

Evaluación del perfil de tensiones residuales por granallado en un acero SAE 5160H usando microdureza y difracción de rayos X

Alexander Viloría Estrada¹, David Mantilla M², Daiver Alberto García Salinas³, Wilmar Barbosa⁴, Alberto David Pertuz Comas⁵, Claudia Constanza Palacio Espinosa⁶, Fidel Alfonso Romero⁷, Jorge Guillermo Díaz Rodríguez⁸*

¹ Industrias Metálicas Asociadas S.A, Bogotá, Colombia alexander.viloría@somosgrupo-a.com

² Industrias Metálicas Asociadas S.A., Bogotá, Colombia david.mantilla@somosgrupo-a.com

³ Escuela de ingeniería mecánica. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia daivergarciasalinas@gmail.com

⁴ Escuela de ingeniería mecánica. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia wilmar100811@gmail.com

⁵ Escuela de ingeniería mecánica. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, apertuzc@uis.edu.co

⁶ Escuela de ciencias aplicadas e ingeniería EAFIT, Medellín, Colombia cpalac12@eafit.edu.co

⁷ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Duitama, Colombia fidel.romero@uptc.edu.co

⁸ Escuela de ingeniería mecánica. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, jgdiazro@correo.uis.edu.co

* corresponding author

Resumen

Es aceptado que el granallado se realiza en metales para lograr un endurecimiento superficial que mejora la vida a fatiga de componentes de máquinas, en este caso aplicado a muestras de acero SAE5160H templado en aceite y revenido a 460 °C usado para resortes de ballesta. En este estudio, estas tensiones residuales se miden por medio de difracción de rayos X (DRX) y se mide la dureza en el área perpendicular a la superficie granallada usando una combinación de preparación metalográfica y microdureza Vickers. Con esta combinación de técnicas se consigue medir el efecto del granallado tanto en valor como en posición perpendicular a la superficie tratada. Para el material granallado, se obtuvo un promedio de -365.8 ± 78 MPa medidos por DRX y una microdureza máxima de 525 ± 92.7 HVN en la superficie. De otro lado, para el material sin granallar se obtuvo un promedio de mientras que la muestra As presenta tensiones residuales positivas promedio de 54.2 ± 54.3 MPa medidos por DRX y 433 ± 39.5 HVN sin presentar una diferencia estadísticamente significativa en los puntos medidos. La técnica propuesta, ofrece la ventaja de realizar mediciones a través de la profundidad a intervalos tan pequeños como 10 μm con una preparación más simple, lo que le entrega ventajas sobre otras técnicas como la DRX o la perforación de hueco ciego.

Palabras clave: granallado; microdureza Vickers; SAE 5160H; tensiones residuales, ballesta.

Abstract

It is accepted that shot peening is performed on metals to achieve surface hardening that improves the fatigue life of machine components; in this case, it was applied to samples made out of SAE5160H steel quenched and tempered in oil at 460 °C used for leaf springs. This study measures these residual stresses through X-ray diffraction (XRD). Moreover, hardness is measured on the perpendicular-to-the-peened surface using a combination of metallographic preparation and Vickers microhardness (HVN). With this combination of techniques, it is possible to measure the effect of shot blasting in value and perpendicular to the treated surface. For the shot peened material, an average of -365.8 ± 78 MPa measured by XRD and a maximum microhardness of 525 ± 92.7 HVN on the surface were obtained. Alternatively, an average of 54.2 ± 54.3 MPa measured by XRD and 433 ± 39.5 HVN was obtained for the material without shot peening. At the same time, the same sample presented no statistically significant HVN difference in the measured points. The proposed technique offers the advantage of using measurements through depth at intervals as small as 10 μm with a more straightforward preparation, which gives it advantages over other techniques such as XRD or blind hole drilling.

Keywords: Shot peening, Vickers microhardness, residual stress, SAE 5160, leaf springs.

1. Introducción

La industria manufacturera realiza procesos que propenden por modificar el comportamiento de partes ante situaciones de servicio determinadas. Ante cargas

alternativas, se realizan tratamientos térmicos termoquímicos y termomecánicos, recubrimientos y acabados superficiales que apuntan a mejorar el comportamiento de estos componentes [1], [2]. El granallado es una técnica ampliamente utilizada para mejorar propiedades mecánicas superficiales mejorando la respuesta en fatiga del componente [3], [4]. Este proceso se usa ampliamente en resortes helicoidales y de ballesta usados en la industria automotriz.

