

Análisis tridimensional del proceso de granallado utilizando un modelo de múltiples impactos.

M. A. Calle Gonzales*, D. Benítez Barrios, E. Ângelo**, E. Gonçalves*.**

*Centro de Estruturas Navais e Oceânicas, Universidade de São Paulo.

Av. Professor Mello Moraes, 2231, CEP 05508-900 - São Paulo - SP - Brasil.

**Grupo de Simulação Numérica (GSN). Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Rua da Consolação 930, prédio 6, CEP 01302-907, São Paulo-SP.

E-mail:miguel.gonzales@poli.usp.br, danielbb@mackenzie.com.br

(Recibido el 10 de Septiembre de 2005, aceptado el 14 de Enero de 2006)

Resumen.

El granallado es uno de los tratamientos superficiales más empleados para, entre otras aplicaciones, proporcionar un aumento considerable de la vida a fatiga de elementos de máquinas y estructuras sometidos a la acción de cargas variables en el tiempo. El granallado provoca el surgimiento de una capa de tensiones residuales de compresión que se superponen con las tensiones de tracción que aparecen producto de las cargas externas aplicadas durante el tiempo de servicio de la pieza. Esto trae como consecuencia positiva la reducción de los valores de las tensiones de tracción, principales responsables por la propagación de eventuales fisuras presentes en el material del elemento de máquina o estructura. El control de parámetros tales como, la profundidad de la zona plástica, los valores de tensiones residuales, entre otros, es de vital importancia para garantizar resultados adecuados después de la aplicación del tratamiento. Para simular el proceso de granallado empleando el Método de los Elementos Finitos (MEF), es creado un modelo tridimensional de una célula representativa de la superficie de la pieza tratada, la cual es sometida a múltiples impactos de granallas. En la etapa de análisis de los resultados, son evaluados los perfiles de distribución de las tensiones residuales de compresión, generados en el modelo por el impacto de las granallas, para diferentes regiones de la superficie de la célula expuesta al chorro, con la finalidad de encontrar aquel que represente mejor la distribución de tensiones creada en toda la célula. La evaluación del perfil representativo es importante, pues es el responsable directo por la mejoría de las propiedades mecánicas de la pieza. Los resultados revelan adicionalmente y de manera implícita, el efecto de la cobertura en el proceso de granallado sobre el comportamiento del perfil de distribución de las tensiones residuales, aspecto este que también será comentado en el trabajo. Los resultados son comparados con resultados experimentales disponibles en la literatura especializada y presentados en forma de gráficos y tablas.

Palabras claves: Granallado, tensión residual, elementos finitos, modelación.

1. Introducción.

El granallado, “*shot peening*” en inglés, es un proceso de trabajo en frío, que consiste en proyectar granallas con alta velocidad contra la superficie externa de elementos de máquinas y estructuras. Las granallas actúan como si fuesen pequeños martillos, provocando deformación plástica en la superficie de la pieza, pero como la parte interna de la misma solamente consigue ser deformada elásticamente durante el impacto, ella intenta volver a su geometría original, sin embargo no puede hacerlo debido a la deformación plástica ya existente en la superficie. Como resultado de la interacción entre estas dos camadas aparecerán tensiones residuales de compresión en la superficie de la

pieza y a una pequeña distancia debajo de ella. Cada impacto provoca una pequeña indentación en la superficie, trayendo, como consecuencia un alargamiento permanente de la misma y de una pequeña zona debajo de ella, Figura 1, [1].

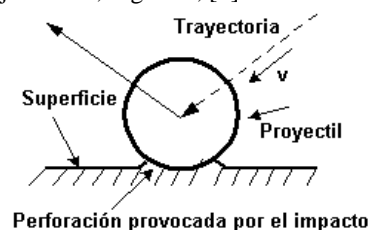


Figura 1. Impacto de la granalla sobre la superficie de la pieza.

Este proceso es ampliamente utilizado en la industria para mejorar las propiedades mecánicas de los componentes en servicio, particularmente, la vida a fatiga.

