



90  
AÑOS  
PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ

Federación  
Iberoamericana  
de Ingeniería  
Mecánica



## 8º CONGRESO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA

Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007

### MODELAGEM COMPUTACIONAL DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA PEÇA E A VELOCIDADE DE IMPACTO DO JATO NO PROCESSO DE JATEAMENTO COM GRANALHA

**Miguel Angel Calle Gonzales\***, **André Menezes de Andrade\*\***, **Daniel Benítez Barrios\*\***, **Arnaldo H. Paes de Andrade\*\*\***, **Edison Gonçalves\***

\* Centro de Estruturas Navais e Oceânicas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Professor Mello Moraes, 2231, CEP 05508-900 - São Paulo - S.P. 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, \*\*\*Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais (CCTM), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen). Av. Prof. Lineu Prestes 2242 – Cid. Universitária – CEP 05508-900

\*e-mail: mcallegonzales@gmail.com

#### RESUMO

O presente trabalho apresenta uma modelagem computacional do processo de Jateamento Com Granalhas (JCG), empregando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Foram feitas modelagens de um impacto isolado de uma granalha sobre uma placa utilizando um modelo axissimétrico, mudando os valores da espessura da placa e da velocidade de impacto do projétil. Foram analisados dois materiais, o aço AISI 4340 e a liga de alumínio AMS 4202C. Como resultados são fornecidas as distribuições de tensões residuais e o valor da profundidade da zona plástica atingida para cada mudança das variáveis selecionadas. Finalmente os resultados obtidos através da simulação numérica foram comparados com resultados teóricos e experimentais da literatura especializada, apresentando-se as conclusões e recomendações pertinentes.

#### PALAVRAS CHAVES

Jateamento com granalha, tensões residuais, elementos finitos, modelagem

## INTRODUÇÃO

Estruturas mecânicas e peças que sofrem solitação de tensões dinâmicas costumam falhar depois de certo tempo de vida. Uma das características que estuda a ‘falha’ dessas peças é sua resistência à fadiga que, de modo resumido, mede o número de ciclos médio de tensão-compressão necessário para o aparecimento de uma trinca.

O aparecimento da trinca é o primeiro estágio de um processo que leva ao rompimento da peça. Essa situação pode ser acelerada na presença de tensões residuais, que favorecem o aparecimento de trincas [2], [3].

Vários métodos são utilizados para retardar o processo de fadiga, estando entre eles o jateamento com granalhas (JCG). O JCG é um tratamento em frio para superfícies metálicas, usado com o objetivo de aumentar a resistência à fadiga do material [5].

Nesse tratamento esferas metálicas muito duras (geralmente de aço), são disparadas contra uma superfície por um jato de ar ou impelidas por força centrífuga por uma turbina. À medida que as pequenas esferas colidem contra a superfície, criam-se tensões residuais de compressão. Essas tensões de compressão dificultam o crescimento de trincas, melhorando então a resistência à fadiga da estrutura [4].

As melhoras efetivas que podem ser alcançadas dependem muito de cada aplicação individual. Porém, por exemplo, podem ser citados os seguintes valores referenciais relacionados ao incremento da vida útil de vários elementos de máquina na Tabela 1.

Tabela 1. Incremento na vida à fadiga empregando-se o JCG.

Barras de torção	140 – 600 %
Engrenagens	> 1000 %
Juntas soldadas	200 %
Molas de feixe	> 1000 %

Entre outros benefícios proporcionados pela aplicação do JCG podem ser mencionados os seguintes: aumento na resistência à corrosão sob tensão, minimização da ocorrência de falhas por corrosão devido ao efeito ‘fretting’, aumento da resistência à erosão, aumento da dureza da superfície de muitos materiais, diminuição da porosidade superficial e facilitação da conformação de componentes metálicos.