Las tensiones residuales compresivas en componentes bajo cargas cíclicas se inducen para mejorar el comportamiento a fatiga [1], [4]. La cuantificación del efecto del granallado se hace por métodos como la intensidad Almen [5], perforación incremental en huecos ciegos según ASTM - E837 o por difracción de rayos X (DRX) [6]. Sin embargo, estas tres técnicas son métodos superficiales [4][3], incluso la perforación por hueco ciego pero su resolución es pequeña en el rango de las profundidades modificadas por el granallado. Hernández y col. [2] realizaron una cuantificación de estas tensiones residuales por granallado en acero AISI SAE 5160H usando una combinación de dos técnicas: electro pulido para remover material sin afectar la dureza del material expuesto y DRX para medición de tensiones residuales en cada nueva superficie expuesta. Aunque entrega buenos resultados, esta técnica es bastante dispendiosa y se hace difícil controlar la cantidad de material removido. Rodrigues y col. [7] midieron tensiones residuales con galgas extensiométricas en ranuras a diferentes profundidades tratadas como elipses y ajustando mediciones al campo de tensiones de Inglis [8]. Jaramillo y col. [4] midieron microdureza en un acero SAE 5160 sometido a granallado, pero sólo a nivel superficial mientras que Muñoz y col. [9] midieron dureza en un acero SAE 306 sometido a rolado profundo. Xia [10] evaluó tensiones residuales en un acero 50CrMnMoVNb con DRX encontrando valores máximos de hasta 500 MPa entre 50 y 100 μm de profundidad. El material fue pulido mecánicamente para remover espesor y realizar las mediciones por DRX. Finalmente, Aguado y col. [11] propusieron recientemente una función que describe el perfil óptimo del perfil de granallado para mejorar la respuesta en fatiga de un componente.

De otro lado, el requerimiento de un resorte de ballesta es el grado del acero, este debe tener suficiente templabilidad para que el tamaño del grano del material asegure una estructura completamente martensítica en toda la sección. La no transformación en martensita produce una deficiencia en las propiedades de resistencia a la fatiga [12], [13].

La microdureza Vickers (HVN) de otro lado, puede realizar mediciones localizadas con indentaciones tan pequeñas como 25 μm [14] lo que permite evaluar localmente su variación en un plano.

El acero SAE 5160H es adecuado para la fabricación de resortes de ballestas. Su composición química se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del SAE 5160.

C	Mn	Cr	P	Si	S	Fe
0.56 - 0.64	0.75 - 1	0.7-0.9	≤ 0.035	0.15- 0.30	≤ 0.04	Bal

Fuente: [2]

El artículo muestra cómo la dureza de un acero SAE 5160H, con y sin granallado, varía a través de la profundidad. El método empleado demuestra que es posible realizar una cuantificación de la penetración de tensiones residuales por granallado a través de la profundidad. Se presenta una comparación de tensiones residuales superficiales por DRX y a través de la profundidad por microdureza realizada cortando las muestras en la sección transversal.

2. Fundamentación teórica

2.1. Fatiga

La fatiga en los materiales es uno de los mayores problemas que afectan la industria, ya que las piezas siempre estarán expuestas a tensiones fluctuantes, produciendo nucleación de micro-fracturas que al propagarse en el tiempo, generan fallas catastróficas [1]. Existen tres métodos para estimar fallos por fatiga. Tensión vida, $S-N$, que se encarga de predecir para números de ciclos mayores a 10000; deformación vida, $\epsilon-N$, o fatiga de bajos ciclos, hasta alrededor de 10000 ciclos [15] y el método da/dN que se basa en la mecánica de fractura y que apunta a predecir la vida de servicio en presencia de grietas [16]. Se puede afirmar que la gran mayoría de componentes se diseñan con el método $S-N$ [1]. Los resortes de ballesta, p. ej. se diseñan para vidas de al menos 100000 ciclos [3], [13].

2.2. Granallado e intensidad Almen

Existen factores que modifican la vida a fatiga de un componente, como p. ej. el granallado. Este es un proceso en frío que consiste en impactar con partículas a alta velocidad (20 a 120 m/s) una superficie para aumentar su dureza [3] generando deformaciones plásticas superficiales y tensiones residuales de compresión, ambas afectando solo una capa de poco espesor (0.1 a 0.5 mm) [17]. Entonces en componentes automotrices, como p. ej. los resortes de ballesta que están sometidos a tensiones normales por flexión, se genera un efecto benéfico en la zona sometida a tensiones positivas [4]. Este tratamiento se aplica comúnmente a componentes de ingeniería que tienen geometría compleja [2] o que están sometidos a tensiones fluctuantes altamente localizados que pueden sufrir de *fretting* [4], [17].

De otro lado, el granallado puede impactar negativamente el comportamiento de un metal en ambientes corrosivos, ya que disminuye el potencial de degradación de la capa pasiva [1]. Más aún, se han reportado cambios no significativos en el comportamiento a fatiga del acero AISI/SAE 5160 cuando se realizaron ensayos de flexión alternativa en 3 puntos [4] y cambios significativos en aceros de bajo carbono bajo ambientes agresivos [18].

Más aun, la intensidad Almen es una medida de la energía transmitida por la granalla en el impacto al componente procesado [2], [18]. Esta escala mide la deflexión del arco que se forma en una placa de acero de acero SAE 1070, y dimensiones normalizadas, al ser impactada por granalla en sólo una cara. El procedimiento para realizar dicha medición está estandarizado por las normas SAE 442 [19] y SAE J443 [5]. Los parámetros del proceso de granallado son: material y diámetro de las esferas de granalla, ángulo del chorro, distancia del chorro a la superficie, presión de aire, tiempo de exposición y flujo de granalla [3], [17]. La apariencia superficial de una muestra sometida a granallado se aprecia en Figura 1. A pesar de tener una rugosidad que podría favorecer la iniciación de grietas, la tensión compresiva inducida por la deformación genera un comportamiento benéfico ante carga alternante.