Las mejoras efectivas que pueden ser alcanzadas dependen en gran medida de cada aplicación individual. No obstante pueden ser citados, como ejemplo, los siguientes valores referenciales relacionados al incremento de la vida útil de varios elementos de máquina en la Tabla 1.

Tabla 1. Incremento de la vida a la fatiga empleando el granallado.

Barras de torsión	140 – 600 %
Engranajes	> 1000 %
Uniones soldadas	200 %
Muelles de ballesta	> 1000 %

Entre otros beneficios proporcionados por la aplicación del granallado pueden ser mencionados los siguientes: aumento de la resistencia a la corrosión bajo tensión, minimización de la ocurrencia de fallas por corrosión debido al efecto “fretting”, aumento de la resistencia a la erosión, aumento de la dureza de la superficie para una gran variedad de materiales, disminución de la porosidad superficial y facilidad para la conformación de muchos componentes metálicos.

A pesar de ser un proceso mecánico muy empleado, continúa siendo objeto de estudio por parte de muchos investigadores, los cuales abordan el asunto de dos maneras: análisis experimental ([2], [3] etc.), y simulación numérico computacional ([4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], entre otros).

La creación de modelos numéricos físico-matemáticos que puedan predecir los valores de tensión residual en la superficie, la tensión residual máxima alcanzada en el tratamiento, la profundidad de la zona plástica, así como otros parámetros de interés, llevarían a la ejecución del proceso de granallado con mayor eficiencia y productividad. Esto se vería reflejado en la calidad de las piezas y elementos estructurales tratados, durante el tiempo de servicio. Todos esos aspectos expuestos hasta aquí constituyen la motivación de este trabajo.

El objetivo fundamental consiste en implementar un modelo tridimensional utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF) que simule el proceso de granallado para múltiples impactos, analizando la distribución de tensiones residuales obtenida y comparando los resultados con valores experimentales disponibles en la literatura especializada.

2. Características del modelo numérico.

El modelo consiste en una célula representativa de una placa cuya superficie plana está siendo bombardeada con un chorro de granallas esféricas, Figura 2. El objetivo de la simulación es encontrar el campo de tensiones residuales de compresión (CTRC) para una pieza metálica de acero AISI 4340, sometida al proceso de chorro de perdigones. Debe ser destacado que la Figura 2 representa solamente el primer impacto (nueve granallas). En la modelación numérica realizada el proceso es repetido cinco veces, completando al final un total de 45 impactos. En lo tocante a la geometría del modelo, es considerado que la superficie es plana y que se encuentra expuesta al impacto de esferas de diámetro muy pequeño comparado a las dimensiones de la misma. Otra consideración importante de esta simulación es que el CTRC generado en la pequeña región de superficie alcanzada por el chorro, va a representar el CTRC en toda la superficie de una pieza metálica sometida al proceso de granallado. Fue empleado el programa comercial ANSYS versión 10 para el análisis por el MEF en la implementación del modelo.

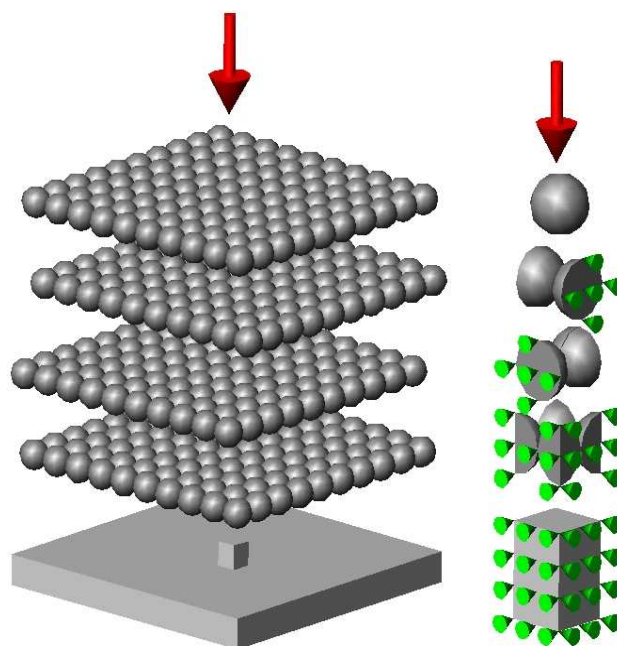


Figura 2. Esquema del proceso de granallado y selección de la célula representativa.

