RICARDO AUGUSTO DE BARROS LEITE

Planejamento de processos de *peen forming* baseado em modelos analíticos do jato de granalhas e do campo de tensões residuais induzidas na peça

São Paulo

2016

RICARDO AUGUSTO DE BARROS LEITE

Planejamento de processos de *peen forming* baseado em modelos analíticos do jato de granalhas e do campo de tensões residuais induzidas na peça

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Flavius Portella Ribas Martins

São Paulo

2016

Nome: Ricardo Augusto de Barros Leite

Título: Planejamento de processos de peen forming baseado em modelos analíticos do jato de granalhas e do campo de tensões residuais induzidas na peça

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Ciências

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo apoio emocional e criação, que me permitiram chegar onde estou hoje.

Ao Prof. Dr. Flavius, por ter compartilhado comigo seus conhecimentos, me dado suporte e orientação neste processo de desenvolvimento da dissertação e me inspirado a continuar no mundo acadêmico

Ao Prof. Dr. Sergio Delijaicov e à Fundação Educacional Inaciana por me ceder seu laboratório para que eu pudesse realizar os experimentos que contribuíram com a confecção deste documento.

À Universidade de São Paulo por ter me dado a oportunidade de realização de um curso de mestrado.

À Agência CAPES, pela concessão de bolsa de mestrado e apoio financeiro para que pudesse publicar o artigo fruto desse trabalho e apresentá-lo em uma conferência internacional.

"- O verdadeiro prazer está no descobrir, e não no saber"

Isaac Asimov

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, ____ de _____ de 20__.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Leite, Ricardo Augusto de Barros

Planejamento de processos de peen forming baseado em modelos analíticos do jato de granalhas e do campo de tensões residuais induzidas na peça / R. A. B. Leite -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
102 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.peen forming 2.shot peening 3.dinamica de sistemas materiais
4.planejamento de processos 5.projeto de experimentos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO

LEITE, R. A. B. **Planejamento de processos de *peen forming* baseado em modelos analíticos do jato de granalhas e do campo de tensões residuais induzidas na peça.** 2016. 102p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

Peen forming é um processo de conformação plástica a frio de laminas ou painéis metálicos através do impacto de um jato regulado de pequenas esferas de aço em sua superfície, a fim de produzir uma curvatura pré-determinada. A aplicação da técnica de *shot peening* como um processo de conformação já é conhecida da indústria desde a década de 1940, mas a demanda crescente por produtos de grande confiabilidade tem impulsionado o desenvolvimento de novas pesquisas visando o seu aperfeiçoamento e automação. O planejamento do processo de *peen forming* requer medição e controle de diversas variáveis relacionadas à dinâmica do jato de granalhas e à sua interação com o material a ser conformado. Conforme demonstrado por diversos autores, a velocidade de impacto é uma das variáveis que mais contribui para a formação do campo de tensões residuais que leva o material a se curvar. Neste trabalho é apresentado um modelo dinâmico simplificado que descreve o movimento de um grande número de pequenas esferas arrastadas por um fluxo de ar em regime permanente e sujeitas a múltiplas colisões entre si e com a peça a ser conformada. Simulações deste modelo permitiram identificar a correlação entre o campo de velocidades das granalhas e os demais parâmetros do processo. Mediante a aplicação da técnica de projeto de experimentos pôde-se estimar os valores dos parâmetros que otimizam o processo. Ao final, elaborou-se um algoritmo que permite realizar o planejamento de processos de *peen forming*, ou seja, determinar os valores desses parâmetros, de modo tal a produzir uma curvatura pré-determinada em uma placa metálica originalmente plana. Identificaram-se como parâmetros mais relevantes para se atingir uma cobertura de 100% a distância bocal-placa, diâmetro das esferas e tempo de exposição. Experimentos foram reproduzidos no algoritmo de planejamento de experimentos e os valores de raio de curvatura por ele previstos apresentaram boa aderência aos resultados experimentais.

Palavras-chave: *peen forming*, *shot peening*, dinâmica de sistemas materiais, planejamento de processos, projeto de experimentos.

ABSTRACT

LEITE, R. A. B. **Peen forming process planning based on analytical models of the shots' jet and residual stress fields induced on a plate.** 2016. 102p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

Peen forming is a plastic cold work process of shaping a metallic sheet or panel through the impact of a regulated blast of small round steel shots on its surface, in order to produce a previously desired curvature. The application of the shot peening as a forming process has been a known technique in the industry since the decade of 1940, but the increasing demand for products of high reliability have pushed the development of new research in order to enhance and automate it. Peen forming process planning requires the measurement and control of several variables concerning the dynamics of the shot jet and its interaction with the piece to be shaped. As previously shown by several authors, impact velocity is one of the variables that most contribute to the development of the residual stress field that causes the material to bend. In this article we present a simplified dynamical model describing the motion of a large number of small spheres (shot) dragged by an air flow in steady conditions and exposed to multiple collisions with each other and with the piece to be shaped. Computer simulations of this model allowed to identify correlations between the shot field velocity and the parameters of the process. Applying design of experiments techniques it was possible to estimate the value of parameters that optimize the process. It was, then, elaborated an algorithm that enables peen forming process planning, allowing the determination of the parameters, in order to make a predetermined bending in a metallic plate originally plane. It was possible to recognize the nozzle-plate distance, the shot's diameter and the exposition time as the most relevant parameters when it comes to reach coverage equal to 100%. Experiments have been reproduced on the process planning algorithm and the values of the simulation presented good adherence to the experimental results.

Keywords: shot peening, peen forming, material systems dynamics, process planning, design of experiments

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 (A) ARRANJO DE APLICAÇÃO DO JATO DE GRANALHAS; (B) EFEITO LOCAL DO IMPACTO DE UMA GRANALHA.	14
FIGURA 2(A) APARELHO BASEADO NO MÉTODO DOS DOIS DISCOS ROTATÓRIOS PARA ESTIMAR A VELOCIDADE MÉDIA DAS GRANALHAS.(B) DUAS GRANDES MARCAS PODEM SER OBSERVADAS NO DISCO DE REGISTRO.	19
FIGURA 3 EQUIPAMENTO E ESQUEMATIZAÇÃO DAS RODAS CENTRÍFUGAS (PLASTER, 1981).....	21
FIGURA 4 MAQUINAS DE INDUÇÃO POR SUÇÃO E DE PRESSÃO DIRETA (PLASTER, 1981).....	22
FIGURA 5 EXTENSOMEROS NO ARRANJO DE ROSETTA PARA DETERMINAR TENSÕES RESIDUAIS (VISHAY MEASUREMENTS GROUP (2002).....	28
FIGURA 6 MODELO DA CASCA ESFÉRICA E PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS.....	31
FIGURA 7 ESQUEMATIZAÇÃO DO PROBLEMA	36
FIGURA 8 LINHAS DE CORRENTE.....	39
FIGURA 9 PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS SEGUNDO O MODELO ESFÉRICO.....	42
FIGURA 10 PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS SEGUNDO O MODELO DE FLAVENOT	44
FIGURA 11 PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS COMBINANDO-SE OS DOIS MODELOS.....	44
FIGURA 12 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS ESFÉRICO E COMBINADO	45
FIGURA 13 DIAGRAMA DE BLOCOS	47
FIGURA 14 EXEMPLO DE TESTE DE DANIELS.....	53
FIGURA 15 TRAJETÓRIA DAS ESFERAS.....	55
FIGURA 16 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS COLISÕES DAS ESFERAS NA PLACA.....	56
FIGURA 17 TESTE DE ADERÊNCIA À DISTRIBUIÇÃO NORMAL	57
FIGURA 18 COBERTURA X NUMERO DE ITERAÇÕES	58
FIGURA 19 GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA RÁDIO DE CURVATURA.....	62
FIGURA 20 GRÁFICO DE EFEITOS DO EXPERIMENTO DE SCREENING SOBRE A COBERTURA	65
FIGURA 21 TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DE DANIELS PARA COBERTURA.....	64
FIGURA 22 GRÁFICO DE INTERAÇÕES.....	69
FIGURA 23 GRÁFICO DE EFEITOS.....	70

FIGURA 24 RELAÇÃO ENTRE RAIOS DE CURVATURA E VELOCIDADE MÉDIA PARA DIVERSOS DIÂMETROS.....	71
FIGURA 25 RELAÇÃO ENTRE RAIOS DE CURVATURA E VELOCIDADES PARA A ESFERA S550.....	72

