

Tema A2b Manufactura

“Mejora del perfil de esfuerzos residuales compresivos en un componente mecánico tubular mediante granallado”

Federico Martinez-Guerrero^a, Ma. Guadalupe Ortiz-Lopez^b

^aPosgrado CIATEQ-Unidad San Luis Potosi, Eje 126 No. 225, San Luis Potosi, S.L.P., C.P. 78395, México

^bUniversidad Politécnica de San Luis Potosi, Av. Urbano Villalón 500, San Luis Potosi, S. L. P., C.P. 78363, México

*Autor contacto. Dirección de correo electrónico: guadalupe.ortiz@upslp.edu.mx

RESUMEN

El granallado por impacto de partículas es un proceso de trabajo en frío de metales cuyo objetivo es incrementar la resistencia mecánica superficial e inhibir la propagación de micro-grietas. Este efecto se logra mediante esfuerzos residuales compresivos que contrarrestan los esfuerzos de tensión en las fibras externas de la pieza producidos principalmente por condiciones de fatiga. Debido a las tendencias del desarrollo de productos, actualmente se requiere se aplique en la superficie interna de elementos tubulares. En el presente trabajo se hace una revisión de las principales características y parámetros de los procesos de granallado externo por rueda giratoria y por chorro de aire. Para el proceso de granallado interno se extienden estas características y se determinan otras propias del proceso que directamente afectan los esfuerzos residuales compresivos generados. La efectividad de las adecuaciones propuestas al proceso se valida mediante resultados experimentales del granallado interno aplicado a una pieza tubular.

Palabras Clave: micro-grietas, esfuerzos residuales compresivos, granallado

ABSTRACT

Shot peening is a manufacturing process classified within the cold working of metals which goal is to increase the surface mechanical strength and to inhibit the propagation of micro-cracks. This effect is achieved by means of compressive residual stresses that counteract the tensile stress on the outer fibers of the piece mainly produced by fatigue conditions. Due to the trends of product development, it is currently required to be applied onto the inner surface of tubular elements. In the present work, a review of the main characteristics and parameters of the outer shot peening process by rotary wheel and by shot blast is performed. For the inner shot peening process, these characteristics are extended and others specific that directly affect the residual compressive stresses are determined. Experimental results of the inner shot peening process applied to a tubular component are shown to validate the effectiveness of the proposed process set-up.

Keywords: micro-cracks, compressive residual stresses, shot peening,

1. Introducción

Uno de los objetivos principales que se persiguen al diseñar y fabricar una pieza o un componente integrante de un sistema mecánico, es asegurar la vida del producto ante diferentes tipos de fallas que puedan presentarse.

Existen diversos tipos de procesos de manufactura que se aplican a estos para lograr el incremento de la resistencia mecánica superficial, la inhibición de propagación de micro-grietas y el incremento de su durabilidad en funcionamiento mecánico, dependiendo del objetivo de los componentes, su uso y las condiciones de funcionamiento de los mismos.

Esta mejora en las propiedades de los materiales se logra a través de procesos de manufactura cuyo mecanismo consiste en originar o crear esfuerzos residuales compresivos, los cuales permanecen en la superficie de las piezas en una profundidad de capa desde los 5 hasta los 250 micrómetros, en estado libre y sin aplicación de fuerzas externas [1, 2]. Estos esfuerzos cierran las micro-grietas al contrarrestar los esfuerzos de tensión en las fibras externas de los componentes sometidos a flexión o torsión cíclica.

Entre los procesos utilizados para la creación de dichos esfuerzos se encuentran el granallado por impacto de partículas [3], laminado en frío, granallado por onda de choque térmico producida por rayos laser [4] y compresión por aplicación de alta presión hidrostática confinada,

también denominada “autofrettage” [5]. De los métodos citados anteriormente, el granallado por impacto de partículas, conocido por su nombre en idioma inglés como “shot-peening”, es el proceso más comúnmente aplicado en la superficie externa de partes sólidas utilizadas en sistemas automotrices [6, 7], aeroespaciales y de transmisión mecánica de contacto tales como engranes y levas [8].

Las tendencias de los desarrollos de productos y la aplicación de nuevas tecnologías llevan a la fijación de objetivos de desempeño más exigentes tales como mayor flexibilidad, por la cual una o pocas variantes de un producto puede responder a una gama amplia de requerimientos de desempeño de este. Igualmente se demanda un menor consumo de energía, reducción de peso, etc., los cuales impactan directamente en el diseño de los diversos componentes. En el caso específico de la reducción de peso, se ven reflejadas en la disminución del espesor de las paredes, remoción de masa e incorporación de refuerzos reticulares, que dan por resultado la sustitución de componentes cilíndricos sólidos por elementos tubulares. En la superficie interna de estos elementos tubulares se requiere, al igual que en las superficies externas mencionadas anteriormente, la creación de esfuerzos residuales compresivos para mejorar las expectativas de vida del producto [9]. Una solución a considerar será por tanto, la aplicación de granallado por impacto de partículas en esta superficie.

El objetivo del presente trabajo es la descripción del proceso de granallado interno aplicado a una pieza tubular, el análisis de las principales características del mismo así como la determinación de sus parámetros clave que conducen a la mejora del perfil de esfuerzos residuales compresivos que se obtienen en la pieza de trabajo al aplicársele este.