2.1. Tipos de elementos finitos utilizados.

El modelo, de tipo tridimensional, Figura 3, posee un total de 7956 elementos tridimensionales de interpolación lineal y 9861 nodos; son utilizados elementos hexaédricos de 8 nodos tanto en los proyectiles cuanto en la placa, procurando garantizar una discretización mayor en la zona de contacto.

Son generados también elementos de contacto entre la superficie de la placa atingida y las superficies de los proyectiles que entran en contacto.

2.2. Tipo de Material.

Para la simulación por el MEF del granallado, fue considerado como material de la placa el acero AISI 4340, por ser un material bastante usado en aplicaciones de la industria mecánica y aeronáutica, por ejemplo: ejes, cigüeñales, engranajes, envases de presión y herramientas para forja entre otras.

Fue considerado el comportamiento elasto-plástico del acero AISI 4340 usando un modelo de curva tensión-deformación bi-linear. Las principales propiedades mecánicas son presentadas en la Tabla 2. El material seleccionado para las granallas fue el hierro fundido, cuyas propiedades mecánicas son presentadas en la Tabla 3.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero AISI 4340.

E [MPa]	ν	ρ [kg/m ³]	σ_e [MPa]	σ_u [MPa]
2,1E+05	0.3	7800	1500	1864

Tabla 3. Propiedades mecánicas de los proyectiles.

E_{gran} [MPa]	ν_{gran}	ρ_{gran} [kg/m ³]	σ_{e_gran} [MPa]
1,7 E+05	0.3	7800	290

Donde:

E: módulo de elasticidad

ν : coeficiente de Poisson

ρ : densidad;

σ_e : límite de fluencia

σ_u : límite de resistencia mecánica

E_{gran} : módulo de elasticidad de la granalla

ν_{gran} : coeficiente de Poisson de la granalla

ρ_{gran} : densidad de la granalla

σ_{e_gran} : límite de fluencia de la granalla

Es conveniente destacar que en el análisis realizado la granalla fue considerada como un cuerpo rígido, por lo tanto las propiedades mecánicas encima mencionadas no fueron consideradas en toda su plenitud. Debido a las altas velocidades de deformación presentes en el impacto, el análisis es considerado de tipo dinámico explícito, ya que los CTRC obtenidos por el impacto de un proyectil, analizados de manera dinámica y estática

son diferentes [11]. En este trabajo fue adoptado como valor de la velocidad de impacto 100 m/s, ya que en la práctica puede ser considerado como una velocidad patrón. Otro aspecto que también fue tenido en consideración en la simulación, debido al valor de velocidad escogido fue el efecto de la tasa de deformación sobre la curva tensión-deformación del material de la placa, empleándose el modelo de sensibilidad del material al incremento de la tasa de deformación propuesto por Cowper-Symonds [12].

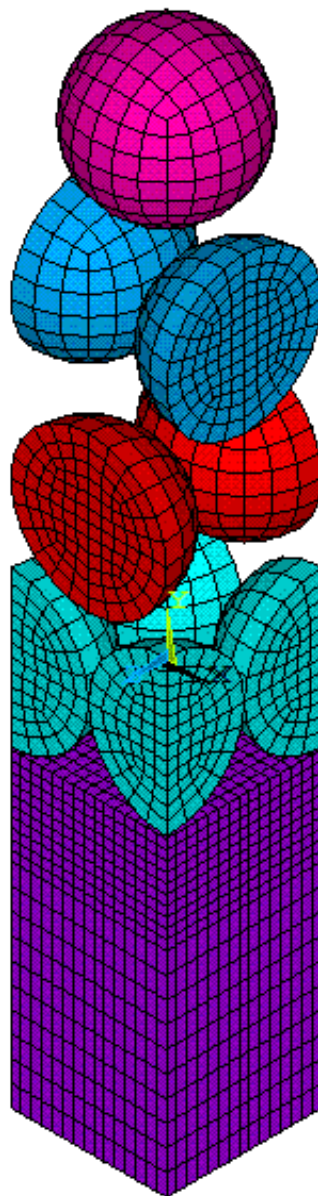


Figura 3. Modelo de célula representativa para la simulación del granallado.