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS DE REFERENCIA.....	54
TABELA 2 - RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO E VELOCIDADE DE IMPACTO.....	59
TABELA 3 - VALORES DO RAO DE CURVATURA - 30PSI.....	59
TABELA 4 - VALORES DE RAO DE CURVATURA - 20PSI	59
TABELA 5 - VALORES DO RAO DE CURVATURA - 10PSI	59
TABELA 6 - PARÂMETROS DOS EXPERIMENTOS DE RAO DE CURVATURA.....	60
TABELA 7 - RESULTADO DO EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO.....	61
TABELA 9 - NÍVEIS DOS FATORES EM CADA CORRIDA.....	63
TABELA 10 - RESULTADO DO EXPERIMENTO DE <i>SCREENING</i>	64
TABELA 12 - NÍVEIS DOS FATORES EM CADA TESTE	67
TABELA 13 - RESULTADO DO EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO	67

LISTA DE SIMBOLOS

D^*	DIÂMETRO DO BOCAL
H^*	DISTANCIA ENTRE A SESSÃO DE SAÍDA DO BOCAL E O PLANO DA PLACA
m^p	MASSA DO BARICENTRO DA GRANALHA DE INDICE p
$\vec{v}^p$	VELOCIDADE DO BARICENTRO DA GRANALHA DE INDICE p
$\vec{F}^p$	RESULTANTE DAS FORÇAS EXTERNAS QUE ATUAM NA GRANALHA DE INDICE p
ρ^p	DENSIDADE DA PARTICULA
ρ^f	DENSIDADE DO FLUIDO
v^p	VELOCIDADE DA PARTICULA
v^f	VELOCIDADE DO FLUIDO
g	ACELERAÇÃO GRAVITACIONAL
Dp	DIAMETRO DA PARTICULA
C_d	COEFICIENTE DE ARRASTO
Re^p	NUMERO DE REYNOLDS DA PARTICULA
ρ^*	RAZAO ENTRE AS DENSIDADES DO FLUIDO E DA PARTICULA
r^*	COORDENADA RADIAL DO FLUIDO
z^*	COORDENADA AXIAL DO FLUIDO
R^*	RAIO DO BOCAL
$\vec{v}_{i1}$	VELOCIDADE INICIAL DA PARTICULA i
$\vec{v}_{i2}$	VELOCIDADE FINAL DA PARTICULA i
$\vec{v}_{j1}$	VELOCIDADE INICIAL DA PARTICULA j
$\vec{v}_{j2}$	VELOCIDADE FINAL DA PARTICULA j
m_i	MASSA DA PARTICULA i
m_j	MASSA DA PARTICULA j
σ_θ	TENSÃO CIRCUNFERENCIAL
b	RAIO EXTERNO DA CAVIDADE
R	RAIO DA CAVIDADE
C	EXTENSÃO DA ZONA PLÁSTICA RADIAL
h_p	PROFUNDIDADE DA CAMADA PLÁSTICA
h	ESPESSURA DA CHAPA

V_0	VELOCIDADE DE IMPACTO DA GRANALHA COM A CHAPA
$\bar{p}$	VALOR RELACIONADO A DUREZA DO MATERIAL, IGUAL A APROXIMADAMENTE O TRIPLO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO.
$\sigma_R(z)$	TENSÃO RADIAL EM UMA PROFUNDIDADE Z
λ	PROPORÇÃO ENTRE PROFUNDIDADE DA CAMADA PLÁSTICA E ESPESSURA DA PLACA
E	MÓDULO DE YOUNG DO MATERIAL DA PLACA
ν	COEFICIENTE DE POISSON DO MATERIAL DA PLACA
α	FRAÇÃO DA REGIÃO DEFORMADA ONDE SE ENCONTRA A DEFORMAÇÃO MÁXIMA
ϵ_m	DEFORMAÇÃO MÁXIMA DA PLACA
$\epsilon(z)$	DEFORMAÇÃO DA PLACA EM UMA PROFUNDIDADE z
I	MOMENTO DE INÉRCIA
l	COMPRIMENTO DA PLACA
M	MOMENTO GERADO NA PLACA

CONTEÚDO

1.INTRODUCAO	14
2. JUSTIFICATIVAS	18
3. ELEMENTOS DO PROCESSO DE PEEN FORMING.....	20
3.1 EQUIPAMENTOS DE SHOT PEENING.....	20
3.2 PROCESSOS SIMILARES AO SHOT PEENING.....	22
3.3 VARIÁVEIS RELEVANTES DO PROCESSO.....	23
3.3.1 COBERTURA E TEMPO DE EXPOSIÇÃO.....	24
3.3.2 INTENSIDADE DO JATO E VELOCIDADE MÉDIA DE IMPACTO.....	25
3.3.3 DIÂMETRO MÉDIO DAS GRANALHAS.....	26
3.3.4 TENSÕES RESIDUAIS.....	27
3.4 O CAMINHO PARA A AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE PEEN FORMING.....	28
3.OBJETIVOS	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1. HIPÓTESES INICIAIS.....	34
4.2. MODELO MATEMÁTICO	35
4.3. MODELO COMPUTACIONAL	46
4.4. PLANEJAMENTO E REALIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	73
Bibliografia.....	75
Apêndice A.....	100
Apêndice B.....	86
Apêndice C.....	97
Apêndice D.....	99

1.INTRODUCAO

Peen forming é um processo de conformação de placas ou painéis metálicos que utiliza um jato regulado de pequenas esferas metálicas para induzir, nas subcamadas próximas à superfície alvo dos sucessivos impactos, um campo de tensões residuais compressivas (Fig.1a-b), o qual ocasiona o encurvamento da peça, tornando-a convexa em relação ao sub-espaço que contém o jato (Stotsko and Stefanovych, 2010).

FIGURA 1 (A) ARRANJO DE APLICAÇÃO DO JATO DE GRANALHAS; (B) EFEITO LOCAL DO IMPACTO DE UMA GRANALHA.

Na conformação por *peen forming* utilizam-se máquinas dotadas de bocais ou pistolas que expõem granalhas esféricas metálicas acionadas por ar comprimido ou rotores. O material particulado usado é composto por granalhas de aço fundido ou conformado, desde 0,5mm a 6,0mm de diâmetro, expelidas a velocidades da ordem de 60 m/s (Kalpakdjian e Schmid, 2001).

A taxa de emissão de granalhas e o tempo de exposição da superfície ao jato caracterizam a assim chamada *densidade de cobertura* do processo, cuja medida se baseia na análise visual da superfície exposta ao jato sob aumento mínimo de 10×. A cobertura é de 100% quando, visualmente, se observam endentações e obliterações uniformes sobre toda a superfície exposta ao jato de granalhas.

Para controlar a direção e a curvatura da peça durante a aplicação do processo de *peen forming*, pode-se empregar o pré-tensionamento, impondo-se uma tensão elástica próxima de 75% da tensão limite de escoamento do material a conformar. Com isso, produzem-se camadas plastificadas mais profundas e tensões compressivas de maior intensidade.

O planejamento de processos de *peen forming* requer a medição e controle de grupos de variáveis associadas ao jato (diâmetro médio e propriedades mecânicas das granalhas, velocidade e ângulo de impacto médios, fluxo de massa), à interação entre a superfície da peça e o jato (densidade de cobertura) e à peça propriamente dita (dimensões, propriedades mecânicas, condições de contorno e presença ou não de pré-tensionamento).

Conforme previamente enfatizado por diversos autores (Iida, 1984; Kirk, 1993; Watanabe et al., 1996), a velocidade média de impacto é uma das variáveis que mais contribuem para o desenvolvimento do campo de tensões residuais que provoca a flexão da peça. No entanto, os múltiplos impactos que ocorrem, seja entre granalhas, seja destas contra a superfície a ser conformada, torna a estimativa dessa variável um problema de elevado grau de complexidade, de vez que em sua modelagem devem-se considerar: 1) a geometria do bocal utilizado; 2) a pressão do ar de admissão; 3) a taxa de admissão de massa de granalhas; 4) as distribuições de diâmetros e massas das granalhas; 5) a distância entre a secção de saída do bocal e a superfície da peça a ser conformada; 6) as medidas de dureza dos materiais das granalhas e da peça. Assim, o conhecimento *a priori* dos valores desses parâmetros operacionais é fundamental para que se monitore o processo com vistas à geração de um jato que atinja a peça com uma velocidade média de impacto constante e homogênea, sob um ângulo o mais próximo possível de 90° (pois assim se maximiza sua energia cinética).

Sendo variável de grande importância na modelagem do processo de *peen forming*, mas, ao mesmo tempo, difícil de avaliar analiticamente, a velocidade média de impacto é estimada, via de regra, a partir de medições realizadas com auxílio de instrumentos ópticos, acústicos ou mecânicos, entre duas secções próximas selecionadas meio ao jato de granalhas.