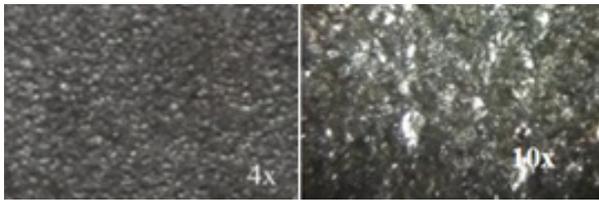


Figura 1. Apariencia superficial de una superficie granallada, a) 4X; b) 10X. Fuente: [18]

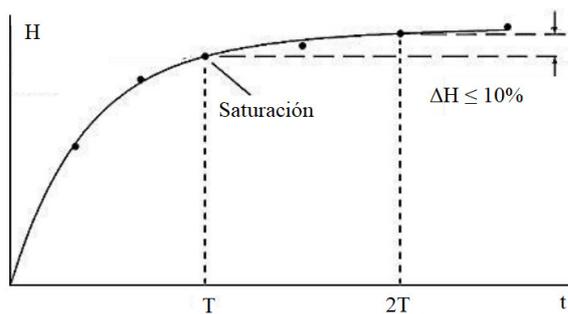


Figura 2. Esquemático de la curva de saturación. Fuente. Adaptado de [19].

Al graficar la deflexión H del arco formado contra tiempo de exposición se genera una curva que es descrita por una parábola que abre hacia el eje del tiempo. Por lo tanto, el efecto de aumentar la exposición no genera mayor cambio en la curvatura y por lo tanto en las tensiones residuales. El granallado ideal se alcanza cuando al doblar el tiempo t de

exposición a granalla se obtiene solo un aumento de la deflexión del arco, ΔH , que no supera el 10%. Esto se conoce como curva de saturación [19] y se aprecia en la Figura 2.

2.3. Tensiones residuales

Las tensiones residuales son tensiones internas que permanecen en un material sólido después de que ha cesado la acción de la causa que las originó. Estas tensiones pueden ocurrir debido a una variedad de mecanismos que incluyen deformaciones plásticas cíclicas [20], gradientes de temperatura elevados o cambios microestructurales (por ejemplo, transformación de fase) [1]. Es una ocurrencia común pero generalmente indeseable.

La difracción de rayos X (DRX) se basa en la ley de Bragg para determinar el distanciamiento entre átomos en materiales cristalinos, lo que permite que dicha separación actúe como rejillas de difracción y conduzcan a la generación de patrones que puede ser caracterizados. El procedimiento para establecer tensiones residuales por DRX es descrito en la norma ASTM E2860 [6]. La técnica de DRX permite medir variaciones en el parámetro de la red cristalina para así calcular las tensiones residuales.

Por otro lado, la técnica del orificio ciego, cuyo procedimiento está estandarizado por la norma ASTM E837 [21], se basa en el principio de que las tensiones en las superficies libres son nulas. Una galga extensiométrica colocada en una superficie mide deformaciones unitarias (ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{xy}) y al realizar perforaciones incrementales justo en el centro de la roseta que se forman por la localización de las galgas, se pueden medir deformaciones unitarias alejadas de la superficie, hasta una profundidad que puede llegar hasta los 15 mm [7].

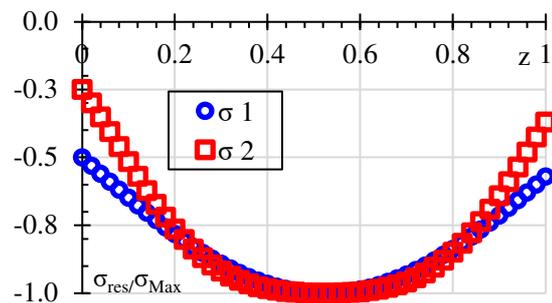


Figura 3. Ejemplos de distribución de perfiles de tensiones residuales según la ecuación (1), [11]. Fuente: elaboración propia.

Recientemente Aguado y *col.* [11], han presentado un modelo, basado en la función de decaimiento sinusoidal y que se muestra en la ecuación (1). Esta función describe el perfil de tensiones residuales para

un componente sometido a fatiga. Un ejemplo de dos perfiles de tensiones residuales teóricos, llamados σ_1 y σ_2 , obtenidos a partir de la ecuación (1) y usando constantes arbitrarias, se muestra en la Figura 3 en la cual, el eje vertical es tensión residual normalizada.

$$\sigma_{res} = A \exp^{-\lambda z} \cos(\omega z + \theta) \quad (1)$$

donde A , λ , θ , y ω son constantes a calibrar para cada componente y z la coordenada desde la superficie tratada hacia el centro del componente.