3. Análisis de los resultados.

En la Figura 4 pueden ser observadas las distribuciones de tensiones residuales de compresión originadas por los cinco impactos sucesivos de las nueve granallas. La referida Figura 4 destaca los valores máximos de tensión de compresión (en color azul) inmediatamente debajo de la superficie en las regiones de contacto, apareciendo posteriormente valores de tensiones de tracción (en color rojo). Esta distribución de tensiones es característica del proceso de granallado.

Los valores de la profundidad de la zona plástica provocada por el impacto serán comparados con valores empíricos calculados utilizando las correlaciones establecidas por Wang *et al.* [3], Ecuación 1, y por la Ecuación teórica 2, planteada por Al-Obaid [2], las cuales son mostradas a continuación:

$$h_p = A_o + k \cdot f_A \quad (1)$$

$$\frac{h_p}{R} = 3 \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{\rho V_0^2}{\bar{p}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

Siendo que:

$$k = 1,392 - 0,611(\sigma_u / \sigma_{u ref}) \quad (3)$$

Donde:

h_p : profundidad de la zona plástica

f_A : intensidad del granallado

σ_u : límite de resistencia mecánica

$\sigma_{u ref}$: límite de resistencia mecánica referencial

R : radio de la granalla; ρ : densidad del material de la granalla

V_0 : velocidad de la granalla

\bar{p} : presión media de impacto (puede ser considerada como $3\sigma_e$; σ_e : tensión límite de fluencia del material de la placa.

El acero utilizado como referencia para efectuar todas las correlaciones experimentales es el acero SAE 1070. El valor de A_o tiene que ver con el tipo de material y según recomendaciones puede ser asumido para aleaciones de titánio y aluminio $A_o = 0,01$, para aceros con valor de σ_u entre 870 e 1000 MPa $A_o = 0,09$ y, en general, en las restantes situaciones prácticas $A_o = 0,04$.

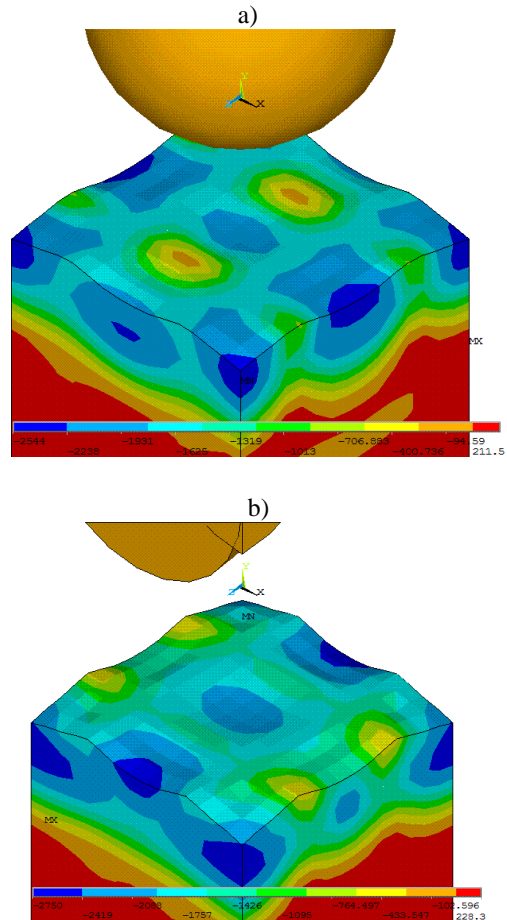
El valor de la variable f_A está relacionado a la intensidad Almen y indirectamente a la velocidad con que el chorro de partículas impacta la pieza tratada. En la simulación realizada en esta investigación, la

velocidad considerada para el impacto de los proyectiles sobre la placa, como ya fue dicho, fue de 100 m/s.