Lecoffre et al. (1992) desenvolveram um dispositivo óptico capaz de medir continuamente a velocidade individual de granalhas em um pequeno volume de controle, de aproximadamente 4mm^3 . O sinal modulado de luz devido à passagem de uma partícula através do volume iluminado é capturado por um fotossensor calibrado e após o adequado condicionamento, é processado e transformado em um sinal temporal de velocidade.

Linnemanet et al. (1996) utilizaram duas barreiras fotoelétricas separadas por uma distância fixa para estimar a velocidade média de passagem das granalhas por meio de um algoritmo clássico de processamento de sinais que identifica o par de picos correspondentes à passagem da gralha e estima o intervalo de tempo entre esses eventos.

O dispositivo proposto por Clausen e Stangenberg (2002) utiliza dois discos giratórios ligados, sendo um deles dotado de um pequeno furo situado a uma dada distância do centro, enquanto o outro (chamado 'disco de registro') possui uma escala que permite medir, relativamente à posição angular do centróide do furo, o deslocamento angular médio do ponto de impacto das granalhas que cruzam o furo e se chocam contra o disco de registro. Para tal dispositivo, a velocidade média das granalhas pode ser expressa como uma função do deslocamento angular médio do ponto de impacto.

Hriberniket et al. (2003) utilizaram um par de microfones de alta sensibilidade como elementos sensores de um sistema de medição de velocidade de granalhas em câmaras de *shotpeening*. Mediante a aplicação de técnicas clássicas de processamento de sinais, a filtragem da resposta em frequências dos microfones permite identificar a frequência característica de passagem das granalhas e, por decorrência, a velocidade média local.

Barker et al. (2005) relatam uma série de experimentos para medir a velocidade média das granalhas em processos de *shotpeening*, sob diferentes pressões de ar de admissão e utilizando bocais com distintas geometrias. Para tanto, utilizam um instrumento óptico que determina o deslocamento de fase dos sinais oriundos da passagem de granalhas por duas barreiras fotoelétricas.

A análise dos métodos de medição referidos acima mostra que são baseados estritamente no processamento dos sinais característicos da passagem de granalhas por um par de barreiras sensoras. Utilizando-se dispositivos opto-eletrônicos, obtêm-se valores locais da velocidade média do jato, mas a caracterização do seu campo de velocidades requereria o uso de um grande número de sensores, algo difícil de se implementar em ambiente industrial. A elaboração de um modelo dinâmico do jato de granalhas e sua posterior simulação computacional, no entanto, possibilita a estimação do seu campo de velocidades e, por decorrência, o ajuste dos parâmetros do processo com vistas à imposição de um campo de tensões residuais capaz de produzir uma curvatura pré-determinada na peça objeto da conformação.

2. JUSTIFICATIVAS

Entre os anos de 2006 e 2008, o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo), a Unicamp e a Embraer desenvolveram, com apoio da FINEP (convênio nº01.05.0748.00 / Ref. 2227/05), um projeto de pesquisa intitulado “Modelamento, monitoramento e controle de processo de conformação por jateamento de esferas de peças usinadas de ligas de alumínio” que tinha como objetivo principal identificar relações quantitativas entre as variáveis intervenientes do processo de *peen forming*.

Para tanto, definiu-se um planejamento de experimentos que utilizou 3 lotes de corpos de prova, cada qual com 144 placas (72 em alumínio 7050 e 72 em alumínio 7475) de 400mm×50mm e espessuras de 2mm, 5mm, 10mm e 15mm, totalizando, portanto, 432 ensaios. Quatro variáveis relevantes do processo foram parametrizadas – diâmetro médio das granalhas (3 grupos: 0,7mm, 1,3mm e 3,2mm), velocidade média de impacto (3 níveis: ‘baixa’, ‘média’ e ‘alta’, conceitos estes variáveis de acordo com as demais condições de ensaio), densidade de cobertura (2 níveis: ‘não saturada’ e ‘saturada’) e condição de pré-tensionamento do corpo de prova (2 níveis: ‘placa pré-tensionada’ e ‘placa livre’).

Os principais resultados gerados por esse projeto foram registrados em relatórios técnicos do IPT (IPT, 2006-a; IPT, 2006-b; IPT, 2008), dos quais alguns foram desenvolvidos e posteriormente publicados em revistas e/ou apresentados em conferências (Almeida et al., 2007; Vieira et al., 2008; Almeida et al., 2008; Fleury et al., 2009; Delijaicov et al., 2010; Vieira et al., 2010; Fleury et al., 2011a; Fleury et al., 2011b).

Cabe ressaltar, no entanto, que as estimativas de velocidade média de impacto levadas a cabo para atender à matriz de experimentos apresentavam elevado nível de incerteza. Essas medidas foram obtidas utilizando-se um dispositivo mecânico baseado no método dos discos rotatórios (Clausen e Stangenberg, 2002) (Fig. 2a). Conforme se pode observar na Fig. 2b, além de o espalhamento angular dos pontos de impacto ser bastante expressivo, observam-se duas grandes zonas de impacto, o que põe em evidência o fato de que a velocidade média das granalhas não é normalmente

distribuída ou, então, de que o dispositivo de medição utilizado interfere com as medidas, alterando a sua distribuição.

FIGURA 2(A) APARELHO BASEADO NO MÉTODO DOS DOIS DISCOS ROTATÓRIOS PARA ESTIMAR A VELOCIDADE MÉDIA DAS GRANALHAS.(B) DUAS GRANDES MARCAS PODEM SER OBSERVADAS NO DISCO DE REGISTRO.

As considerações anteriores apontam para a necessidade de se desenvolver um método alternativo para a estimação da velocidade média de impacto das granalhas em processos de *peen forming*. Pretende-se que esse método seja baseado em um modelo matemático-computacional simplificado do fenômeno físico – múltiplas colisões de esferas impelidas por um jato de ar em regime permanente contra uma placa metálica plana, o qual se valerá das equações da Dinâmica e de um modelo analítico de escoamento de ar incidente sobre uma superfície plana.

3. ELEMENTOS DO PROCESSO DE PEEN FORMING

Nas próximas sessões serão apresentados os aspectos essenciais que devem ser analisados durante o planejamento de processos de *peen forming*.

3.1 EQUIPAMENTOS DE SHOT PEENING

É grande o acervo dos equipamentos e instrumentos utilizados em processos de *shot peening* e de *peen forming*.

Segundo Leghorn (1957), os equipamentos de *shot peening* classificam-se em centrífugos e pneumáticos. Os da primeira categoria possuem rodas centrífugas dotadas de lâminas que, ao girar, arremessam as esferas em direção à peça; os da segunda impulsionam as granalhas por meio de um jato de ar pressurizado expelido por um bocal venturi.

O método das rodas centrífugas (Fig.3) (Plaster, 1981) possibilita a expulsão de saraivadas de granalhas em altíssima velocidade, reduzindo drasticamente o tempo necessário para se produzir na peça uma curvatura desejada. Devido à alta velocidade do material abrasivo ejetado, o processo causa grande desgaste das lâminas do rotor, das paredes da cabine e das fixações. O custo desses equipamentos é elevado, sendo justificável apenas quando se trata de produção em larga escala.

FIGURA 3 EQUIPAMENTO E ESQUEMATIZAÇÃO DAS RODAS CENTRÍFUGAS (PLASTER, 1981)

Os equipamentos pneumáticos, normalmente utilizados no processamento de pequena quantidade de peças, (Fritts, 1998) podem ser subdivididos em três grupos, dependendo do método utilizado para inserir as granalhas no fluxo de ar.

No método de indução por sucção (Fig. 4a), as granalhas que trafegam em um tubo são aspiradas pelo ar comprimido que se expande através do bocal e, em seguida, arrastadas e aceleradas pelo fluxo de ar de alta velocidade. Esse método, aplicável a granalhas com diâmetros máximos de 1,2mm, produz jatos de baixa intensidade, sendo utilizado, em geral, no processamento de peças de pequenas dimensões.

No método de indução por gravidade as granalhas são introduzidas no bocal por meio da força gravitacional, sendo, em seguida, arrastadas pelo jato de ar comprimido.

No sistema de pressão direta (Fig. 4b) há uma câmara pressurizada abastecida por meio de ação gravitacional, onde são depositadas as granalhas que irão alimentar o bocal já sob a mesma pressão do fluxo de ar. O sistema também inclui uma válvula reguladora da vazão de granalhas.

FIGURA 4 A. MAQUINA DE INDUÇÃO POR SUÇÃO B. MAQUINA DE PRESSÃO DIRETA (PLASTER, 1981)

Conforme destacado em Baiker (1990), via de regra os equipamentos de *shot peening* operam conjuntamente com dispositivos auxiliares e sistemas de automação. Máquinas *CNC de shot peening*, por exemplo, são comumente utilizadas na indústria. No caso de produção em larga escala, essas máquinas possuem vários bocais ou rodas centrífugas e dispõem de dispositivos para selecionar tipos diversos de abrasivo.