A geração de modelos numéricos físico-matemáticos que possam prever os valores de tensão residual na superfície, a tensão residual máxima atingida no tratamento, a profundidade da zona plástica, assim como outros parâmetros de interesse levariam à execução do processo de JCG com maior eficiência e produtividade. Isto se refletiria na qualidade das peças e elementos estruturais tratados durante o tempo de serviço [4]. Todos esses aspectos expostos constituem-se na motivação deste trabalho.

O objetivo deste trabalho foi a criação de modelos computacionais que simulassem o processo de JCG empregando o Método dos Elementos Finitos e mudando parâmetros importantes na execução prática do mesmo.

Os resultados obtidos dessas simulações são apresentados em gráficos e tabelas. Foram testados três valores de espessura da placa, dois materiais diferentes, aço AISI 4340 e liga de alumínio AMS 4202C, e três valores de intensidade Almen de JCG.

Os valores obtidos através da simulação numérica foram comparados com formulas empíricas obtidas na literatura especializada.

## SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EMPREGANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

### Generalidades da modelagem

O processo de JCG, como dito anteriormente, é um processo muito complexo que envolve muitas variáveis. Neste trabalho a simulação numérica do jateamento com granalha foi desenvolvida empregando um modelo simplificado representativo do processo real. Neste modelo simplificado foi considerado um único impacto de uma granalha esférica de aço temperado, usado comumente nestas aplicações, sobre uma chapa plana que representa a superfície do componente tratado.

Foi desenvolvida a simulação numérica para dois materiais e três espessuras diferentes da chapa: aço AISI 4340 e liga de alumínio AMS 4202C, com espessuras de 1 mm, 2 mm e 5 mm; assim como três intensidades Almen de JCG (Almen tipo A): 0,40 mm, 0,45 mm e 0,5 mm (o que equivale às velocidades de impacto de granalha, de 0,8 mm de diâmetro de aço temperado: 60 m/s, 80 m/s e 100 m/s) [6].

### Propriedades mecânicas dos materiais envolvidos

A seguir são apresentadas, nas Tabelas 1, 2 e 3 respectivamente, as propriedades mecânicas do aço temperado (granalha), da chapa de aço AISI 4340 e da chapa de liga de alumínio AMS 4202C empregadas na modelagem numérico-computacional do processo de JCG.

Tabela 1. Propriedades mecânicas da granalha

E [MPa]	$\nu$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1,7 E+05	0.3	7800

onde:  $E$  = módulo de elasticidade;  $\nu$  = coeficiente de Poisson; e  $\rho$  = densidade. Devido à maior dureza da granalha, quando comparado com o material tratado, esta é considerada dentro da modelagem como material linear elástico, pois não atinge o limite de escoamento durante o impacto [4].

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço AISI 4340

E [GPa]	$\nu$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_u$ [MPa]
210	0.3	7800	1500	1864

Tabela 3. Propriedades mecânicas da liga de alumínio AMS 4202C

E [GPa]	$\nu$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_e$ [MPa]	$\sigma_u$ [MPa]
71	0.33	2710	413	514

onde:  $\sigma_e$  = limite de escoamento; e  $\sigma_u$  = tensão máxima. As chapas impactadas no modelo numérico são caracterizadas dentro do modelo numérico usando as curvas tensão-deformação reais dos materiais envolvidos [4].

### Características do modelo computacional

O modelo numérico considerou um único impacto perpendicular e foi construído com elementos bidimensionais do tipo axissimétrico. Foi empregado o algoritmo do tipo explícito do LS-DYNA devido à grande velocidade do processamento. A Figura 1, apresentada a seguir, ilustra a malha de elementos finitos escolhida após serem feitos testes de convergência, assim como as condições de contorno estabelecidas na modelagem proposta. Pode ser observado na referida Figura que na região de impacto a malha apresenta uma maior discretização a fim de poder determinar com maior exatidão os valores das tensões residuais.