Considerando este valor de velocidad, el material de granalla empleado y, utilizando las correlaciones experimentales de Guagliano [4], fue calculado el valor de f_A , correspondiendo el mismo a 0,4445 mmA.

En la Figura 4 puede ser apreciado que, en el primer impacto, aparecen en la superficie de la placa focos de tensiones residuales de tracción. Este fenómeno está presente, en mucho menor grado sin embargo, en el segundo, tercero y cuarto impacto. Esto representa un serio problema, pues al contrario de mejorar la resistencia a la fatiga de la pieza tratada, disminuirá su tiempo de vida útil. Puede ser observado adicionalmente que, para el quinto impacto, Figura 4e, queda demostrado que no solo no existen tales regiones con tensiones residuales de tracción en la superficie, como también, existe una mejor distribución (más uniforme) de las tensiones residuales de compresión.

Esto coloca en evidencia que ya en esta etapa del tratamiento fue alcanzada una cobertura adecuada de la superficie de la pieza, hecho que en la práctica, estaría relacionado con el tiempo de exposición de la superficie del elemento tratado al chorro de granallas.



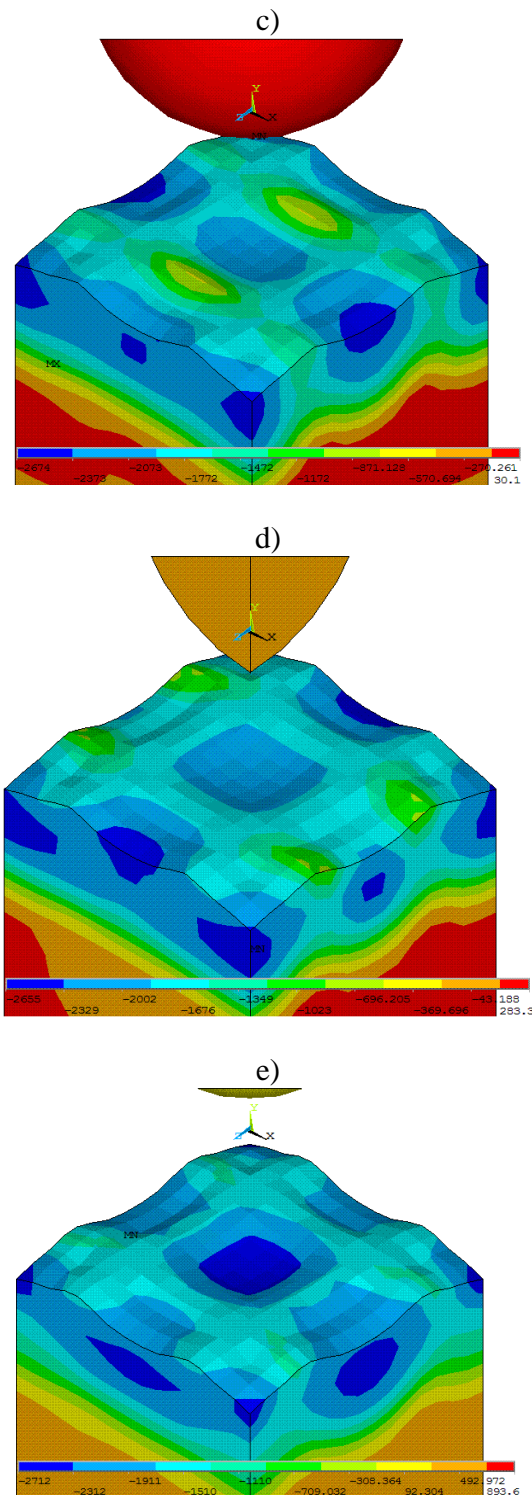


Figura 4. Distribución de los CTRC debido a los sucesivos impactos [MPa]. (a) primero impacto, (b) segundo impacto, (c) tercero impacto, (d) cuarto impacto e (e) quinto impacto.