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se hace una breve descripción de los dos tipos comúnmente utilizados, las variables a controlar, su efecto en la pieza de trabajo así como una revisión de los métodos de evaluación de la calidad del proceso de granallado externo. Las necesidades que debe cubrir el proceso de granallado interno son presentadas en la sección 3, al igual que un análisis de las características de este proceso, variables a controlar y soluciones a algunas dificultades que presenta. En la sección 4 se muestran resultados experimentales del proceso de granallado interno, y se finaliza con la sección 5 con algunas conclusiones.

2. Proceso de granallado externo

El granallado es una operación de tratamiento superficial de los metales en el cual son dirigidos múltiples proyectiles de acero contra la pieza de trabajo que está siendo tratada. El impacto del proyectil en la pieza de trabajo, el cual actúa como si fuera un pequeño martillo, producirá una indentación o deformación plástica desde la superficie de la

pieza hasta una profundidad del orden de micras, según se muestra en la Fig. 1 [10].

Después del impacto de un proyectil, se identifican dos regiones de interacción con este: la región elástica que retorna al estado libre de esfuerzos y la región deformada plásticamente donde el estado de esfuerzos de compresión permanece. Este se conoce como perfil de esfuerzos residuales compresivos. Por otra parte, se logra un incremento de la dureza superficial del material a partir del trabajo mecánico de la pieza. Estos dos efectos dan como resultado una mayor resistencia de la pieza a la fatiga.

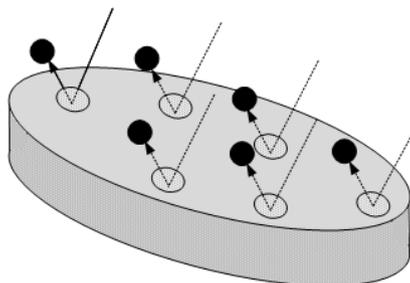


Figura 1. Esquema proceso de granallado

En procesos llevados a cabo en la industria, se encuentran básicamente dos tipos de sistemas para proveer de energía cinética a la granalla que impacta al material. El primero basado en el uso de una turbina o rueda giratoria y el segundo incorporando la granalla a un chorro de aire a presión.

2.1. Parámetros y caracterización del proceso de granallado externo.

En una máquina granalladora por turbina rotatoria o rueda, el flujo del material de impacto es conducido por gravedad a través de mangueras desde un silo de almacenamiento hasta la entrada de las ruedas de propulsión o turbinas. El flujo másico es regulado a través de un conducto concéntrico con el eje de rotación de la turbina y distribuido a las paletas de impulso a través de un dispositivo de ventanas regulables, en el cual mediante la apertura o cierre de dichas ventanas en conjunto con la velocidad de rotación de la turbina pueden direccionar el haz de granalla hacia la pieza de trabajo objetivo según se requiera. Para cubrir el área objetivo de una pieza de geometría complicada en su totalidad en procesos realizados de manera industrial, se utilizan varias turbinas y se rota la pieza o un dispositivo de carga con las mismas, para lograr la exposición al chorro de granalla de la superficie completa.

La energía cinética de las partículas involucrada en este proceso depende tanto del ángulo de direccionamiento del haz como de la velocidad tangencial v_t de las partículas al abandonar las paletas impulsoras. A su vez, dicha velocidad depende del diámetro y la velocidad rotacional ω de la turbina. La transferencia de energía cinética en energía de

deformación durante el impacto decrece con la variación del ángulo del mismo θ y con la distancia de las turbinas a la pieza objetivo d . Un valor óptimo del ángulo, con respecto a la superficie de la pieza, se encuentra en el rango de 60° a 90° [11].

Adicionalmente a estos parámetros influyen también en el proceso, el flujo másico de granalla \dot{m} , el cual depende a su vez de la potencia de la turbina P . El tiempo de exposición t , la distribución de tamaños o granulometría [12], la disposición y densidad de las piezas en el herramental o árbol de granallado, influyen en la denominada razón de cubrimiento de la pieza [10, 13].

Las propiedades de los materiales tales como la dureza del material de la pieza objetivo H_o , la dureza y forma de la granalla [12] (cilíndrica, redondeada y esférica) influyen en la calidad de las indentaciones en la pieza objetivo (profundidad, forma) producidas por la deformación plástica del material durante los impactos.

Debido a la gran cantidad de variables involucradas, es difícil establecer una relación matemática por métodos analíticos que permita caracterizar o calificar el proceso. El método de la placa "Almen" basado en la altura del arco de una placa estandarizada y su sujetador según SAE J442 y J443 [14, 15] que se obtiene después de la exposición de la misma en condiciones del proceso a caracterizar, representa un método práctico para medir la energía o eficiencia del proceso.

En cuanto a la medición de los esfuerzos residuales compresivos originados por el proceso de granallado, esta se lleva a cabo a través de diversos métodos de prueba destructivos, tales como difracción de rayos X y de neutrones, barrenado, sincrotrón, magnético, etc., entre los cuales el más utilizado es la difracción por rayos X [16]. En este método se mide la deformación de la red del cristal, y el esfuerzo residual que produce la deformación se calcula, asumiendo una distorsión elástica de la red del cristal, por medio del modelo de esfuerzo plano, según se muestra en la Fig. 2 [16].