3.2 PROCESSOS SIMILARES AO SHOT PEENING

Existem algumas variantes do processo tradicional de *shot peening*, como as que se apresentam a seguir.

O *wet shot peening* (Takemoto, 1984), é um processo em que as granalhas de vidro são arrastadas por um fluxo de água e impelidas contra a peça a ser processada.

No *shot peening* ultrassônico (Duchazeaubeneix, 1999) as granalhas são inseridas em uma câmara fechada e tampada pela própria peça a ser processada. Dentro da câmara, um transdutor piezelétrico emite ondas ultra-sônicas amplificadas por um amplificador acústico , que fazem as granalhas vibrarem e se chocarem contra a peça, induzindo em sua superfície um campo uniforme de tensões residuais.

É possível, também, induzir tensões residuais sem o uso de abrasivos. Mediante a técnica denominada *laser peening* (Lahrman e Gaydos, 2012). aplica-se à superfície da

peça um filme de material cromóforo (absorvedor de luz) e, em seguida, irradia-se a superfície com pulsos de laser intensos, gerando plasma em alta pressão e, por decorrência, uma onda de choque que, propagando-se no interior do material produz uma sub-camada plástica. O material elástico que envolve essa camada plástica gera a tensão residual compressiva na superfície.

3.3 VARIÁVEIS RELEVANTES DO PROCESSO

Embora o processo de *peen forming* venha sendo utilizado pela indústria de longa data, restam ainda muitos desafios a serem superados de forma a garantir a sua replicabilidade e automação. Para que se possa melhor compreender essa questão, é necessário analisar as variáveis que exercem influência nesse processo de conformação.

De acordo com Kyriacou (1996) são três as principais variáveis que permitem caracterizar processos de *peen forming*: 1ª) cobertura, ou seja, porcentagem da área atingida pelos impactos; 2ª) intensidade do jato correlacionada com a energia cinética transferida durante o impacto do jato de granalhas com a peça; 3ª) saturação, variável relacionada ao número de partículas incidentes e ao tempo de exposição ao processo. Para controlar essas variáveis, o mesmo autor apresenta as variáveis controláveis e as classifica em três grupos: 1º) as da granalha, que abrangem tamanho, forma, integridade, densidade, dureza, módulo de elasticidade e limite de escoamento; 2º) os da peça a ser conformada, abrangendo características do material (dureza, limite de escoamento, módulo de elasticidade), dimensões geométricas e condição de contorno e de pré-tensão; 3º) os do jato de granalhas, abrangendo vazão de massa, velocidade média de impacto, ângulo de incidência e distância entre a saída do bocal e a superfície da peça.

3.3.1 COBERTURA E TEMPO DE EXPOSIÇÃO

Segundo Karuppanan et al. (2002), a medida da cobertura permite avaliar a interação entre endentações vizinhas e, por decorrência, a uniformidade das tensões residuais nas camadas superficiais de componentes conformados por *peen forming*. O aumento da cobertura é exponencial, visto que a taxa de incremento decai com o tempo, pois, à medida que a área endentada cresce, menor é a probabilidade de que novas granalhas atinjam locais não atingidos previamente. Na prática, coberturas de 100% não podem ser medidas de forma precisa e nem obtidas com alto grau de certeza após um período definido de tempo. Admite-se, portanto, que ela é completa quando se observa que 98% da área da superfície apresenta endentações (SAE Manual on Shot Peening, 1991 ; Airbus Process specification, 1993).

Para aumentar a produtividade de um processo de *peen forming*, seria desejável expor a peça ao jato pelo menor tempo possível, tempo esse dependente do valor pretendido de cobertura superficial.

Em planejamento de processos de *shot peening* é comum a utilização de um gráfico experimental ‘cobertura versus tempo’. Para construí-lo, expõe-se o espécime ao processo por um período pré-determinado, após o que se estima a cobertura por meio de instrumentação óptica. Esse processo é repetido várias vezes até o instante de saturação, quando se atinge uma cobertura próxima de 100% e o gráfico se completa. Métodos analíticos capazes de gerar este gráfico com apenas um ponto da curva foram desenvolvidos (Kirk, 2009) e são rotineiramente utilizados como alternativa ao método tradicional de anotação de pontos um a um.

Coberturas superiores a 100% correspondem àquelas que se obtêm após exposição da peça ao jato por um período superior ao tempo de saturação; assim, para uma cobertura de 150%, por exemplo, deve-se expor a peça ao jato durante 1,5 vezes o tempo de saturação.

Person (1981) mostra que uma cobertura excessiva (400%) pode reduzir a vida em fadiga da peça em até 20% comparativamente àquela que teria caso recebesse uma cobertura de 100%. Experimentos realizados por Fett (1983) mostraram que uma

cobertura de 200%, aumenta em cerca de 25% a vida em fadiga da peça comparativamente à de um exemplar com 100% de cobertura. É importante notar que no processo de *peen forming* nem sempre se busca chegar ao ponto de saturação, visto que as curvaturas desejadas podem ser muito inferiores às aquelas que se obtêm com 100% de saturação.

3.3.2 INTENSIDADE DO JATO E VELOCIDADE MÉDIA DE IMPACTO

A indução de um campo de tensões residuais na superfície da peça é resultante da transferência de energia cinética das granalhas para o material; logo, dependente da velocidade média de impacto, que é uma das variáveis mais importantes para o planejamento de processos de *peen forming*.

Por causa das dificuldades naturais que se apresentam para medir ou estimar essa variável, de longa data se utiliza o método indireto proposto por Almen(1964), baseado na assim chamada medida Almen. Esse sistema de medição utiliza um instrumental composto por três placas de metal (lâminas Almen) em três diferentes espessuras, alguns dispositivos para fixação das lâminas e um relógio comparador (Almen gauge). Submete-se uma dada lâmina Almen a sucessivas exposições ao jato de *shot peening* e mede-se a sua deflexão máxima ao final de cada ciclo. O processo termina no ponto em que, duplicando-se o tempo de exposição, não se observa incremento da flecha superior a 10%. Quando tal ocorre, estabelece-se que a intensidade do jato (chamada de intensidade Almen) corresponde à medida da deflexão máxima da lâmina.

A despeito de ser largamente utilizado pela indústria, deve-se destacar que o método de determinação da intensidade do jato (uma variável agregada), proposto por Almen, é de difícil adaptação a uma malha de controle. Essa é a razão pela qual deve-se dar preferência à investigação de métodos para estimação de variáveis físicas correspondentes, como é o caso da velocidade média de impacto das granalhas.

Utilizando um modelo numérico baseado no método dos elementos finitos e referente ao impacto de uma esfera sobre uma placa metálica, Meguid et al (1999)

constatarem que o aumento da velocidade de impacto incrementa de forma linear a profundidade da camada comprimida e a tensão residual na superfície do material, sem porém afetar de forma significativa a tensão compressiva máxima na região abaixo desta, possivelmente devido ao endurecimento do material.

Majzoobi e Azizi. (2005) utilizaram modelos de elementos finitos de 9, 13 e 25 esferas a fim de analisar a influência do impacto de múltiplas granalhas na formação do campo de tensões residuais. Esses autores concluíram que a velocidade de impacto altera o perfil de tensões residuais até um particular ponto de saturação, a partir do qual ocorre redução da tensão residual máxima. Resultados esses que coincidem com os obtidos experimentalmente por Torres e Voorwald (2002).

Curtis et al (2003), por sua vez, analisaram a influência da velocidade do impacto não apenas sobre o campo de tensões residuais, mas também sobre a distribuição de rugosidade superficial do material. Ao mesmo tempo em que a velocidade de impacto é responsável por criar a camada plástica que evita a nucleação de micro trincas no material, as endentações formadas pelo impacto acabam por agir como concentradores de tensão. Taro et al (2015) demonstrou, através do uso do ultrasonic shot peening, que o aumento da velocidade de impacto está diretamente relacionado ao aumento da rugosidade superficial do material; logo, ao grau de concentração de tensões. Depreende-se, portanto, que a estimativa da velocidade média de impacto é necessária para que se possa induzir na peça um campo uniforme de máximas tensões residuais compressivas. Naturalmente, a velocidade das granalhas deve exceder um valor mínimo para que a energia cinética transferida ao material produza deformação plástica.