3.1 Valores de tensiones residuales.

Fueron determinados, a partir de la modelación realizada, los valores máximos de tensión residual, los valores en la superficie de la placa, así como el valor de la profundidad de la zona plástica atingida para cada uno de los cinco impactos.

La Figura 5 describe los puntos de la superficie de la placa donde fueron analizados los valores de las tensiones residuales, con el fin de poder tener una idea de la variación de los valores en el lugar de impacto y en regiones apartadas. Esto ofrece una información valiosa en relación a lo que sucede cuando no es cubierta por completo la superficie de la pieza o, en otras palabras, cuando existe una cobertura insuficiente.

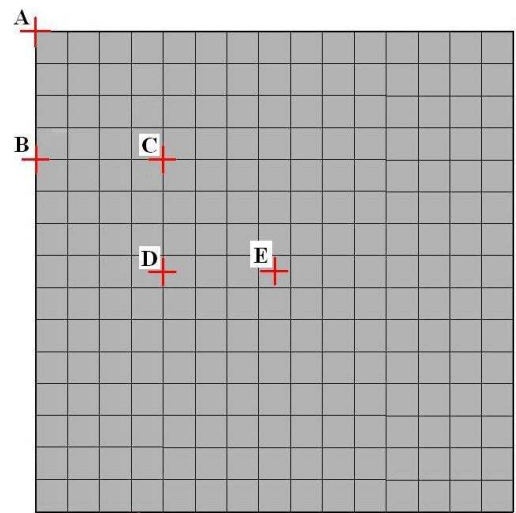


Figura 5. Puntos escogidos para la determinación de las tensiones residuales.

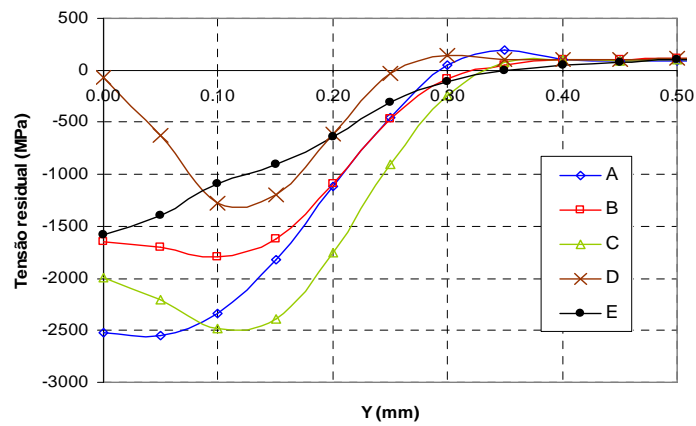
En la Figura 6 son ilustrados los gráficos correspondientes a la distribución de tensiones para los puntos mostrados en la Figura anterior (desde la superficie hasta el final de la célula representativa) (A, B, C, D, E y F).

Puede ser observado en la Figura 6a, la cual corresponde al primer impacto, que existe una gran variación en los valores de las tensiones residuales, tanto en la superficie cuanto a los valores máximos atingidos. Ya en la Figura 6b, que ilustra las distribuciones de tensiones residuales correspondientes al quinto impacto, puede ser apreciada una tendencia de los valores de las tensiones a uniformarse. Esto, como fue referido anteriormente, se debe fundamentalmente a que existe, en esta etapa, una mayor cobertura de la superficie por los múltiples impactos.

La Figura 7 ilustra los valores medios de las tensiones residuales para cada impacto de los nueve proyectiles.