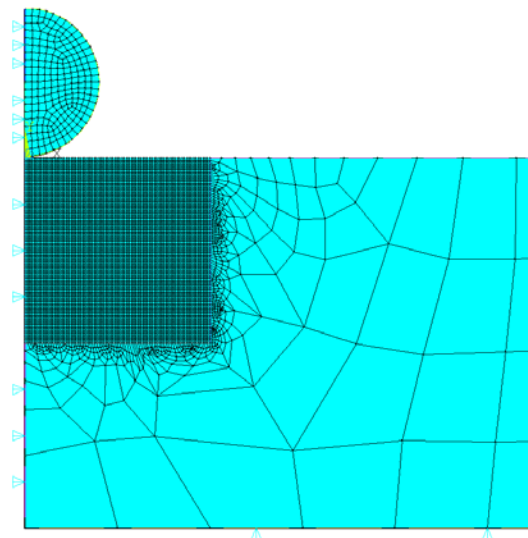


Figura 1. Malha de elementos finitos e condições de contorno estabelecidas para o modelo

## Resultados obtidos na modelagem

Foram analisadas as distribuições de tensão residual ao longo de dois eixos, denominados como 'coluna 1' e 'coluna 2', para cada uma dos modelos desenvolvidos. A 'coluna 1' representa o eixo do impacto da granalha, ou seja, o eixo vertical que define a axissimetria do modelo. A 'coluna 2' é definida ao longo de uma seção paralela e a 0,1 mm de distância do eixo de impacto. A Figura 2 apresenta a distribuição de tensões residuais obtida para uma das modelagens realizadas. A análise é desenvolvida desta maneira devido a que, segundo a literatura revisada sobre simulação numérica do JCG [4], as distribuições de tensões residuais produzidas pelo impacto de uma granalha na zona compreendida dentro da endentação criada na superfície do material atingido variam em função à distância ao eixo de impacto ('coluna 1'), sendo que as distribuições mais representativas ocorrem bem próximas ao eixo mencionado.

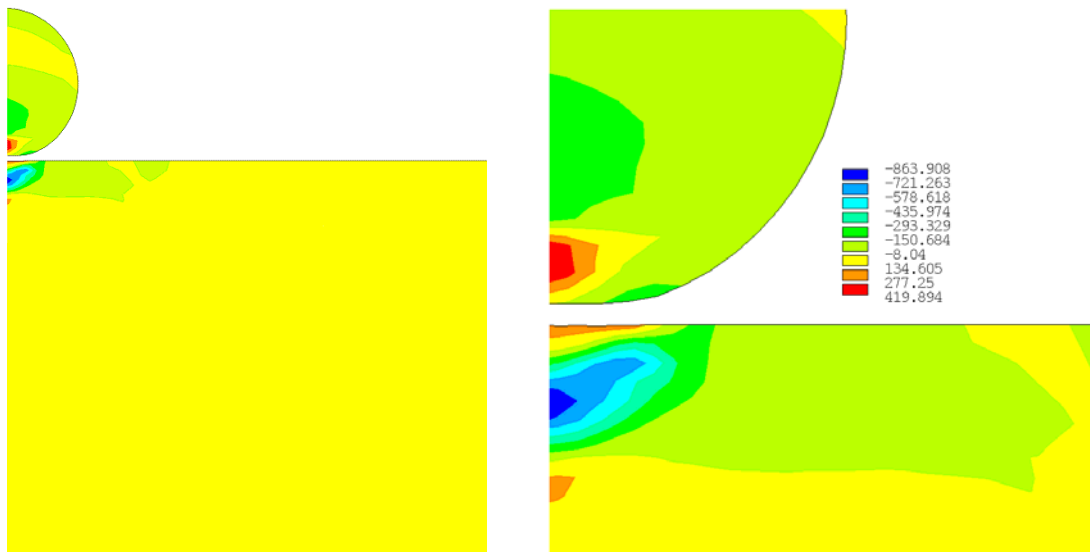


Figura 2. Distribuição de tensões residuais na direção x [Mpa] e detalhe da zona de impacto (modelo N° 8: chapa de aço AISI 4340, espessura = 5 mm, 60 m/s)

Nas Figuras 3 e 4 são mostradas as distribuições de tensões residuais resultantes (na direção x) da simulação numérica para os materiais da chapa: aço AISI 4340 e liga de alumínio AMS 4202C respectivamente. A espessura de chapa para ambas as modelagens é de 5 mm e as velocidades de impacto de granalha são 60, 80 e 100 m/s.