El valor del esfuerzo residual se expresa a través de la relación:

$$\sigma_\phi = \left(\frac{E}{1+\nu} \right)_{(hkl)} \frac{1}{d_{\phi 0}} \left(\frac{\partial d_{\phi \Psi}}{\partial (Sen \nu)^2} \right) \quad (1)$$

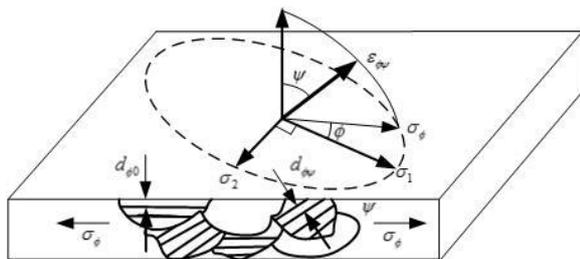


Figura 2. Medición de esfuerzo residual mediante rayos X

donde Ψ es la posición angular para al menos dos orientaciones de la muestra, ϕ es el ángulo de difracción, $d_{\phi \Psi}$ es el espaciamiento entre los planos de la red medidos en la dirección dada por α y Ψ , $d_{\phi 0}$ es el espaciamiento de la red sin esfuerzos en la dirección de ϕ , E es el módulo de elasticidad del material y ν el coeficiente de Poisson del mismo en la dirección cristalográfica normal a los planos de la red en los cuales se mide la deformación como se especifica por los índices de Miller h, k y l .

Al medir en un mismo espécimen de prueba a diferentes profundidades de la capa de esfuerzos residuales, es posible graficar dichos esfuerzos en función de la profundidad de la pieza a la que se presentan; a la curva obtenida se le denomina perfil de esfuerzos residuales compresivos. Los parámetros más influyentes en la creación del perfil de esfuerzos residuales compresivos adicional a la energía cinética, ya mencionada anteriormente, es la densidad de cubrimiento.

La densidad de cubrimiento es la relación del área granallada sobre el área total en un intervalo de tiempo, para medir el área granallada se considera el área proyectada de las indentaciones de la granalla. En general en la industria se considera que un cubrimiento del 100% es condición básica para lograr un perfil de esfuerzos residuales compresivos. Para calcular de manera teórica el porcentaje de cubrimiento, se utiliza la ecuación de Avrami [13] dada por:

$$C(t) = 100(1 - \exp(3R^2 \dot{m} t / (4A\bar{r}^3 \rho))) \quad (2)$$

donde C representa al porcentaje de cubrimiento, R es el radio promedio de la indentación de la granalla, A es el área de propagación del disparo, t es el tiempo de exposición, \dot{m} es el flujo másico, \bar{r} es el radio promedio de la granalla y ρ la densidad de la misma.

Es difícil obtener un cubrimiento mayor al 98%, de esta forma el 98% de cubrimiento se denomina como "cubrimiento total". Cuando se intenta medir cubrimientos mayores a este, se utilizan múltiplos del tiempo requerido para lograr el 98%.

2.2. Granallado con aire a presión (Air-blast shot peening)

En este proceso la rueda que sirve para impulsar y distribuir la granalla en el haz se sustituye por un flujo de aire a presión, donde las partículas metálicas se incorporan de manera controlada, generalmente a través de válvulas magnéticas, tales como "Magnavalve" [17], y se conducen a través de una manguera y boquilla cilíndricas orientadas mecánicamente a las áreas objetivo de impacto.

La velocidad de las partículas de impacto (granalla) incorporadas en el chorro está determinada por la conservación del Momentum mecánico, considerando que la velocidad del abrasivo es cero antes de la incorporación con el flujo de aire y que la mezcla de aire y abrasivo tienen la

misma velocidad después de la incorporación. La relación queda dada por:

$$(v_{aire/abrasivo})_2 = \frac{(v_{aire} \dot{m}_{aire})_1}{(\dot{m}_{aire} + \dot{m}_{abrasivo})_2} \quad (3)$$

en la cual \dot{m} representa al flujo másico de la variable indicada y v a la velocidad de la misma. A diferencia de los parámetros del proceso de granallado externo por rueda giratoria, la velocidad de las partículas de granalla en el chorro es dependiente de la presión de aire P .

Una diferencia importante entre ambos procesos es la proyección del flujo de granalla en la pieza objetivo cuando es impelido por rueda y cuando es impelido por aire a presión.

La huella de proyección del flujo de granalla impelido por turbina en la pieza objetivo es de forma elíptica y muy pequeña en relación al tiempo de exposición total. En ella se observan elipses concéntricas de mayor intensidad de cubrimiento hacia el punto de cruce de los ejes de la misma, tal como se muestra en la Fig. 3 [18].

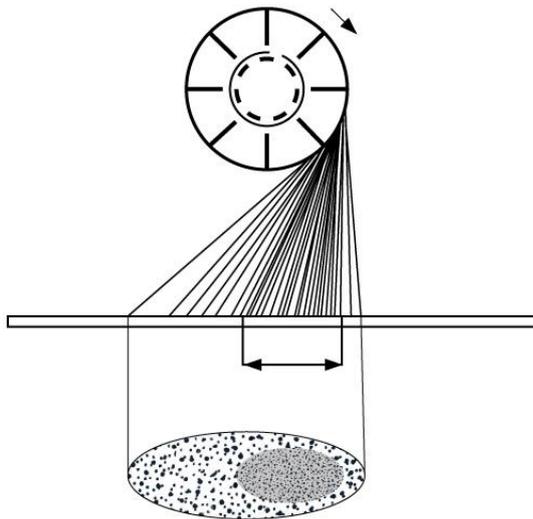


Figura 3. Flujo de granalla proyectado por turbina o rueda rotatoria.