3.3.3 DIÂMETRO MÉDIO DAS GRANALHAS

O diâmetro médio das granalhas, e conseqüentemente, sua massa média, está correlacionado com a intensidade do jato. Além disso, essa variável afeta a geometria das endentações, de modo que, quanto menor o diâmetro da granalha mantendo-se as demais variáveis inalteradas, mais tempo será requerido para se atingir 100% de

cobertura. Conforme demonstrado em Dai et al. (2004), reduzindo-se o diâmetro das granalhas, reduz-se, simultaneamente, o grau de rugosidade superficial.

3.3.4 TENSÕES RESIDUAIS

Conforme enfatizado anteriormente, em *peen forming* as tensões residuais são de natureza compressiva, dando origem a um campo de momentos que produz o encurvamento da peça, ao mesmo tempo em que contribuem para o aumento de sua vida em fadiga.

Ao longo da execução de processos de *peen forming*, podem ser utilizados dois métodos clássicos de medição de tensões residuais – a difratometria de raios-X e o método do furo cego.

A técnica de difração por raios-X (Milburn, 1945) é capaz de medir as tensões residuais compressivas na superfície do material, correlacionando-as com a alteração das distâncias interplanares do material cristalino observáveis nos padrões de difração gerados pela irradiação X em profundidades próximas a 0,35mm. Para tanto, é necessário extrair uma amostra do material e submetê-la a uma irradiação em um difratômetro de raios X. O elevado custo desse equipamento bem como a restrição apresentada pelo método quanto à profundidade mensurável do campo de tensões residuais, torna-o de difícil aplicação em um ambiente industrial de produção.

O método do furo cego, ao contrário, possui características que o tornam muito adequado ao uso industrial, pois apresenta alto grau de confiabilidade, causa um dano muito limitado à peça, é de fácil aplicação e pode ser executado em tempo relativamente curto. Proposto por Mathar (1934), esse método identifica as tensões residuais em uma dada profundidade da peça, a partir das variações observadas do campo de tensões antes e após a execução de um pequeno furo na posição de interesse. A eliminação de tensões na superfície do furo muda aquelas que circundam a região, fazendo com que as deformações locais em seu entorno também se alterem. O furo, em geral, deve ter uma profundidade próxima de seu diâmetro e deve ser pequeno em relação à espessura do

material. O registro do alívio de tensões causado pelo furo é feito por meio de três extensômetros colocados à volta da furação (Fig. 5). A fim de reduzir efeitos de não-homogeneidade do material, o primeiro e o terceiro formam um ângulo de 90 graus entre si, enquanto o segundo é posicionado a 225 graus do primeiro. Utilizando tal arranjo, o furo é gradualmente aprofundado e, a cada nova etapa, coletam-se as medidas dos extensômetros e determina-se a tensão residual na profundidade correspondente, conforme apresentado em Vishay measurements Group (2002).

FIGURA 5 EXTENSOMEROS NO ARRANJO DE ROSETTA PARA DETERMINAR TENSÕES RESIDUAIS (VISHAY MEASUREMENTS GROUP (2002))

3.4 O CAMINHO PARA A AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE PEEN FORMING

À medida que ocorrem avanços nas técnicas de simulação computacional e na tecnologia de sensores, a intensidade Almen e saturação (Almen, 1964) que, a despeito de suas limitações (Fuchs, 1984), eram amplamente utilizadas no passado, vêm sendo substituídas por variáveis físicas que melhor caracterizam a fenomenologia do processo de *peen forming*. A propósito, Bandini (2012), após realizar um projeto de

experimentos, constatou existir grande dispersão nos valores medidos de intensidade Almen. Tais evidências mostram que a utilização dessas medidas em processos automáticos de *peen forming* não é adequada. Ao contrário, a medição das variáveis independentes que dão origem à medida Almen, a saber, velocidade de impacto e tensão residual, podem atualmente ser estimadas com razoável precisão, graças à evolução da tecnologia de sensores e ao desenvolvimento de novos modelos representativos dos fenômenos investigados - sejam analíticos sejam numérico-computacionais.

Barker(2005) descreve um dispositivo denominado *Shotmeter*, que utiliza um par de sensores eletro-ópticos espaçados entre si de uma distância bem determinada para medir com precisão de 1% a velocidade média das granalhas na saída do bocal. Könitzer e Polanetzki (2011) apresentam um sistema de medição de velocidade similar, denominado ISIC 2. Este produz uma barreira óptica a partir de um *laser* de diodo conectado a dois cabos de fibra ótica. Um ponto de luz contínuo é projetado nas pontas dos cabos de fibra ótica e é transmitido a duas células fotoelétricas numa placa de medição. Comparação entre as medidas deste dispositivo e as do *Shotmeter* apresentaram desvios máximos da ordem de 2m/s.

Destacando a importância dos métodos de sensoriamento de variáveis essenciais, Wüstefeld (2002) propõe que a automatização do processo de *peen forming* elimine o uso de variáveis agregadas, como é o caso da intensidade Almen. Para tanto, apresenta um ambiente *CNC* de conformação por *peen forming* em que as operações se baseiam em medidas em tempo real ou estimações da vazão mássica, da cobertura e da velocidade média das granalhas imediatamente após a saída do bocal.

Para se utilizar as variáveis essenciais do processo de *peen forming* em um sistema de controle, é necessário, no entanto, elaborar modelos matemáticos que descrevam apropriadamente os dois fenômenos fundamentais que dão origem à conformação da peça – transferência de energia cinética do jato de granalhas para a placa e formação do campo de tensões residuais.

Hrybet et al. (2009) comparam dois modelos de transporte de partículas. O primeiro deles utiliza uma formulação euleriana pura para descrever tanto o movimento das partículas quanto o do fluido; o segundo utiliza os pontos de vista euleriano e lagrangeano para descrever, respectivamente, o escoamento do fluido e o movimento

das partículas. Nas formulações eulerianas, as equações que descrevem a turbulência utilizam um modelo de passeio aleatório para estimar o campo de velocidades do fluido e as velocidades das partículas a cada passo da simulação numérica. Ambas as abordagens foram validadas por experimentos, mas a lagrangeana mostrou-se mais indicada para representar a dinâmica das partículas, facilitando a identificação de movimentos transientes e de colisões.

Outro modelo para simular escoamentos foi desenvolvido por Xu et al. (2012), que aperfeiçoou o modelo analítico de Lee et al. (1998) e o estendeu ao caso geral da família dos jatos gaussianos ortogonalmente incidentes em superfícies planas. Neste artigo, são obtidas equações analíticas que descrevem um fluxo axialmente simétrico e permanente utilizando aproximações das funções potencial e de corrente baseadas em polinômios de Laguerre.

Mylonas e Labeas (2011) desenvolveram um modelo para o escoamento bifásico de granalhas em jato de *shot peening*, o qual utiliza métodos estocásticos para descrever a interação entre as partículas. Utilizando uma versão 2D do modelo e variando os diversos parâmetros do processo, os autores realizaram cerca de 200 experimentos voltados à estimação das velocidades e dos ângulos de impacto, bem como dos instantes de ocorrência das colisões contra a peça a ser conformada. Posteriormente, utilizaram uma versão 3D do modelo para estimar o perfil de tensões residuais oriundo das colisões.

No que diz respeito à modelagem analítica do campo de tensões residuais, Flavenot e Nikulari (1977) desenvolveram o conceito de *tensão-fonte* induzida no material pelo processo de *shot peening*. Exposto aos choques sucessivos das granalhas, o material sujeito a uma restrição exerce uma força axial e um momento fletor na peça, que a impede de alongar e defletir-se; uma vez removida a restrição, o material fica livre para alongar e dobrar-se; assim, tensões axial e fletoras são induzidas na peça. A *tensão-fonte* não é equilibrada, mas considerada como uma tensão residual que se desenvolve em uma superfície semi-infinita, tal como uma placa espessa governada pelas leis da elasticidade. Utilizando o princípio de superposição, a *tensão-fonte* é somada às tensões axial e fletora para que haja equilíbrio. O autor considera que a *tensão-fonte* é de origem elástica, portanto válida apenas na região de deformação elástica. Segundo os autores, medidas experimentais em material espesso indicaram que a equação de distribuição

espacial da *tensão-fonte* tem a forma de uma função cosseno. Adicionando-se esta função cosseno às funções representativas da tensão axial e tensão fletora, e utilizando as definições integrais de momento e força, pode-se, finalmente, estimar a tensão residual causada pelo processo de *shot peening*. É importante destacar que este modelo ,necessita de informação *a priori* dos valores do raio de curvatura do material em sua condição de saturação e da posição em que ocorre a tensão residual máxima.