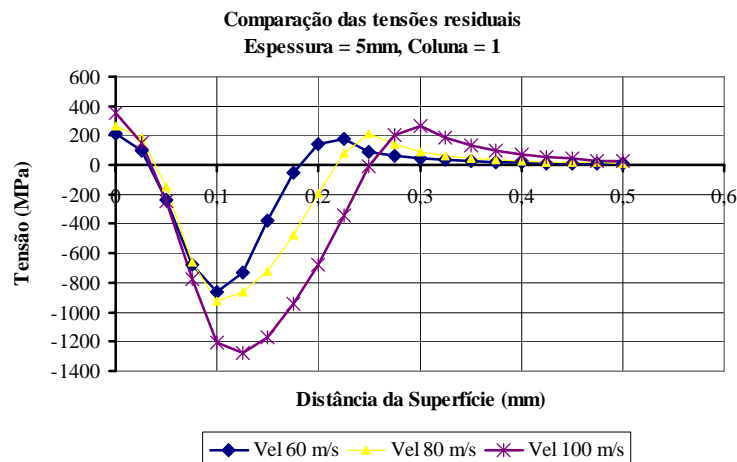


Figura 3. Distribuição das tensões residuais para o aço na coluna 1 [MPa]

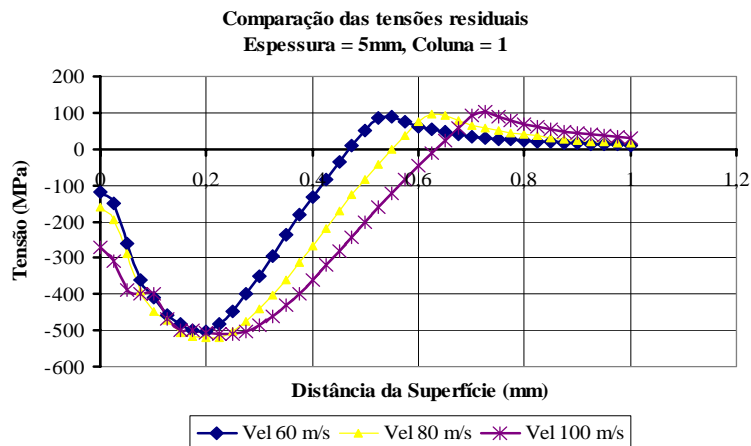


Figura 4. Distribuição das tensões residuais para a liga de alumínio na coluna 1 [MPa]

É observado nas Figuras 3 e 4 que para materiais com menor módulo de elasticidade e menor limite de escoamento, para as mesmas velocidades de impacto, as tensões residuais de compressão geradas na chapa atingem uma maior profundidade podendo se considerar o mesmo processo mais agressivo. Porém os valores de tensão residual de compressão máximo atingido correspondem mais aos limites de escoamento e tensão máxima do material alvo. A continuação, nas Tabelas 4 e 5, são apresentadas os valores de profundidade atingidos pelas tensões residuais de compressão (profundidade da zona plástica)  $h_p$ ; e da tensão residual de compressão máxima  $\sigma_{rm}$ .