3. Materiales y Métodos

Se prepararon muestras de acero SAE 5160H con y sin granallado (llamadas SP y As, respectivamente), a las que se les hicieron cortes perpendiculares en una sierra metalográfica de precisión Buehler IsoMet 1000. Seguidamente, las muestras fueron desbastadas en una pulidora rotacional con papel abrasivo número 60 y disminuyendo gradualmente el tamaño de partícula hasta 2000. Después se realizó pulido con alúmina de 1 μm . Finalmente, las muestras fueron atacadas con Nital al 5% durante 12 segundos. Mediante microscopía óptica, se verificó que la microestructura corresponde al tratamiento térmico empleado.

Para cuantificar la microdureza se usó un microdurómetro Brucker UMT TriboLab™ usando escala Vickers y aplicando una carga de 5N. Para cada indentación, se obtuvieron las longitudes de las diagonales d_1 y d_2 de la huella dejada por el indentador tal y como se esquematiza en la Figura 4. Una vez obtenidas las diagonales, la dureza Vickers (HV) se calcula con la ecuación (2).

$$HV = 0.102 \frac{2F \sin \alpha}{d^2} \quad (2)$$

donde F es la fuerza aplicada en N, d la longitud de la diagonal en mm y α el ángulo de la punta del indentador, 136° en este caso.

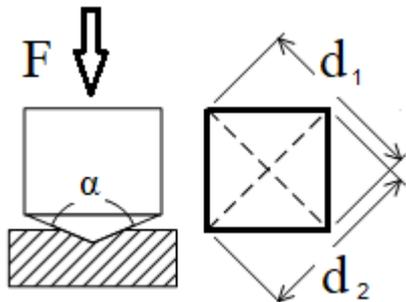


Figura 4. Esquemático de una indentación Vickers y nomenclatura usada. Fuente: elaboración propia

Para poder cuantificar la intensidad del granallado, se midieron las coordenadas de cada una de las indentaciones realizadas sobre la superficie cortada y

pulida, siguiendo el sistema de coordenadas mostrado en la Figura 5. El origen del sistema de coordenadas está ubicado en la esquina superior izquierda. La conversión entre escalas de dureza se hizo según ASTM E140.

Debido a la imposibilidad de medir microdureza Vickers en la superficie granallada se realizaron mediciones de dureza Rockwell C (HRC). La conversión de escalas se hizo mediante la ASTM E140.

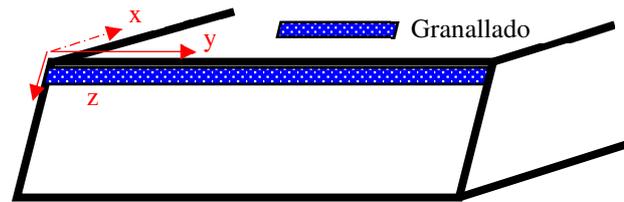


Figura 5. Esquemático de ubicación de las mediciones de microdureza. Fuente: elaboración propia

Finalmente, las tensiones residuales superficiales se midieron con un difractómetro GNR-SpiderX® modelo 2018 con tubo de rayos X de Cr.

4. Resultados y discusión

4.1. Microestructura

La Figura 6 muestra una micrografía a 1000 aumentos de la estructura del acero SAE5160H empleado en este estudio. Se observa una microestructura que corresponde a martensita revenida, fina y acicular que es correspondiente con altas durezas, mientras que los precipitados de carburo se visualizan en las regiones oscuras.

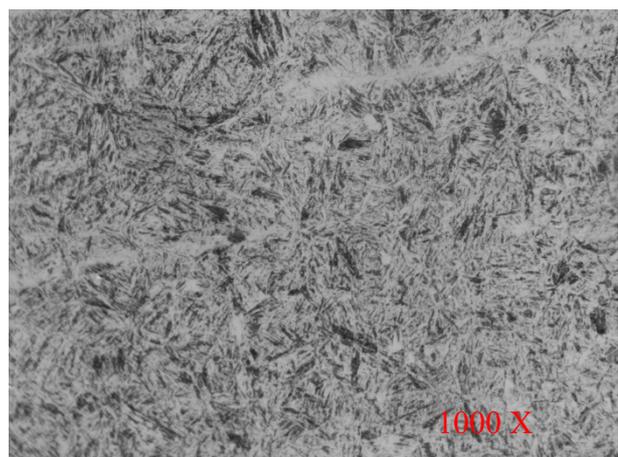


Figura 6. Microestructura del acero empleado. Fuente: elaboración propia

4.2. DRX

Se hicieron mediciones en seis puntos para dos muestras As y una muestra SP con 9 mediciones en

cada punto. Un esquemático de la ubicación de los puntos medidos se muestra en Figura 7. Las muestras tenían 10 mm de ancho x 15 mm de largo y ¼” de espesor. El valor de tensiones residuales en cada punto es el resultado de hacer un barrido de 9 mediciones a diferentes ángulos. Entonces el resultado de tensión residual entregado en cada punto es el promedio de las 9 mediciones hechas a diferentes ángulos. Cada punto es barrido por los rayos X en ángulos entre -30° y +30° medidos desde una línea perpendicular a la probeta. El goniómetro hace 9 medidas: 4 antes del ángulo cero, 1 en cero y otras 4 después del ángulo cero. La confiabilidad de la medición está por encima del 80%. Los datos positivos de tensión son a tracción y los negativos son de compresión.