Al-Hassani(1981) e Al-Obaid (1995) propõem o modelo de cavidade esférica a fim de contestar a hipótese de que secções planas se mantêm planas durante o ciclo de carregamento. Esses autores admitem que: 1º) a tensão abaixo da endentação pode ser interpretada como aquela que se desenvolve em uma cavidade esférica exposta a deformação elasto-plástica; 2º) os esforços em cada endentação são independentes. Aplicando uma transformação conveniente de coordenadas, obtêm um campo de tensões residuais similar ao de uma casca esférica(Fig. 6).

FIGURA 6 A. MODELO DA CASCA ESFÉRICA B.PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS

A fim de estudar as características da região afetada pelo impacto de uma granalha, Lida(1984) realizou experimentos que comparam a geometria de uma endentação gerada por ação de uma pressão estática a aquela resultante de uma sollicitação dinâmica. Ao constatar que o comportamento do material é similar, nos dois casos, o autor apresenta equações empíricas para estimar uma pressão que seja equivalente ao efeito do impacto de uma esfera de diâmetro e velocidade de impacto pré-especificados, a menos de uma constante inerente ao material.

Os modelos numéricos de *peen forming* mais freqüentemente encontrados na literatura aplicam o método dos elementos finitos para descrever o campo de tensões residuais decorrente dos impactos das granalhas contra a peça. No modelo

desenvolvido por Zeng(2002), utilizando a ferramenta ANSYS, as deformações são representadas por meio de cargas térmicas equivalentes. Majzoobi e Azizi (2005), por sua vez, utilizam o programa LS-DYNA para estimar o campo de tensões residuais no entorno de uma pequena região sujeita a múltiplos impactos. Manoucherifar e Rezvani (2011) fazem uma descrição simplificada de modelos de elementos finitos 3D dinâmicos e estáticos com os mesmos fins supracitados, mas desta vez utilizando o software ABAQUS.

3.OBJETIVOS

Este trabalho pretende contribuir com o desenvolvimento de uma abordagem que facilite o planejamento de processos de *peen forming*. Para tanto, apresenta um modelo simplificado da dinâmica de um jato de *peen forming*, que possibilita estimar a distribuição de velocidades médias de impacto das granalhas contra uma superfície metálica plana, bem como a cobertura e o tempo de saturação. Mediante a incorporação de modelos analíticos de tensão residual, as informações geradas pela simulação do jato de granalhas permitem estimar o campo de tensões residuais induzidas na placa e, por decorrência, o raio de curvatura causado pelo processo de *peen forming*.

Para atender ao objetivo global apresentado no parágrafo anterior, este trabalho perseguiu o cumprimento de 4 metas principais, a saber:

- 1) Desenvolver um programa computacional que simule a dinâmica de múltiplos impactos observada em um jato de granalhas esferoidais aplicado a uma placa plana metálica deformável, conforme se usa em processos de *peen forming*.
- 2) Utilizar esse programa para avaliar a distribuição espacial das magnitudes das velocidades das granalhas expelidas por um equipamento típico de *peen forming*, desde a saída do bocal até as proximidades da placa objeto da conformação.
- 3) Incorporar um modelo analítico para estimar o campo de tensões residuais induzidas pelo processo de *peen forming*, e o raio de curvatura da placa sujeita à conformação.
- 4) Avaliar a interação entre os parâmetros e variáveis relevantes do processo, propiciando, assim, os meios para se realizar ações de planejamento de processos de *peen forming* que não se baseiem em métodos puramente empíricos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de atingir os objetivos deste trabalho, estabeleceram-se as seguintes etapas para a construção de um modelo computacional capaz de simular a dinâmica do processo de *peen forming*

- 1) Definição de hipóteses iniciais a fim de tornar o equacionamento factível e ao mesmo tempo simplificar os cálculos.
- 2) Modelagem matemática da dinâmica de um sistema de granalhas impelidas contra a peça a ser conformada e do campo de tensões residuais resultante.
- 3) Modelagem computacional.
- 4) Planejamento de experimentos que permitam investigar a influência relativa dos parâmetros e variáveis do processo de *peen forming* a partir de dados gerados por diferentes simulações do modelo computacional.

As etapas acima referidas são descritas de forma mais minuciosa nas próximas sessões.

4.1. HIPÓTESES INICIAIS

Antes de se definir quais equações serão eleitas para descrever a dinâmica do jato de *peen forming*, é essencial que se apresentem as hipóteses utilizadas em sua modelagem.

Neste trabalho, portanto, admitiram-se as seguintes hipóteses:

1^a) É desprezível o efeito da dinâmica das partículas sobre o campo de velocidades do jato de ar.

2^a) É desprezado o efeito do atrito durante os eventos de choque, seja entre partículas, seja entre partículas e a peça. Tal hipótese se faz não porque o fenômeno de atrito seja pouco

relevante, mas porque, se tal efeito viesse a ser considerado, a complexidade do modelo aumentaria substancialmente, de vez que seria necessário lidar com um extenso grupo de instruções voltadas à análise das inequações associadas aos eventos de choque com atrito (Routh, 1960). Ademais, no que diz respeito a colisões com o objeto a ser conformado, diversos autores como, por exemplo, Chaise et al. (2015) também se baseiam na hipótese de não haver atrito nos eventos de choque.

3ª) Durante as colisões entre granalhas o choque é perfeitamente elástico.

4ª) Durante as colisões entre granalhas e a peça a ser conformada, o choque é parcialmente anelástico.

5ª) As velocidades das esferas na sessão de saída do bocal coincidem com a do fluido nas respectivas posições, a menos de pequenas perturbações que são descritas por uma distribuição normal que afeta tanto a intensidade quanto a direção dos respectivos vetores.

6ª) É desprezível a probabilidade de ocorrência de eventos em que três ou mais esferas colidam umas com as outras no mesmo instante.

7ª) O movimento das granalhas se realiza em um único plano e, por decorrência, o jato de granalhas é axi-simétrico.

8ª) As granalhas são impelidas por um jato de ar turbulento gaussiano normalmente incidente sobre uma placa plana.

4.2. MODELO MATEMÁTICO

O equacionamento do modelo será realizado obedecendo-se a todas as hipóteses apresentadas na sessão anterior e de acordo com o esquema gráfico da Fig.7.

FIGURA 7 ESQUEMATIZAÇÃO DO PROBLEMA

Nessa figura, D^* é o diâmetro do bocal, H^* é a distância entre a seção de saída do bocal e o plano da placa.

Existem dois grupos de equações que descrevem a dinâmica do sistema de partículas: as equações do Teorema do Movimento do Baricentro, utilizadas na descrição do movimento de cada granelha quando sujeita à ação das forças externas, e as equações da Teoria de Choque e Percussões, utilizadas para determinar os estados cinemáticos das granelhas imediatamente após a ocorrência de eventos de choque.

A equação que descreve o movimento de cada granelha é obtida a partir do Teorema do Movimento do Baricentro, ou seja:

$$\vec{F}^p = m^p \frac{d}{dt} \vec{v}^p$$

em que m^p e $\vec{v}^p$ são, respectivamente, a massa e a velocidade do baricentro da granelha de índice p , e $\vec{F}^p$ é a resultante das forças externas que atuam nessa granelha.

Considerando-se que, além da força peso, sobre cada partícula atuam forças externas oriundas da interação destas com um meio fluido incompressível e em regime permanente, a equação anterior adquire a forma da equação de Basset-Boussinesq-Oseen (Maxey e Riley, 1983; Coimbra e Rangel, 1998), ou seja:

$$\rho^p \frac{d\mathbf{v}^p}{dt} = \rho^f \frac{d\mathbf{v}^f}{dt} + (\rho^p - \rho^f) \mathbf{g} + \frac{3}{4} \frac{\rho^f}{D^p} C_D (\mathbf{v}^f - \mathbf{v}^p) |\mathbf{v}^f - \mathbf{v}^p| - \frac{\rho^f}{2} \frac{d(\mathbf{v}^p - \mathbf{v}^f)}{dt} \quad (1)$$

em que:

ρ^p e ρ^f são as densidades da partícula e do fluido, respectivamente;

$\mathbf{v}^p$ e $\mathbf{v}^f$ são as velocidades da partícula e do fluido, respectivamente;

$\mathbf{g}$ é a aceleração gravitacional

D^p é o diâmetro da partícula

C_d é o coeficiente de arrasto

O lado direito da equação acima corresponde, termo a termo, a:

- *Força de inércia:* Este termo depende da variação temporal da velocidade do fluido. Da hipótese de regime permanente, pode-se excluí-lo.
- *Diferença entre o peso da partícula e o empuxo do ar.*
- *Força de arrasto:* É caracterizada pelo coeficiente C_d e pela velocidade relativa da partícula.
- *Força de massa adicionada:* Esta força leva em conta o fato de que o fluido em torno da partícula também está sendo acelerado. Como o escoamento é em regime permanente, $d\mathbf{v}^f/dt$, também, pela hipótese supracitada, será excluído.