En el caso del proceso de granallado a presión la huella de proyección del flujo de granalla es circular con círculos concéntricos de mayor intensidad de cubrimiento hacia el centro del mismo.

3. Proceso de granallado interno

Para el caso de aplicación de tratamiento superficial en el interior de superficies tubulares no es posible el uso de turbinas, por lo que el método más factible es utilizar granallado por chorro de aire a presión.

Por ser procesos similares, los parámetros utilizados en el granallado externo por chorro de aire a presión aplican para el granallado interno por chorro de aire a presión: Presión del aire, flujo másico, dureza de pieza objetivo,

dureza de granalla, distribución de tamaños de la granalla, tiempo de exposición y distancia a la pieza objetivo. Es importante observar que la dirección de flujo de la mezcla de aire a presión y la granalla dentro de la manguera después de que se logra un flujo estable así como a la salida de la boquilla es en promedio coincidente con el eje de geométrico de los mismos. Esto significa que el ángulo de impacto de las partículas al salir de la boquilla sería muy pequeño, por lo cual la energía cinética transferida a la pieza objetivo sería baja.

Para lograr los resultados esperados es imprescindible lograr un ángulo de impacto entre 60° y 90° en el interior del elemento tubular.

Debido a que el mencionado ángulo de impacto es primordial para lograr la máxima eficiencia de la energía cinética y por tanto obtener una mejora en el perfil de esfuerzos residuales compresivos, se presentan a continuación algunos diseños existentes (a), (b), (c), y otros nuevos propuestos (d), (e), (f), (g) que podrían redireccionar el flujo de la mezcla de aire a presión y granalla a un ángulo cercano al objetivo.

- Diseño a). Manguera directa y sin una boquilla de forma particular pero a una distancia relativamente corta del punto de incorporación del abrasivo en el chorro de aire a presión, cuyo esquema se muestra en la Fig. 4.

Es posible considerar que antes de que el flujo se vuelva estable cuando la mezcla de granalla y aire a presión tuvieran la misma velocidad, se presentarían impactos de las partículas con la superficie interior de la manguera que resultarían en la salida de las partículas con direcciones menores a un ángulo de 60° .

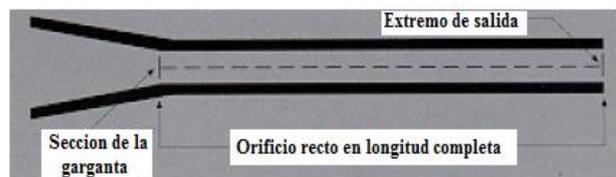


Figura 4. Boquilla de orificio recto.

- Diseño b). Instalación en la manguera de una boquilla tipo Venturi de sección transversal variable la cual consta de una sección convergente larga, una sección recta y una sección divergente según el esquema que se muestra en la Fig. 5.

Su efecto es incrementar la velocidad de flujo, pero al mismo tiempo desviar con cierto ángulo el flujo abriéndolo y en consecuencia lograr impactos angulares en la periferia interna del tubo. Igualmente no se prevé lograr un ángulo mayor a 60° . Otras variantes de esta configuración son el Venturi largo de flujo laminar con una sección convergente corta, una transición suave y una salida estándar y el doble Venturi que consta de dos boquillas en serie la primera con una sección convergente, la segunda con una apertura amplia y con un espaciamiento de barrenos o aperturas entre ambas

secciones que permite el ingreso del aire circundante y abren todavía más angularmente el flujo. Con ambos diseños, se prevé lograr un ángulo de impacto con la superficie interna del tubo aproximadamente igual a 60° .