Cada gráfico representa la media de la distribución de tensiones residuales llevando en consideración todos los puntos de la superficie de la célula representativa.

a)



b)

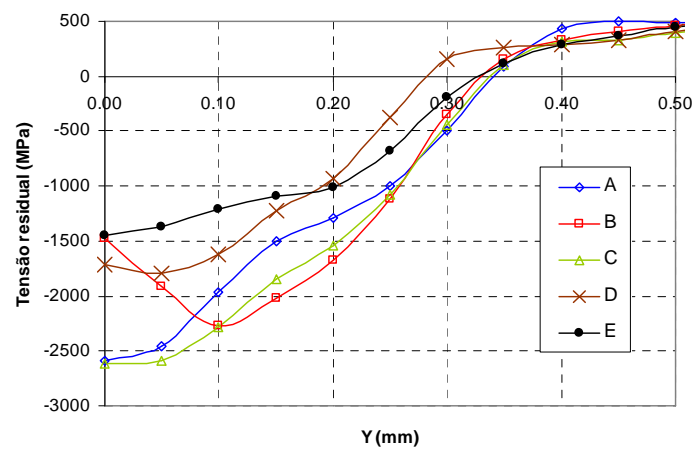


Figura 6. Distribución de las tensiones residuales para los puntos A, B, C, D, y E. (a) primer impacto; (b) quinto impacto.

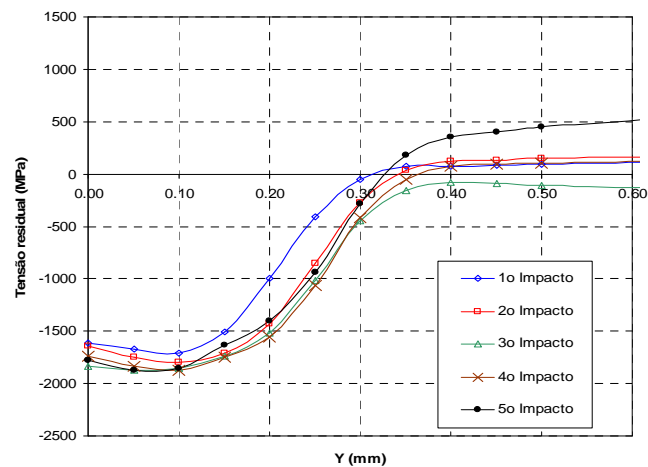


Figura 7. Media de las distribuciones de tensiones residuales para cada impacto.

3.2 Comparación de los valores de tensiones residuales y de la profundidad de la zona plástica.

A continuación son relacionados los valores de las tensiones residuales (máximo y en la superficie de la placa), así como el valor de la profundidad de la zona plástica para el quinto impacto.

Aparecen los resultados obtenidos empleando el MEF, los resultados alcanzados por Majzoobi *et al.* [13], así como aquellos calculados utilizando las ecuaciones empíricas recurrentes de la experimentación. La Tabla 4 presenta los valores referentes a la profundidad de la zona plástica atingida.

Tabla 4. Profundidad de la zona plástica h_p [mm]

(Modelo)	Majzoobi <i>et al.</i> (2005)[13]	Wang et al. (1998)[3]	Al-Obaid (1995)[2]
0,33	0,3	0,28	0,39

En la Tabla 5 son mostrados los valores de las tensiones residuales en la superficie y máxima obtenidos por la simulación y por el trabajo de Majzoobi *et al.* [13] (Fue utilizado el mismo material).

Tabla 5. Valores de las tensiones residuales de compresión máxima y en la superficie [MPa].

σ_s^r (Modelo)	σ_m^r (Modelo)	σ_s^r (Majzoobi <i>et al.</i> , [13])	σ_m^r (Majzoobi <i>et al.</i> , [13])
1773,4	1872,46	1150	1550

Donde:

σ_s^r : tensión residual en la superficie de la placa

σ_m^r : tensión residual máxima

Tanto los valores de las tensiones residuales como los valores de la profundidad de la zona plástica atingida presentan una buena concordancia cuando son comparados con valores teóricos y experimentales, teniendo en consideración la complejidad del fenómeno estudiado. La diferencia en relación a los valores de las tensiones residuales presentados en la Tabla 5 puede ser atribuida al hecho de que en esta modelación no fue considerado el efecto del amortiguamiento del material estudiado. Este aspecto será abordado en trabajos futuros. Con respecto al valor de la profundidad de la zona plástica atingida, puede afirmarse que la determinación de este valor con precisión es de gran importancia desde el punto de vista de la ingeniería, pues está relacionado directamente al incremento de la vida útil a la fatiga del elemento granallado.