O coeficiente de arrasto é determinado através de uma relação empírica que é função apenas do número de Reynolds que, segundo Perry e Green(1973), é determinado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} C_d &= 24 \cdot (1/\text{Re}^p) & \text{Re}^p < 0,1 \\ C_d &= 24 \cdot (1/\text{Re}^p) \cdot (1 + 0,14 \text{Re}^{0,7p}) & 0,1 < \text{Re}^p < 1000 \\ C_d &= 0,445 & 1000 < \text{Re}^p < 35000 \end{aligned} \quad (2)$$

sendo Re^p o valor do número de Reynolds da partícula.

Feitas as hipóteses simplificadoras, chega-se à seguinte equação:

$$\rho^p \left(\frac{dv^p}{dt} \right) = (\rho^p - \rho^f)g + \frac{3}{4} \frac{\rho^f}{D^p} C_d (v^f - v^p) |v^f - v^p| - \frac{\rho^f}{2} \frac{dv^p}{dt} \quad (3)$$

Visando explicitar o termo de aceleração e simplificar a equação, adotar-se-á o adimensional $\rho^* = \frac{\rho^f}{\rho^p}$. Dessa forma, resulta:

$$\frac{dv^p}{dt} = \frac{2}{2 + \rho^*} \left[(1 - \rho^*)g + \frac{3}{4} \frac{\rho^*}{D^p} D_d (v^f - v^p) |v^f - v^p| \right] \quad (4)$$

Pode-se notar que se o escoamento do jato de ar for conhecido *a priori*, a integração numérica da equação para cada granalha permitirá estimar, ao longo do tempo, sua velocidade e sua posição.

Conforme mencionado anteriormente, neste trabalho o campo de velocidade do jato de ar será representado por um modelo analítico de jato gaussiano incidente normalmente a uma placa plana, conforme apresentado em Xu et al. (2012). De acordo com esses autores, a função de corrente e os componentes radiais e axiais da velocidade são dados, respectivamente, por:

$$\psi = -\frac{k}{2} \left(1 - e^{-r^2/k} \right) + r^2 e^{-r^2/k} \sum_{n=1}^{\infty} c_n L_n^1 \left(\frac{2r^2}{k} \right) e^{-(\sqrt{8n/k})z} \quad (5)$$

$$u(r, z) = r e^{-r^2/k} \sum_{n=1}^{\infty} c_n L_n^1 \left(\frac{2r^2}{k} \right) \left(\sqrt{8n/k} \right) e^{-(\sqrt{8n/k})z} \quad (6)$$

$$w(r, z) = r e^{-r^2/k} + 2 \left(1 - \frac{r^2}{k} \right) e^{-r^2/k} \sum_{n=1}^{\infty} c_n L_n^1 \left(\frac{2r^2}{k} \right) e^{-(\sqrt{8n/k})z} + r e^{-r^2/k} \sum_{n=2}^{\infty} c_n e^{-(\sqrt{8n/k})z} \frac{\partial L_n^1 (2r^2/k)}{\partial r} \quad (7)$$

em que

$$r = r^* / R^* \\ z = z^* / H^*$$

Nas equações acima, r e z são coordenadas adimensionais do fluxo, r^* e z^* são as posições num dado instante de tempo, R^* é o raio do bocal e H^* é a distancia entre a seção de saída do bocal e a placa a ser conformada. L_n^1 e $\frac{\partial L_n^1}{\partial r}$ são, respectivamente, os polinômios de Laguerre e suas derivadas parciais radiais. Ambos podem ser aproximados por fórmulas recursivas encontradas no mesmo artigo (Xu et al., 2012).

As equações 6 e 7 podem ser representadas graficamente por meio de linhas de corrente do escoamento. Para valores de referencia $D^* = 120\text{mm}$, $R^* = 4,75$, essas linhas são apresentadas na figura 8:

FIGURA 8 LINHAS DE CORRENTE

Determinados os valores de v^f para quaisquer pontos do escoamento, pode-se então realizar a integração numérica da equação 4 e, assim, obter estimativas de $\vec{v}^p(t + dt)$ e $(x^p(t + dt), y^p(t + dt))$. Neste trabalho, as integrações foram realizadas utilizando-se o método de Euler (Press et al. 2007).

À medida que se estimam as trajetórias das esferas, faz-se a verificação de eventuais episódios de colisão. Para tanto, calcula-se, a cada instante, a distância entre os centros de todos os pares de esferas presentes no jato; caso existam pares de esferas tais que a distância entre seus centros seja inferior à soma de seus raios, admite-se que essas esferas colidam nesse instante. É importante lembrar que foi descartada a possibilidade de haver colisões entre mais de duas esferas num dado instante de tempo.

Admite-se que as colisões entre duas esferas são perfeitamente elásticas, ou seja, que há conservação de energia cinética e de quantidade de movimento. Satisfeita tal condição,, as velocidades das esferas, imediatamente após o choque, são dadas por:

$$\begin{aligned}\vec{v}_{i2} &= \left(\frac{m_i - m_j}{m_j + m_i} \right) \vec{v}_{i1} + \left(\frac{2m_j}{m_i + m_j} \right) \vec{v}_{j1} \\ \vec{v}_{j2} &= \left(\frac{m_j - m_i}{m_j + m_i} \right) \vec{v}_{j1} + \left(\frac{2m_i}{m_i + m_j} \right) \vec{v}_{i1}\end{aligned}\quad (8)$$

em que os índices i e j denotam cada uma das duas esferas em colisão e os índices 1 e 2 fazem referência aos estados anterior e posterior à colisão.

Quando uma gralha colide com a placa, parte de sua energia cinética é transferida e, por decorrência, sua velocidade de retorno sofre redução. Como se admite desprezível o efeito do atrito, o sentido da componente vertical de sua velocidade é invertido e o seu módulo reduzido por um coeficiente de restituição dependente das características do material da gralha e da placa, de modo que

$$v_y^p = -v_y^p * C_r \quad 0 < C_r < 1 \quad (9)$$

em que C_r é o coeficiente de restituição.

Após a colisão com a placa, é necessário estimar, a partir da média das velocidades das gralhas incidentes, o perfil de tensões residuais. O modelo de cavidade esférica apresentado por Al-Obaid(1995) supõe que o campo de tensões residuais abaixo de cada endentação possa ser medido como uma soma de campos elásticos e plásticos resultantes da pressurização de uma cavidade esférica.

Admitindo-se condições quase estáticas, a tensão circunferencial σ_θ em uma esfera espessa de raio externo b e raio da cavidade R , com uma pressão tal que resulte em uma zona plástica radial que se estenda até $r = C$ é dada por:

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_\theta}{Y} &= 1 - 2 \ln \left(\frac{C}{r} \right) - \frac{2}{3} \left(1 - \frac{C^3}{b^3} \right), R \leq r \leq C \\ \frac{\sigma_\theta}{Y} &= \frac{2}{3} \frac{C}{b^3} \left(\frac{b^3}{2r^3} + 1 \right), C \leq r \leq b\end{aligned}\quad (10)$$

Através de uma mudança de variáveis, pode-se ajustar o problema esférico ao da placa. Considerando-se então que

$$b-R = h,$$

$$r-R = z, C-R=h_p \text{ e}$$

$$\sigma_\theta = \sigma(z),$$

a equação que determina o valor da tensão residual em uma cota qualquer z de uma placa de espessura h e profundidade da camada plástica h_p é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma(z)}{Y} &= 1 - 2 \ln \left(\frac{h_p + R}{z + R} \right) - 2 \left[1 - \left(\frac{h_p + R}{h + R} \right)^3 \right], 0 \leq z \leq h_p \\ \frac{\sigma(z)}{Y} &= \frac{2}{3} \left(\frac{h_p + R}{h + R} \right)^3 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{h + R}{z + R} \right)^3 + 1 \right], h_p \leq z \leq h \end{aligned} \quad (11)$$

em que h_p é determinado como função da pressão média na peça na condição de plasticidade total $\bar{p}$, (igual ao triplo do valor da tensão de escoamento (Shaw et Salvo, 1970)), da velocidade de impacto V_0 da granalha e de sua densidade ρ

$$h_p = 2,7108 \left(\frac{\rho V_0}{\bar{p}} \right)^{0.25} \quad (12)$$

Este modelo apresenta duas limitações: a tensão máxima ocorre sempre na superfície do material, e existe um salto no comportamento da curva quando se atinge o ponto em que termina a camada plástica. Realizada a simulação deste modelo, utilizando-se os dados do experimento descrito em Dalla Pacce et al. (2013), obteve-se o seguinte gráfico:

FIGURA 9 PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS SEGUNDO O MODELO ESFÉRICO

É possível notar que o valor da tensão máxima é muito próximo dos dados experimentais (-748MPa, na simulação realizada), porém a curva apresenta uma descontinuidade muito acentuada.