Tabela 4. Características das distribuições das tensões residuais resultantes da modelagem do JCG aplicado à chapa de aço AISI 4340 sob diferentes parâmetros

Espessura	V [m/s]	Coluna 1		Coluna 2	
		$h_p$ [mm]	$\sigma_{max}^r$ [Mpa]	$h_p$ [mm]	$\sigma_{max}^r$ [Mpa]
t = 1 mm	60	0,18	867	0,18	770
	80	0,21	989	0,21	924
	100	0,25	1252	0,25	1234
t = 2 mm	60	0,18	947	0,18	798
	80	0,22	976	0,21	927
	100	0,25	1200	0,25	1190
t = 5 mm	60	0,18	863	0,18	820
	80	0,21	923	0,21	872
	100	0,25	1280	0,25	1209

Tabela 5. Características das distribuições das tensões residuais resultantes da modelagem do JCG aplicado à chapa de liga de alumínio AMS 4202C sob diferentes parâmetros

Espessura	V [m/s]	Coluna 1		Coluna 2	
		$h_p$ [mm]	$\sigma_{max}^r$ [Mpa]	$h_p$ [mm]	$\sigma_{max}^r$ [Mpa]
t = 1 mm	60	0,48	509	0,48	506
	80	0,55	513	0,55	513
	100	0,63	514	0,63	511
t = 2 mm	60	0,48	509	0,48	502
	80	0,55	515	0,55	513
	100	0,64	519	0,64	515
t = 5 mm	60	0,48	502	0,46	469
	80	0,55	522	0,55	506
	100	0,63	510	0,63	506

## ESTIMATIVA DAS TENSÕES RESIDUAIS INDUZIDAS PELO JCG

Os resultados obtidos a partir da simulação numérica bidimensional do JCG foram comparados com a estimativa experimental desenvolvida por Wang [1]. No trabalho de Wang foram analisadas quantitativamente as principais características das distribuições de tensões residuais induzidas pelo JCG em vários materiais sob diferentes valores de intensidade Almen de JCG para poder correlacionar os parâmetros comuns do processo de JCG e as propriedades dos materiais envolvidos com os valores de tensão residual obtidos. Assim, têm-se as equações (1) para estimar o valor da tensão residual máxima de compressão, e as equações (2) e (3) para a profundidade da zona plástica.

$$\begin{aligned}\sigma_{\max}^R &= 70 + 0,667\sigma_u \quad (\sigma_u < 1000 \text{ MPa}) \\ \sigma_{\max}^R &= 430 + 0,323\sigma_u \quad (\sigma_u \geq 1000 \text{ MPa})\end{aligned}\quad (1)$$

$$h_p = A_o + k \cdot f_A \quad (2)$$

sendo que:

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

onde:  $\sigma_m$  é a tensão residual máxima de compressão;  $\sigma_u$  é o limite de resistência;  $f_A$  é a intensidade de JCG;  $k$  é uma constante e  $\sigma_{u \text{ ref}}$  é o limite de resistência mecânica referencial. O aço utilizado como referência para efetuar todas as correlações experimentais é o SAE 1070 [1]. O valor de  $A_o$  depende do tipo de material [1], para ligas de titânio e alumínio  $A_o = 0,01$ , para aços com valor de  $\sigma_u$  entre 870 e 1000 MPa  $A_o = 0,09$  e, em outros casos,  $A_o = 0,04$ . Na Tabela 6 são mostrados os valores da profundidade da zona plástica e da tensão residual de compressão máxima, para as mesmas considerações tidas nos modelos numéricos, calculados a partir das equações (1), (2) e (3).

Tabela 6. Características das distribuições das tensões residuais obtidas através das correlações empíricas de Wang [1] para a chapa de aço AISI 4340 e de liga de alumínio AMS 4202C

	V [m/s]	$h_p$ [mm] (Wang et al)	$\sigma_{\max}^r$ [Mpa] (Wang et al, 1998)
Aço AISI 4340	60	0,21	1032
	80	0,23	1032
	100	0,26	1032
Liga de alumínio AMS 4202C	60	0,41	413
	80	0,45	413
	100	0,52	413

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com relação à variação de espessura não houve uma diferença significativa no que se refere aos valores de tensões residuais obtidos. Tanto os valores de profundidade da zona plástica como as tensões residual máxima e superficial tiveram valores bem próximos para diferentes espessuras, mudando somente a configuração do gráfico.