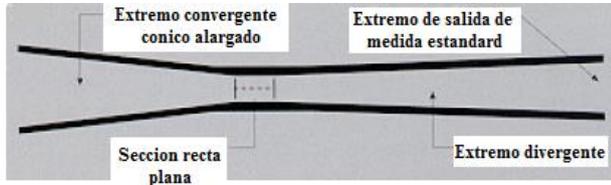


Figura 5. Boquilla tipo Venturi

- Diseño c). Boquilla de alta presión que consta de una sección convergente y una sección divergente relativamente larga que concluye en una gran apertura de flujo y la posibilidad de utilizar alta presión de aire.
- Diseño d). Placa inclinada a 45° , que al hacer impacto las partículas con la misma son re-direccionadas para impactar el elemento cilíndrico a 90° . Un problema de este diseño es la sujeción de dicha placa. Una posible solución es el uso de un elemento rígido para tubos rectos, y flexible para tubos doblados o conformados situado en el eje de la manguera. Sin embargo, solamente se cubriría parcialmente la superficie interior del tubo; además al estar localizada en la región de mayor velocidad, el desgaste por los impactos de las partículas se prevé prematuro.
- Diseño e). Placa inclinada a 45° al igual que en a), sin embargo para cubrir la totalidad de la superficie interior del tubo se ha provisto de un elemento rotatorio rígido o flexible como el descrito en el diseño d).
- Diseño f). Boquilla con fondo semiesférico colocada al extremo de la manguera donde impacta el flujo de granalla y lo re-direcciona el flujo normal (90°) a la superficie de la superficie semiesférica. La boquilla tiene dispuestos barrenos circulares a manera de ventanas que permiten la salida de las partículas a través de las mismas para impactar el elemento tubular. Las desventajas son que al impactar en la región central del centro de la boquilla a 90° las partículas después del impacto se contraponen a la dirección principal del flujo y a través de impactos adicionales se tiene una gran pérdida de energía cinética. Las partículas que chocan a ángulos menores a 90° tienen que cruzar hasta el lado opuesto teniéndose un flujo cruzado con impactos adicionales potenciales entre partículas.
- Diseño g). Se incorpora un cono invertido de 45° en el fondo de la boquilla y se preservan las ventanas circulares para que escapen las partículas a un ángulo de 90° respecto al eje geométrico del tubo.

De acuerdo a [19] para el granallado interno de barrenos poco profundos cuyos cuya relación de $d/L \leq 1$ se puede utilizar una boquilla cilíndrica orientada a 45° para granallar el interior del barreno, mientras que para barrenos largos cuya relación de $d/L \leq 2$ se pueden utilizar dos boquillas cilíndricas orientadas a 45° para granallar el interior del barreno, tal como muestra la Fig. 6 [19]. Para $d/L > 2$, se pueden utilizar boquilla tipo “roto-flapp”, la cual consta de boquilla cilíndrica en conjunto con pin deflector móvil con un ángulo de 90° . Para agujeros mucho muy largos, tal como el que se muestra en la Fig. 7, la solución es una lanceta deflectora con rotación de la pieza o de la lanceta, aquí la restricción es la aplicación a componentes tubulares rectos y no a aquellos de geometrías variables conformadas por diversos procesos, principalmente conformado en frío control

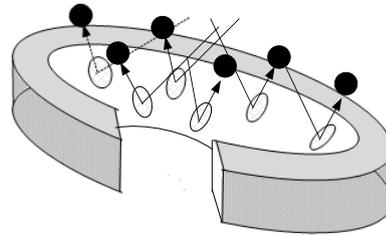


Figura 6. Granallado interno en una pieza con longitud corta.

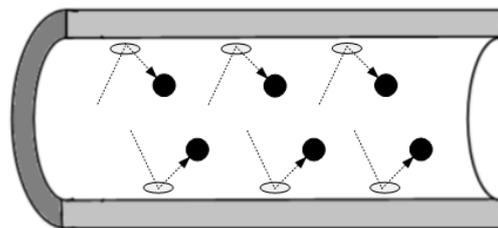


Figura 7. Granallado interno en una pieza tubular.

4. Resultados experimentales

El elemento tubular a granallar de manera interna es un componente esencial de la suspensión automotriz, cuya función es evitar la volcadura del vehículo cuando se produce una rotación sobre su eje longitudinal en curvas cerradas y caminos en muy malas condiciones. El elemento, que trabaja como un resorte, tiene la geometría mostrada en la Fig. 9 y unas dimensiones generales de $1200 \times 450 \times 300$ mm, diámetro externo de 32 mm, espesor de pared de 5.1 mm y está templado y revenido a una resistencia a la tensión R_m de 1650 a 1800 MPa.

Los brazos del elemento trabajan de forma recíproca y en las zonas mostradas en rojo se presentan el máximo esfuerzo combinado de torsión y flexión $\sigma_v = 560$ MPa.

Bajo las condiciones dadas del diseño no se alcanza el requerimiento de durabilidad bajo fatiga a una carrera de 52 mm de 200,000 ciclos, obteniéndose en promedio 100,000 ciclos y fallando principalmente por fracturas con inicio en el diámetro interior del tubo.

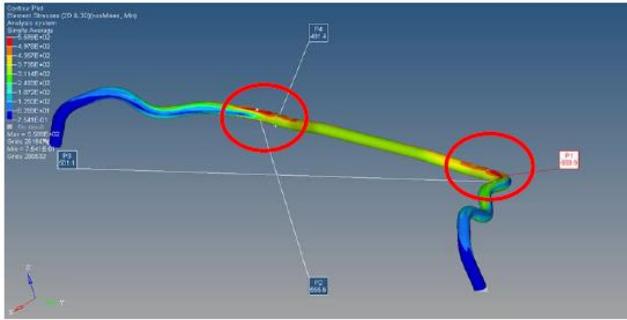


Figura 8. Elemento tubular granallado internamente

El objetivo es granallar de manera interna esta zona mediante una combinación de parámetros y diseño del elemento deflector que logre un perfil de esfuerzos residuales compresivos de referencia que aseguren que el elemento alcance la especificación requerida, la cual se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Esfuerzos residuales compresivos objetivo

Profundidad μm	Esfuerzo residual MPa.
3-5	-450
20-50	-600
80-100	-200

La zona de granallado en uno de los lados se ubica en términos de longitud desde un extremo abierto desde 440 mm hasta 750 mm. Dado que el elemento guarda una simetría respecto a su punto medio, la zona de granallado del lado opuesto puede ser ubicada de la misma forma.