4. Conclusiones y recomendaciones.

- El Método de los Elementos Finitos se presenta como una herramienta viable para modelar el proceso de granallado;
- Los resultados obtenidos satisfacen las expectativas de los autores en relación al análisis desarrollado, tomando en consideración todo lo que fue discutido a lo largo del desarrollo del trabajo.
- Se propone para futuras simulaciones analizar el efecto del amortiguamiento, lo que deberá contribuir a mejorar la representación del proceso de granallado.

5. Referencias bibliográficas.

1. THE WHEELBRATOR CORPORATION, 1977. "Shot Peening", 10th edition, Indiana, USA.
2. AL-OBAID, D. Y. F, 1995. "Shot peening mechanics: experimental and theoretical analysis". Mechanics of Materials, vol.19, pp. 251-260.
3. WANG, S., LI, Y., YAO, M., WANG, R., 1998. "Compressive residual stress introduced by shot peening". Journal of Materials Processing Technology, vol.73, pp. 64-73.
4. GUAGLIANO, M., 2001. "Relating Almen intensity to residual stresses induced by shot peening: a numerical approach". Journal of Materials Processing Technology, vol.110, pp. 277-286.
5. CALLE, M. A., GONÇALVES, E., 2004. "Análise numérico-computacional das tensões residuais induzidas pelo jateamento com granalha". Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, São Paulo, Brasil.
6. CALLE, M. A., GONÇALVES, E., 2004. "Modelamento tridimensional pelo Método dos Elementos Finitos das tensões residuais geradas no jateamento com granalha". Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Universidades de Pará, Brasil.
7. CALLE, M. A., GONÇALVES, E., 2003. "Modelación por elementos finitos de las tensiones residuales generadas por granallado en acero SAE 1070". III Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica. Pontificia Universidad Católica do Peru.
8. BENÍTEZ, B. D., GONÇALVES, E., 2001. "Modelagem do processo de jateamento por granalha empregando o Método dos Elementos Finitos". V Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica y IV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Venezuela.
9. BENÍTEZ, B. D., GONÇALVES, E., CALLE, M. A., 2003. "Simulação das Tensões e Deformações Residuais No Processo de Jateamento Empregando o Método dos Elementos Finitos". II Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

10. BENÍTEZ, B. D., ANGELO, E., GONÇALVES, E., 2005. "Finite Element Shot Peening Simulation for Residual Stresses". Analysis and Comparison with Experimental Results. VIII Argentinian Congress on Computational Mechanics Mecom2005, Buenos Aires, Argentina.
 11. KOBAYASHI, M. *et al.*, 1998. "Mechanics of Creation of Compressive residual Stress by Shot Peening". International Journal of Fatigue, vol. 20, No 5, pp. 351-357.
 12. JONES, N., 1988. "Structural Impact". Cambridge University Press.
 13. MAJZOobi, G.H., AZIZI, R., ALAVI NIA, A., 2005. "A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts". Journal of Materials Processing Technology, vol.164-165, pp. 1226-1234.
-

3d shot peening process analysis using multiple impacts model.

Abstract.

The shot peening is one of the most used superficial treatments for, amongst other applications, providing a considerable increase of the fatigue life elements of machines and structures submitted to cyclic loads. The control of parameters, such as, the depth of the plastic zone, residual stresses level, among others, is of vital importance to guarantee the adequate application of the treatment. To simulate the shot peening process, using the Finite Elements Method, a three-dimensional representative cell model of the treated part surface is created and submitted to the multiple impact shots. The model evaluates the compression residual stresses field in different regions of the cell surface, due to the impact shots, in order to find the best representation through out the cell. The representative profile evaluation is important, since it is responsible for the improvement of the mechanical properties of the component. The results reveal additionally, in an implicit way, the effect of the shot peening process covering, in the behavior of the residual stress profile, which is also commented in the work. The results are compared with experimental results available in the specialized literature and presented in form of graphs and tables.

Keyword: Shot peening, residual stress, finite elements, modeling.