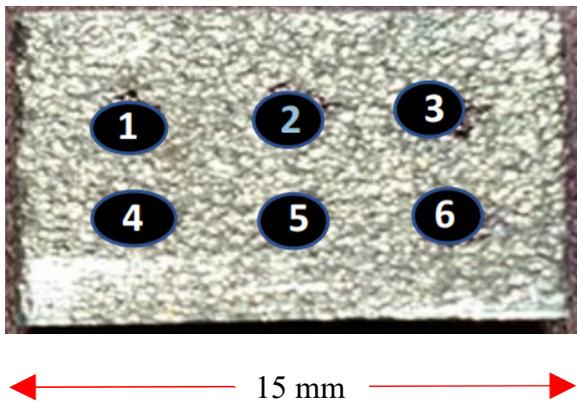


Figura 7. Esquemático de la ubicación de los puntos de medición de tensiones residuales por DRX. Se aprecia la rugosidad propia de una superficie modificada por granallado. Fuente: elaboración propia

La Figura 8 muestra el valor absoluto de las tensiones residuales superficiales medidas por la técnica de DRX. Se aprecia que en la muestra con SP las tensiones residuales presentan tensiones residuales de compresión de valor promedio -365.8 ± 78 MPa mientras que la muestra As presenta tensiones residuales positivas promedio de 54.2 ± 54.3 MPa. Se aprecia entonces un aumento de tensión residual compresivo promedio de 420 MPa sobre las muestras As. Más aun, al comparar la tensión residual superficial con la resistencia a la flexión (2170 MPa), se obtiene un incremento del 16.8% que está dentro de los valores aceptados por la industria para el proceso [3], [13]. Sin embargo, la técnica DRX entrega resultados de tensión residual superficial, es decir, sin hacer perforaciones o sin ningún retiro de material. Por lo tanto, no se conoce la profundidad de este cambio ni como varían dichos esfuerzos.

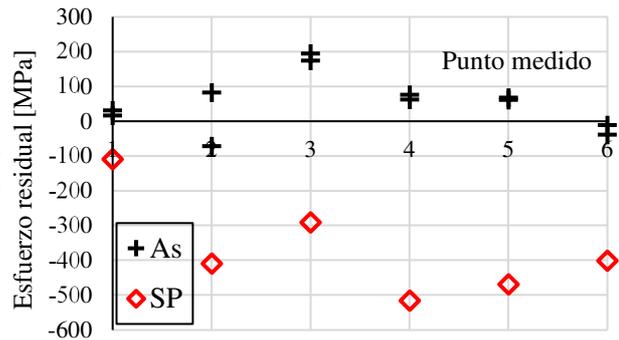


Figura 8. Cuantificación de tensiones residuales por DRX. Fuente: elaboración propia.

4.3. Microdureza

La

Figura 9 muestra los resultados de microdureza Vickers para una muestra con granalla tomada a tres profundidades medidas (0.07, 0.17 y 0.27 mm) desde la superficie procesada. Los valores de HV se estimaron según la ecuación (2).

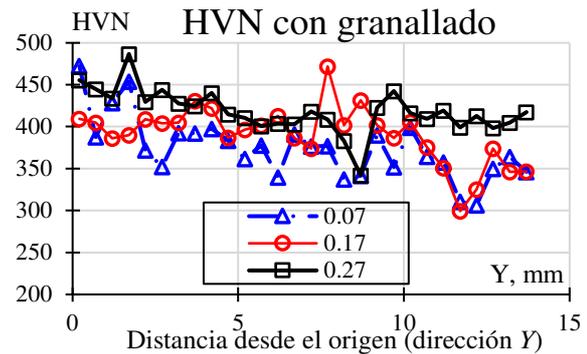


Figura 9. Microdureza Vickers medida a diferentes profundidades del borde para un muestra granallada (SP). Fuente: elaboración propia

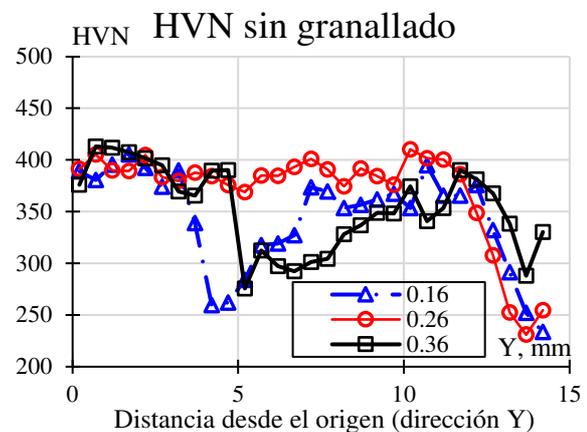


Figura 10. Microdureza Vickers a diferentes profundidades del borde para un muestra sin granallar (As). Fuente: elaboración propia

La

Figura 10 muestra los resultados de microdureza Vickers para una muestra sin granalla tomada a tres profundidades (0.16, 0.26 y 0.36 m medidas desde la superficie procesada. Los valores de HV se estimaron según la ecuación (2).