La máquina utilizada para realizar el estudio de granallado interno es de tipo estacionario por aire a presión con una cabina de 2000 x 1200 x 1800 mm. Los elementos tubulares se pueden sujetar por medio de dispositivos de fijación incorporados a la compuerta de la cabina misma. Se puede procesar desde uno hasta seis elementos tubulares fijados.

Para procesar cada elemento se introduce dentro del elemento tubular una manguera flexible de diámetro externo pocos milímetros menor que el diámetro interior del mismo. Esta tiene acoplada una lanceta metálica flexible impulsada linealmente por un servo-motor, cuya función es introducir la manguera dentro del elemento de manera controlada en cuanto a posición inicial, final y velocidad de aplicación del proceso. Al igual que en algunas aplicaciones del granallado externo por aire a presión, las partículas metálicas se incorporan de manera controlada a través de válvulas "Magnavalve"[17].

Para el experimento se utilizan boquillas de diámetro externo de 12 mm tanto de tipo estándar como basadas en el diseño g) con tres variantes de aperturas o ventanas de tipo A), B) y C), las cuales se muestran en la Fig. 9, desarrolladas especialmente para el caso de estudio.

Para determinar cuál de estas boquillas produce los mejores resultados se conduce el experimento utilizando como variables a controlar la presión del aire en bars, flujo

máscico de granalla en gramos por minuto, velocidad flujo aire/granalla en milímetros por minuto y boquilla utilizada. Posteriormente se evalúan los esfuerzos residuales compresivos por medición del difractor de rayos "X" a las profundidades de 0, 5 y 20 micrómetros.



A). B). C).

Figura 9. Propuestas de variantes boquillas diseño g): A) 8 orificios circulares, B). 4 orificios semi-oblongos y C). 3 orificios oblongos

En la Tabla 2 se muestran los parámetros de los experimentos que permiten obtener los resultados más concluyentes. Los parámetros estándar que se sugieren por el fabricante de la máquina granalladora son los marcados en la muestras 3 y 18.

Tabla 2. Experimentos granallado interno a elemento tubular

Muestra	Presión Aire (bar)	Flujo máscico (g/min)	Velocidad (mm/min)	Tipo de boquilla utilizada
3	5	1400	300	estandard
6	6	1400	300	estandard
9	6	1400	300	Modificada C
12	6	2000	300	Modificada C
15	5	2000	300	Modificada C
18	5	1400	300	Modificada C

La determinación experimental de los esfuerzos residuales compresivos se llevó a cabo en barras estabilizadoras que fueron granalladas internamente sin ser posteriormente sometidas a pre-tratamiento o pintadas. Los puntos de medición elegidos son los identificados como P1 para la lanceta 1 y como P6 para la lanceta 6 en dirección de 0° (paralelo al eje de la barra) y a 90° (perpendicular al eje de la barra), los cuales se muestran en la Fig. 10. La profundidad para la obtención del perfil de esfuerzos se ubica en los puntos 0, 5 y 20 μm . En cada una de las barras granalladas se cortó una sección de aproximadamente 50 mm de longitud en los puntos de medición indicados y para no inducir esfuerzo residual adicional el material fue removido por medio de un proceso electrolítico.

El método de medición seguido para su determinación es el de Difracción de Rayos X [16], cuyos principios se describen en la sección 2. El instrumento utilizado es un Difractor de Rayos X marca Stresstech, perteneciente a la línea Xstress 300 G2R modelo X3000 p-121471.

Los parámetros usados en el difractor son los siguientes: voltaje en los tubos de 30 KV con una corriente n los mismos de 7 mA, radiación utilizada $\text{CrK}\alpha$, medidas en el plano cristalográfico (211) Acero α , ángulo de

incidencia 2-theta: 125°-162°, ángulo 7 Psi: 0°/±24.1°/
±35.3°/±45°, colimador redondo de 2mm de diámetro.



Figura 10. Ubicación puntos de medición esfuerzos residuales compresivos en barras estabilizadoras

Los resultados de la prueba de rayos X para determinación de esfuerzos residuales compresivos de las diferentes muestras, se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Esfuerzos residuales compresivos resultantes prueba Rayos X

Muestra 3	Lanceta 1		Lanceta 6	
Profundidad	0°	90°	0°	90°
0	-367.2	-350.4	-486.3	-432.6
5	-419.4	-421.9	-515.5	-457.2
20	-710.3	-719.2	-770.7	-724.9

Muestra 6	Lanceta 1		Lanceta 6	
Profundidad	0°	90°	0°	90°
0	-366.4	-335.0	-291.1	-342.7
5	-456.8	-420.5	-377.3	-418.6
20	-746.8	-734.9	-633.0	-730.1

Muestra 9	Lanceta 1		Lanceta 6	
Profundidad	0°	90°	0°	90°
0	-315.4	-313.5	-355.4	-351.8
5	-458.3	-471.7	-515.5	-498.6
20	-797.7	-812.4	-810.3	-833.4

Muestra 12	Lanceta 1		Lanceta 6	
Profundidad	0°	90°	0°	90°
0	-361.4	-330.4	-395.8	-352.0
5	-443.1	-399.8	-498.4	-449.6
20	-866.5	-819.7	-869.7	-814.9