Isto se deve provavelmente a que o algoritmo da simulação numérica empregado nesta modelagem não permite um equilíbrio (reordenamento) posterior das tensões resultantes ao longo da seção e a conseqüente reconfiguração da geometria, ou seja, a flexão da chapa pelo alívio de tensões.

Por este motivo a diferença da absorção da energia cinética da granalha devido a diferente espessura da chapa alvo não repercutiu sobre a distribuição de tensões residuais, tal vez sim se a chapa fosse mais fina ainda. Porém, acredita-se que a diferença será notória quando ocorrer a própria flexão da chapa.

Com relação às velocidades pode-se perceber, observando-se as Figuras 3 e 4 mostradas anteriormente, uma grande diferença na distribuição das tensões residuais quando usados diferentes valores. Quanto maior a velocidade maior será a profundidade da zona plástica, assim como a tensão residual máxima de compressão. A velocidade se torna um fator muito importante pelo fato do impacto da esfera na placa ser o responsável pela criação de tensões residuais de compressão. Quanto maior a velocidade do projétil (ou a intensidade Almen do JCG), maior a repercussão do impacto e maior os valores de tensão residual, o que condiz com os resultados obtidos.

Não se notou uma diferença significativa com relação aos valores de tensão residual na superfície. Isto se deve por não ser considerada a influência dos múltiplos impactos que ocorrem próximos ao impacto analisado.

## CONCLUSÕES

O estudo realizado mostrou o Método dos Elementos Finitos como uma ferramenta capaz de representar o processo de jateamento com granalhas.

Os valores da profundidade da zona plástica atingida, calculados através da modelagem e empregando as equações de Wang [1] apresentaram uma boa concordância, levando em consideração que somente é considerado um impacto isolado. Encontrou-se uma diferença para os valores de profundidade da zona plástica de 11% e 22 % para o aço AISI 4340 e para a liga de alumínio AMS 4202C respectivamente.

Também foi calculada uma diferença para os valores de tensão residual máxima de compressão de 16 % e 25 % para o aço AISI 4340 e para a liga de alumínio AMS 4202C respectivamente.

Embora exista uma diferença apreciável entre os resultados da modelagem numérica e a estimativa de Wang [1] os resultados são considerados aceitáveis para uma estimativa de projeto empregado, por exemplo, para análise de vida à fadiga ou estudo de crescimento de trinca de um determinado componente mecânico.

Uma maior aproximação, devido à complexidade do processo envolvido, requereriam algumas considerações adicionais na modelagem que sofisticaria a modelagem ao grau de deixar de ser uma estimativa prática e rápida. Entre estas considerações podem ser mencionadas: amortecimento do material, influência da taxa de deformação do material quando deformado a altas velocidades, influência dos múltiplos impactos, etc.

Os resultados obtidos demonstraram a influência significativa da velocidade de impacto da granalha na distribuição de tensões residuais.

## REFERÊNCIAS

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

## UNIDADES E ABREVIACÕES

$A_0$	Constante relacionada ao tipo de material (m)
$E$	Módulo de elasticidade (Pa)
$f_A$	Intensidade de JCG (m)
$h_p$	Profundidade da zona plástica (m)
JCG	Jateamento com Granalhas
$k$	Constante (adimensional)
MEF	Método dos Elementos Finitos
$\sigma_e$	Limite de escoamento (Pa)
$\sigma_u$	Tensão máxima (Pa)
$\sigma_{rm}$	Tensão residual de compressão máxima (Pa)
$\sigma_{u ref}$	Limite de resistência mecânica referencial (SAE 1070) (Pa)
$\nu$	Coefficiente de Poisson (adimensional)
$\rho$	Densidade do material ( $\text{kg/m}^3$ )