A partir de los resultados de microdureza, se calculó su promedio y desviación estándar para cada profundidad Z. La Tabla 2 muestra los valores promedio de microdureza Vickers y desviación estándar para muestras con granallado a las 4 distancias medidas. Se observa que en la muestra con granallado, la HVN varía entre 525 en la superficie, alcanzar un mínimo a 374 MPa a 0.07 mm y luego se recupera a 390 a 0,17 y 418 a 0.27 mm. Se aprecia una variación de microdureza al variar la profundidad y una direccionalidad tal y como se discute en literatura. [11]; el mayor incremento ocurre no en la superficie, pero si a una profundidad alrededor de 0.3 mm desde la superficie granallada.

Tabla 2. Valores promedio de microdureza Vickers y desviación estándar para muestras con granallado. Fuente: elaboración propia

Z [mm]	HVN	SD
0	525.63	92.7
0.07	374.07	36.9
0.17	390.45	34.5
0.27	418.23	25.8

De otro lado, la Tabla 3 muestra los valores promedio de microdureza Vickers y desviación estándar para muestras sin granallado a las 4 distancias medidas Se observa que la HVN varía entre 433 y 344.

A pesar de ter un par de puntos extremos en ambas muestras, la SD está entre el 39.5 y 48.2 HV (9.1 a 14%) para sin granallado y entre 92.7 y 25.8 HVN (17.6 a 6.2%) para la muestra con granallado. Esto indica que a pesar que la literarura cita al granallado como un proceso heterogéneo, se evidencia un variación del efecto del proceso a partir de la dispersion de datos.

Tabla 3. Valores promedio de microdureza Vickers y desviación estándar para muestras sin granallado. Fuente: elaboración propia.

Z [mm]	HVN	SD
0	433	39.5
0.36	352.7	40.6

0.26	370.11	47.1
0.16	344.13	48.2

La Tabla 3, correspondiente a la microdureza en la muestra granallada evidencia valores más homogéneos de microdureza Vickers, en comparación con los valores observados en la Tabla 2 y que corresponden a la muestra sin granallado, lo cual se ve también reflejado en las desviaciones estándar de las mediciones, lo cual puede estar relacionado con el efecto de compresión de la superficie del material analizado cuando es tratada mediante granallado y en concordancia con los resultados presentados en la Figura 8, en la cual se observa que la muestra sometida al proceso de granallado desarrolla tensiones residuales de compresión. Las caídas en algunos valores de microdureza Vickers observados en la muestra sin granallar de la Figura 10, pueden ser consecuencia de efectos de la microestructura sobre los puntos medidos, ya que se observan zonas de austenita retenida que son típicamente más blandas que la martensita que también se observa presente en la microestructura. La Figura 11 muestra un ejemplo de una huella de indentación. La fotografía está tomada a 40x con un campo de vision de 61.70 x 176.8 μm. Se aprecia la simetría de la huella y su tamaño de la huella es mucho mas grande que el tamaño de las microestructura, por lo tanto la microdureza medida no es afectada por la microestructura local.

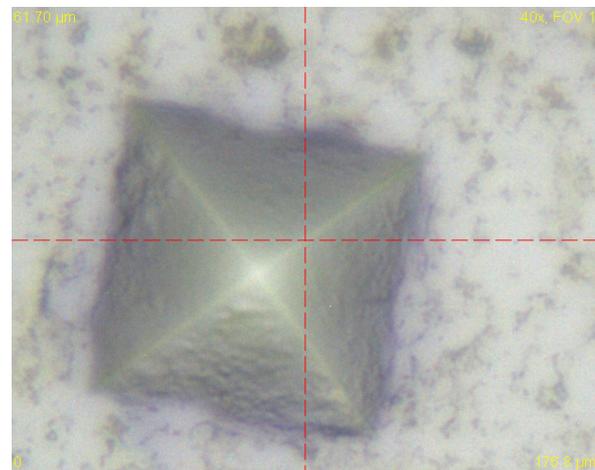


Figura 11. Ejemplo de la huella del indentador micro Vickers. Fuente: elaboración propia

Más aun, la variabilidad de la medida de las diagonales para cada profundidad medida es mostrada en la Tabla 4. Para la muestra sin granallado la desviación estándar entre diagonales oscila entre 0.48 y 0.71% de la dureza promedio de cada diagonal mientras que en la muestra con granallado la desviación estándar entre diagonales oscila entre 0.21 y 1.06% de la dureza promedio de cada diagonal.

Tabla 4. Desviaciones estándar de las diagonales para las muestras. Fuente: elaboración propia.

Z [mm]	SD d1	SD d2
As		
0.16	2.45	2.31
0.26	2.33	2.23
0.36	1.82	1.69
SP		
0.07	2.67	3.98
0.17	2.07	1.13
0.27	1.09	0.89

Más aún, para establecer si existe diferencia significativa entre las medidas de dureza tomadas a diferentes profundidades, ver nomenclatura de la Figura 5, se planteó una hipótesis nula (H_0 : los promedios de durezas son iguales) y una hipótesis alternativa (H_1 : hay diferencias significativas en los promedios de durezas) para cada muestra. El análisis de varianza (ANOVA) entregó que se acepta la hipótesis nula (H_0) con un 96.89% de probabilidad para las muestras sin granallado (As). De otro lado, para las muestras con granallado (SP) el ANOVA entregó que la hipótesis nula H_0 es rechazada con un 83.95% de probabilidad. Esto indica que la dureza no cambia con la profundidad en las muestras As mientras que si lo hace en las muestras SP.