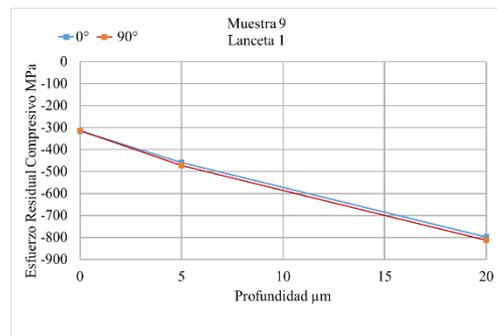
Muestra 15	Lanceta 1		Lanceta 6	
Profundidad	0°	90°	0°	90°
0	-564.2	-544.8	-454.5	-400.7
5	-642.6	-628.6	-541.3	-478.7
20	-831.3	-822.9	-886.6	-830.7

Muestra 18	Lanceta 1		Lanceta 6	
Profundidad	0°	90°	0°	90°
0	-286.8	-320.8	-302.4	-328.1
5	-368.8	-394.8	-405.9	-425.1
20	-732.3	-784.3	-726.3	-745.4

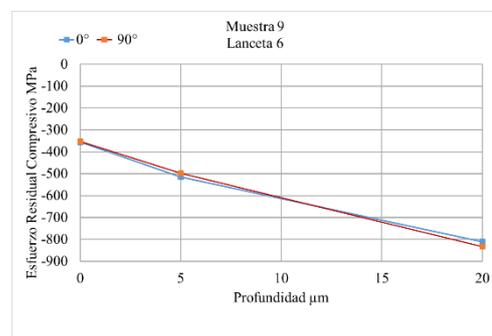
Los valores que no cumplen con los marcados los marcados como objetivo se muestran en color rojo. La profundidad indicada está expresada en micrómetros y los esfuerzos en Mpa. Como puede observarse los mejores resultados obtenidos son los correspondientes a las muestras 9 y 15, los cuales no presentan ningún valor fuera de especificación.

Respecto al conjunto de parámetros estándar, el de la muestra 9 utiliza una presión de aire mayor mientras el flujo másico de granalla y la velocidad se mantienen igual. Las gráficas de los esfuerzos residuales compresivos obtenidos se muestran en las Fig. 11 a) y 11 b).

La mayor presión incrementa la energía cinética de las partículas y por lo tanto la energía transferida a la superficie interna del elemento causando deformaciones plásticas profundas obteniendo valores desde -797 MPa hasta -833 MPa a la profundidad de 20 micrómetros. Un problema que en la práctica se presentó para proporcionar el conjunto de parámetros 9, es la necesidad de parar la alimentación de aire a otros equipos de la planta para poder asegurar mayor presión.



a).



b)

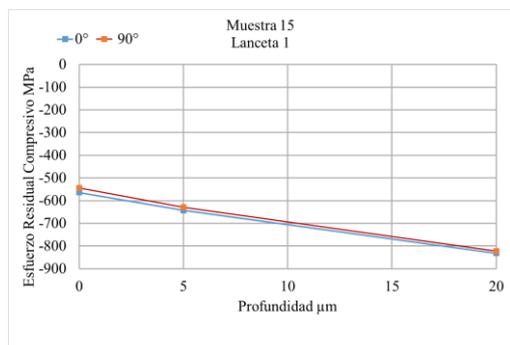
Figura 11. Gráfica de esfuerzos residuales compresivos Muestra 9: a) Lanceta 1 y b) Lanceta 6.

En el caso del conjunto de parámetros de la muestra 15 se utiliza un flujo másico mayor de granalla, mientras la presión y la velocidad de aplicación se mantienen con el mismo valor de los parámetros estándar. El nivel de esfuerzos residuales compresivos obtenido va desde -822 MPa hasta -866 MPa a la profundidad de 20 micrómetros. Las gráficas de esfuerzos residuales compresivos

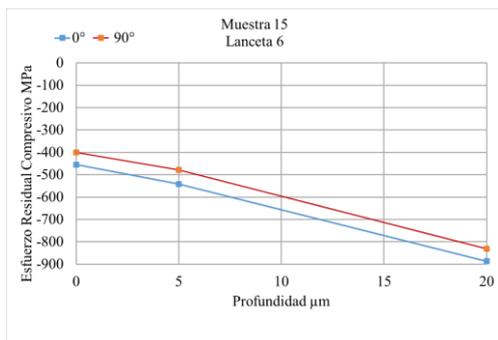
resultantes se presentan en las Fig. 12 a) y 12 b). La muestra 15, por tanto, tiene una mejora en el esfuerzo compresivo a 20 micrómetros del 11% respecto a la muestra 9 y una mejora del 15% respecto a la muestra 3.

Las ventanas o aperturas oblongas permiten un mayor paso de flujo másico de granalla eliminando las áreas sin granallar (sombras) por lo tanto se logra una mayor cobertura en la superficie interna del elemento tubular con lo cual el nivel de esfuerzos residuales compresivos medido es más uniforme independientemente del punto donde se mida dentro del perímetro interior del elemento.

