGER, *Mater. Sci. Forum* 347-349 (2000) 592-597. (*Proc.5th European Conference on Residual Stresses, ECRS5*).
- [11] G. PARRISH, *Heat Treat. Met.*, 4 (1977) 107-116.
- [12] M. G. MOORE Y W. P. EVANS, *SAE Trans.* 66 (1958) 340-345.
- [13] I.C. NOYAN Y J.B. COHEN, *Residual Stress. Measurement by Diffraction and Interpretation*. MRE, Materials Research and Engineering. Ed. Springer-Verlag, 1987.
- [14] J. LU, *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. Society for Experimental Mechanics, Ed. The Fairmont Press, Inc, 1996.
- [15] H. WERN Y A. PEITER, *Swiss Mater.*, 1 (1989) 16-23.
- [16] H. WERN, *Strain* (1991) 127-136.
- [17] R.L. MILLER, *Trans. ASM*, 57 (1964) 892-899.
- [18] E.V. SHIKIN Y A. I. PLIS, *Handbook on Splines for the User*. CRC Press, Boca Ratón, EEUU (1995) 32-36.
- [19] Y.K. CHOU, C.J. EVANS, *Int. J. Mach. Tools & Manuf.* 39 (1999) 1.863-1.881.