4.4. Discusión

Es importante aclarar que el DRX entrega tensión residual; esto es la diferencia entre la resistencia superficial del material y la deformación permanente impuesta por un proceso externo, en este caso compresión por granallado.

De otro lado, la microdureza cuantifica la resistencia de un material ser rayado o indentado pero no necesariamente conduce a la determinación directa de la resistencia mecánica del material que se evalúa normalmente mediante ensayos de tracción. Sin embargo es aceptado hacer una estimación de resistencia de un material a partir de medidas de dureza, como por ejemplo según la norma ASTM E140. Por lo tanto, la dureza puede ser usada para estimar el valor de la resistencia superficial del material. En este caso, los valores de HVN medidos son la combinación de resistencia del material y cambios introducidos por el granallado e incluso la preparación de las muestras. En este caso, esta modificación de por corte y pulido se intentó mantener al mínimo y de una forma uniforme para las muestras empleadas.

Consecuentemente, para poder comparar esfuerzo residual por DRX y con esfuerzos estimados a partir de microdureza y convertidos a esfuerzo según estimaciones aceptadas (como la ASTM E140), se debería sumar el valor de la resistencia última del material a la tensión residual medida por DRX.

Más aún, se resalta que la baja desviación estándar entre los valores de las dos diagonales muestra que su medición fue consistente y que las indentaciones no fueron afectadas por agentes externos como la microestructura o falta de rigidez por cercanía a superficies libres.

Asumiendo que el proceso de nucleación de grietas ocurre en la superficie del componente bajo la acción de tensiones positivas, el tiempo de iniciación de grieta podría maximizarse adoptando un perfil de tensión residual de compresión en la superficie de la pieza tratada. Esta combinación de parámetros es objeto de estudio por los autores.

Por otro lado, en el caso que la propagación de grieta sea la principal contribución a la vida del componente, el perfil de tensión residual debe diseñarse de forma tal que el factor de intensidad de tensiones que gobierna el crecimiento de grieta por fatiga sea el menor posible [11]. En el caso de los resortes de ballesta, la tensión máxima de flexión se ubica en la superficie convexa y disminuye linealmente hacia el plano cóncavo hasta alcanzar el plano neutro. Los resultados de los ensayos de flexión alternante, que se muestran en otro artículo, mostraron poco o ningún crecimiento de grietas antes de presentar la falla del componente. Por lo tanto, tiene sentido elegir la primera opción.

Finalmente, Aguado y col. [11] aceptan que una desventaja del modelo propuesto está en que las constantes no presentan un significado físico. Los autores encontraron que la constante A está relacionada con la amplitud inicial de la tensión residual, λ con el decaimiento de la tensión hacia el valor mínimo, ω y θ con la ubicación del punto de tensión residual mínimo. Queda abierto por establecer que variables del proceso de granallado, o de otro proceso de endurecimiento superficial, se relacionan con las variables del modelo de Aguado y col. [11].

5. Conclusiones

El procedimiento de evaluación de microdurezas y determinación de tensiones residuales por una técnica no destructiva (DRX), permitió evaluar el efecto del granallado sobre la dureza del material, así como la posible incidencia de las características microestructurales del acero sobre la microdureza. El granallado incide positivamente en el comportamiento del metal analizado al generar una superficie con una dureza más elevada en relación con la dureza superficial del material sin granallar. La técnica DRX entrega resultados de tensión residual en la superficial expuesta.

Se encontró que las tensiones residuales medidos por DRX evidencian que el material de la muestra granallada en su superficie tensiones residuales compresivos entre -100 MPa y -500 MPa aproximadamente, en contraste con los valores de tensión de la muestra no granallada con valores mayoritariamente positivos (de tensión) que van hasta aproximadamente los 200 MPa.

Se evidencia la eficacia del proceso de granallado para la generación de superficies a compresión, lo cual representa una mejora de la resistencia mecánica cuando la pieza se somete ante cargas cíclicas, como es reportado en la literatura. De este modo, se logra definir un procedimiento que permita parametrizar los procesos de granallado en relación con la carga que se espera que el material sea capaz de soportar en operación.

Finalmente, por medio de microdureza, se apreció un incremento de propiedades mecánicas con la profundidad y una direccionalidad tal y como se discute en literatura; el mayor incremento en tensión residual ocurre no en la superficie, pero si a una profundidad alrededor de 0.3 mm desde la superficie granallada. La medición de microdureza Vickers arrojó que en la muestra con granallado varía desde 525 en la superficie, cae a 374 a 0.07 mm y alcanza un valor de 418 HVN a 0.27 mm El ANOVA arrojó que hay diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones a diferentes profundidades. De otro lado, para la muestra sin granallado la microdureza varía entre 433 y 344 HVN y el ANOVA no encontró diferencias estadísticamente significativas en cuanto a la profundidad.