El conjunto de parámetros en 15 se selecciona para procesar los elementos tubulares para prueba de durabilidad bajo fatiga, obteniéndose un número de ciclos > 200, 000. Este resultado permite cumplir con la especificación de durabilidad indicada para la pieza, según se menciona al principio de esta sección, la cual es el principal objetivo a lograr.



a)



b)

Figura 12. Grafica de esfuerzos residuales compresivos Muestra 15: a) Lanceta 1 y b) Lanceta 6.

Como se ha mencionado a lo largo del trabajo, el proceso de granallado está influido por múltiples parámetros tanto de la pieza a granallar como del proceso llevado a cabo. No obstante se encuentra que los resultados obtenidos en el presente trabajo, son similares a los mostrados en [9]. En ambos trabajos, el granallado interno al generar un perfil de esfuerzos en la superficie interna de la barra tubular, permite el uso de elementos con menor peso e incrementa la expectativa de durabilidad del elemento en el doble o más de aquella que no es granallada internamente.

5. Conclusiones

El proceso de granallado interno permite, al igual que el granallado externo, el incremento de la resistencia mecánica superficial, la inhibición de propagación de micro-grietas y el incremento de su durabilidad en funcionamiento de la pieza a la cual se aplica, en especial cuando está sometida a fatiga. Esta mejora se logra a través de la creación de esfuerzos residuales compresivos.

La energía cinética de las partículas involucrada en este proceso es primordial para la creación de dichos esfuerzos y en el caso del granallado interno en elementos tubulares se logra mediante el uso de un dispositivo basado en flujo de aire a presión y su máxima eficiencia está relacionada con el valor óptimo del ángulo de impacto sobre la superficie tratada.

Como se observa mediante pruebas experimentales, los mejores resultados se encuentran con el uso de ventanas o aperturas que eliminan las áreas sin granallar y aseguran una mejor cobertura de la superficie interna del elemento tubular al incrementar el valor de los esfuerzos residuales compresivos y por ende la durabilidad bajo fatiga de la pieza.

REFERENCIAS

- [1] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf, D. F. Mazurek, *Mecánica de Materiales* (6ta ed.), CDMX: Mc Graw-Hill Interamericana Editores (2013).
- [2] J. Schijve, *Fatigue in Structures and Materials*, (2nd ed.). Netherlands: Springer (2009).
- [3] P. E. Cary P, History of Shot Peening, in: Proceedings of 1th International Conference on Shot Peening, Paris, France, 1981.
- [4] A. K. Gujba, M. Medraj, Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening, *Materials* **7**, (2014) 7925-7974.
- [5] G. H. Majzoobi, A. Goomi, Optimisation of autofretage in thick-walled cylinders, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* **16** (1), (2006) 124-131.
- [6] A. M. Wittek, D. Gaska, V. Lazarz, T. Matyja, Effect of Shotpeening on the fatigue strength of automotive tubular stabilizer bars DC 218, *Arch. Metall.Mater.*, **61**, (2016) 1963-1968.
- [7] A. A. Avalos-Morin, J. A. Mendoza Razo, F. Martínez-Guerrero, Caracterización del granallado para generar capa de esfuerzos compresivos en barra estabilizadora automotriz en: Memorias Congreso SOMIM, Mérida, México, 2016.
- [8] J. Brown, Shot peening increases gear life, *Power Transmission Des.*, **38**(5), (1996) 61-64.
- [9] Y. Won Seo, J. Won Sur, W. Ki Lee, Y Kim, Effect of Inner Shot Penning Process for Tubular Stabilizer Bars, *Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, **41** (11), (2017) 1119-1124.

- [10] B. Bhuvanaraghan, S. M. Srinivasan, B. Maffeo, Optimization of the fatigue strength of materials due to shot peening: A survey. *International Journal of Structural Changes in Solids*, **2** (2), (2010) 33-63.
- [11] R. Herzog, W. Zinn, B. Scholtes, H. Wohlfahrt, The Significance of Almen Intensity in the Generation of Shot Peening Residual Stresses. in: *Proceedings of 6th International Conference on Shot Peening*, San Francisco California, USA, 1996.
- [12] Society of Automotive Engineers, SAE J441. Cut Wire Shot. Revisión 16-10-2013
- [13] M. Avrami, Kinetic of Phase Change I, *Journal of Chemical Physics*, **7** (1939) 1103-1112.
- [14] SAE J442. "Test strip, Holder and Gage for Shot Peening". Revisión 18-02- 2013.
- [15] SAE J443. "Procedures for Using Standard Shot Peening Test Strip". Revisión 16-06-2010
- [16] P. S. Prevéy, X ray Diffraction Residual Stress Techniques, *Metal Handbooks*, American Society of Metals, 1986.
- [17] MagnaValve, Shot Peening Control, Electronics Inc. Technical Report [en línea]. Consulta: 15-Abril-2018. Disponible en: <https://www.electronics-inc.com/product-category/magna-valves/>
- [18] T. M. Watanabe, El proceso de Granallado, Indústria de Fundição Tupy Ltda. [en línea]. Consulta: 22 de Abril de 2018. Disponible en: https://www.tupy.com.br/downloads/pdfs/granalhas/granalhas_esp.pdf
- [19] B. Baker, Shot Peening Small Hole, Progressive Technologies Technical Report [en línea]. Consulta: 30-Abril-2018. Disponible en: https://www.progressivesurface.com/downloads/casestudies/small_hole_peen.pdf