6. Agradecimientos

J. G. Díaz e IMAL agradecen el apoyo del Ministerio de Ciencia y Tecnología de Colombia en la convocatoria 894, así como a la srta. L. X. Arenas del laboratorio de metalografía UIS por la ayuda en la preparación de las muestras y al Sr. C. Calero por la ayuda en la toma de las indentaciones. J. G. Díaz agradece al programa de movilidad VIE UIS.

7. Referencias

- [1] J. T. P. Castro and M. Meggiolaro, *Fatigue Design Techniques, Vol I*, 3rd ed. USA: CreateSpace, 2016.
- [2] D. Kirk, “Quantification of shot peening coverage,” *The Shot Peener*, Mishawaka, In, pp. 22–34, Jan. 2014.
- [3] H. Hernández, A. Vilorio, Y. Arango, A. Jiménez, H. Mendoza, and J. Cadena, “Mejoramiento del proceso de granallado para resortes de ballesta utilizando medición de esfuerzos residuales por difracción de rayos X,” *Revista Ingeniería e Investigación*, no. 56, pp. 33–40, 2004.
- [4] H. E. Jaramillo, N. A. de Sánchez, and J. A. Ávila, “Effect of the shot peening process on the fatigue strength of SAE 5160 steel,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 233, no. 12, pp. 4328–4335, Jun. 2019, doi: 10.1177/0954406218816349.
- [5] SAE, “SAE J443. Procedures for Using Standard Shot Peening Test Strip.” 2018. doi: 10.4271/J443_198401.
- [6] ASTM, “ASTM E 2860. Standard Test Method for Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction for Bearing Steels.” 2012.
- [7] L. D. Rodrigues, J. L. F. Freire, and R. D. Viera, “Desenvolvimento e avaliação experimental de uma nova técnica para medição de tensões residuais,” *Revista Matéria UFRJ*, vol. 16, no. 4, pp. 842–856, 2011.
- [8] C. Inglis, “Stresses in Plates Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners,” *Transactions of the Institute of Naval Architects*, vol. 55, pp. 219–241, 1913.
- [9] J. Muñoz-Cubillos, J. J. Coronado, and S. A. Rodríguez, “Deep rolling effect on fatigue behavior of austenitic stainless steels,” *International Journal of Fatigue*, vol. 95, pp. 120–131, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2016.10.008.
- [10] B. Xia *et al.*, “Improving the high-cycle fatigue life of a high-strength spring steel for automobiles by suitable shot peening and heat treatment,” *International Journal of Fatigue*, vol. 161, p. 106891, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106891.
- [11] S. Aguado-Montero, J. Vázquez, C. Navarro, and J. Domínguez, “Optimal shot peening residual stress profile for fatigue,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 116, p. 103109, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.tafmec.2021.103109.
- [12] E. H. Judd, *Spring Design Manual*. Warrendale PA: SAE, 1996.
- [13] D. Mantilla, N. Arzola, and O. Araque, “Optimal design of leaf springs for vehicle suspensions under cyclic conditions,” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 30, no. 1, pp. 23–36, Mar. 2022, doi: 10.4067/S0718-33052022000100023.
- [14] M. Yetna N’Jock, D. Chicot, X. Decoopman, J. Lesage, J. M. Ndjaka, and A. Pertuz, “Mechanical tensile properties by spherical macroindentation using an indentation strain-hardening exponent,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 75, pp. 257–264, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2013.07.008.
- [15] L. Gutiérrez, F. Jiménez, A. Pertuz-Comas, O. González-Estrada, and J. G. Díaz, “Estudio de

- fatiga a bajos ciclos de la aleación Ti-6Al-4V obtenida por fusión de haz de electrones y su extensión a altos ciclos,” *Scientia Et Technica*, vol. 26, no. 03, pp. 290–297, 2021, doi: 10.22517/23447214.24537.
- [16] M. Vormwald, Y. Hos, J. L. F. Freire, G. L. G. González, and J. G. Díaz, “Crack tip displacement fields measured by digital image correlation for evaluating variable mode-mixity during fatigue crack growth,” *International Journal of Fatigue*, 2018, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2018.04.030.
- [17] S. Vantadori and A. Zanichelli, “Fretting-fatigue analysis of shot-peened aluminium and titanium test specimens,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, no. September, p. ffe.13367, Oct. 2020, doi: 10.1111/ffe.13367.
- [18] F. Romero, A. Pertuz, and J. G. Diaz, “Fatigue study on AISI/SAE 1015 steel with shot peening under corrosive environments,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1938, no. 1, p. 012005, May 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1938/1/012005.
- [19] SAE, “SAE J442. Test Strip, Holder, and Gage for Shot Peening.” 2013. doi: 10.4271/J442_201302.
- [20] M. Vormwald, Y. Hos, J. L. F. Freire, G. L. G. González, and J. G. Díaz, “Crack tip displacement fields measured by digital image correlation for evaluating variable mode-mixity during fatigue crack growth,” *International Journal of Fatigue*, vol. 115, no. 1, pp. 53–66, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2018.04.030.
- [21] ASTM, “ASTM E 837. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method.” 2013.