Por outro lado, sabe-se que o modelo de Flavenot e Nikulari (1977) depende de dois dados experimentais, a saber: 1º) altura de arco; 2º) α , fração da região deformada plasticamente onde se encontra a deformação máxima ϵ_m , associada a uma tensão máxima (σ_m), isto é, $\sigma_z(\alpha h_p) = \sigma_m$. Pode-se porém, eliminar o valor deste último parâmetro, admitindo-se que a tensão se encontra na superfície como hipótese simplificadora. Com isso, resta apenas como incógnita o valor da altura do arco, que é utilizado no equacionamento para determinar a deformação máxima do material. As equações utilizadas neste modelo são:

$$\sigma_R(z) = \frac{E\epsilon_m}{1-\nu} \left\{ \frac{12\lambda}{\pi h} (1-\alpha) \left(\frac{h}{2} - z \right) C_1 + \frac{2\lambda}{\pi} (1-\alpha) C_2 - \frac{\epsilon(z)}{\epsilon_m} \right\} \quad (13.a)$$

$$\lambda = \frac{h_p}{h} \quad (13.b)$$

$$C_1 = C_2 - 2\lambda + \frac{4\lambda}{\pi} (1-\alpha) \cos\left(\frac{\pi\alpha}{2(1-\alpha)}\right) \quad (13.c)$$

$$C_2 = 1 + \sin\left(\frac{\pi\alpha}{2(1-\alpha)}\right) \quad (13.d)$$

Aplicando-se a hipótese $\alpha = 0$, tem-se:

$$\sigma_R(z) = \frac{E\epsilon_m}{1-\nu} \left\{ \frac{12\lambda}{\pi h} (1) \left(\frac{h}{2} - z \right) C_1 + \frac{2\lambda}{\pi} (1) C_2 - \frac{\epsilon(z)}{\epsilon_m} \right\}$$

$$C_1 = C_2 - 2\lambda + \frac{4\lambda}{\pi} (1) \cos(0)$$

$$C_2 = 1 + \sin(0)$$

Então resulta:

$$\sigma_R(z) = \frac{E\epsilon_m}{1-\nu} \left\{ \frac{12\lambda}{\pi h} \left(\frac{h}{2} - z \right) C_1 + \frac{2\lambda}{\pi} - \frac{\epsilon(z)}{\epsilon_m} \right\}$$

$$C_1 = 1 - 2\lambda + \frac{4\lambda}{\pi}$$

$$C_2 = 1$$

Para encontrar o valor de ϵ_m , pode-se supor que se conheça, *a priori*, o valor da tensão máxima. Sabendo-se que esta tensão se encontra em $z=0$ se $\alpha = 0$, pode-se escrever a eq. 13.a da seguinte forma:

$$\sigma_R(0) = \sigma_m = \frac{E\epsilon_m}{1-\nu} \left\{ \frac{12\lambda}{\pi h} \left(\frac{h}{2} \right) C_1 + \frac{2\lambda}{\pi} - \frac{\epsilon_m}{\epsilon_m} \right\}$$

Efetuando-se as simplificações chega-se a:

$$\sigma_m = \frac{E\epsilon_m}{1-\nu} \left\{ \frac{2\lambda}{\pi} (3C_1 + 1) - 1 \right\}$$

Explicitando-se o termo ϵ_m obtém-se:

$$\epsilon_m = \frac{(1-\nu)}{E} \sigma_m \left\{ \frac{2\lambda}{\pi} (3C_1 + 1) - 1 \right\}^{-1} \quad (14)$$

Para determinar o valor de σ_m , pode-se utilizar o modelo de Al-Obaid, que, como visto, encontra-o com bastante precisão.

Assim, pode-se simular este modelo para o mesmo caso (Fig. 10):

FIGURA 10 PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS SEGUNDO O MODELO DE FLAVENOT

Flavenot e Nikulari (1977), porém, criaram o modelo levando em conta apenas a deformação elástica do material. Sua equação é, portanto, válida apenas na porção do material limitada ao valor de profundidade h_p . Por outro lado, o modelo de Al-Obaid aborda o problema de forma elasto-plástica.

As considerações anteriores conduziram à formulação de um modelo misto, em que se utilizou o modelo de Flavenot para $z \leq h_p$ e o modelo de Al-Obaid para valores superiores de z . Adotando-se tal abordagem, obtém-se o seguinte gráfico(Fig. 11):

FIGURA 11 PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS COMBINANDO-SE OS DOIS MODELOS

Ao comparar-se esta curva com a primeira, é possível notar a drástica redução na descontinuidade.

A fim de realçar ainda mais a vantagem de se combinar os dois modelos, apresenta-se, no gráfico a seguir, a sobreposição das duas curvas(Fig. 12):

FIGURA 12 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS ESFÉRICO E COMBINADO

Concluída a estimação do perfil de tensões residuais, pode-se, finalmente, estimar a altura do arco e o raio de curvatura da peça, funções do momento fletor, dado por:

$$M = \int_0^k \sigma_s \left(\frac{h}{2} - z \right) b \, dz \quad (15)$$

em que

$$\sigma_s = \cos \left(\frac{\pi z}{2h_p} \right) \quad (15.a)$$

é o valor da tensão-fonte induzida pelo *shot peening*.

Para se determinar o momento, integra-se a equação desde a superfície até a profundidade da camada plástica, isto é, de $z=0$ até $z=h_p$.

Supondo um momento uniforme aplicado ao material, sabe-se que o raio de curvatura será

$$\delta = \frac{EI}{M} \quad (16)$$

4.3. MODELO COMPUTACIONAL

O passo seguinte à elaboração do modelo matemático consistiu em sua implementação computacional.

Neste trabalho, adotou-se a plataforma MatLab™ para a construção de um programa voltado à simulação do movimento de um sistema de pequenas esferas metálicas impelidas por um jato de ar turbulento e gaussiano contra a superfície plana de uma placa metálica.

A estrutura geral desse programa é apresentada no diagrama de blocos da Fig.13.

FIGURA 13 DIAGRAMA DE BLOCOS

Nesta figura, o índice 0 se refere a valores associados a uma gralha que acaba de ser introduzida no sistema, i e j se referem a duas gralhas diferentes em colisão uma com a outra, J indica o instante atual do sistema, I a quantidade de passos que devem ser executados antes de que uma nova esfera seja expelida pelo bocal.

As variáveis que devem ser introduzidas no primeiro bloco são as características do sistema: velocidade média das esferas na saída do bocal, diâmetro médio e respectivo desvio padrão das esferas, diâmetro do bocal, distância bocal-placa, densidade do fluido, densidade das esferas, material da placa e quaisquer outros parâmetros de interesse.

Após a entrada das variáveis, um modulo é chamado para determinar o campo de velocidades do fluido, visto que este é permanente e não será alterado com o decurso do tempo.

No bloco posterior, são calculadas as velocidades e posições iniciais das esferas. O diâmetro das esferas é sorteado e então a massa de cada esfera é imediatamente calculada e armazenada. Posições das partículas são arbitradas respeitando-se as limitações geométricas do problema - neste caso, o valor do diâmetro do bocal - e de forma a evitar sobreposição entre pares que estejam sendo expelidos. Suas velocidades são calculadas com uma pequena variação da velocidade média em módulo. A princípio, as esferas são orientadas em direção perpendicular à placa, com pequenas variações: posições distantes do eixo de simetria caracterizam-se por terem uma dispersão maior no cálculo da direção de suas velocidades, com pequenos desvios no ângulo de saída do bocal.

No primeiro bloco, após o cálculo das posições iniciais, são calculadas as novas posições e velocidades das esferas, para o quê se faz uso da integração numérica das equações de movimento. O algoritmo compara então a posição de todos os pares de esferas para verificar se a condição de choque é satisfeita. Em caso positivo, calculam-se as novas velocidades, removem-se as duas da lista de esferas a serem analisadas nesse passo e prossegue-se com a análise de outros pares de esferas. Posteriormente, realiza-se uma conferência da posição das esferas em relação à placa. Caso alguma delas se encontre em condição que caracteriza o choque, sua velocidade é invertida e multiplicada pelo coeficiente de restituição. Isso feito, identificam-se quais esferas pertencem ao cone de interesse e eliminam-se as que forem externas a ele. Os dados dessas esferas ainda serão preservados, mas suas trajetórias serão desprezadas nas próximas iterações.

Por fim, o algoritmo avança para o próximo instante ($t+dt$), fazendo $J=J+1$. Se J for igual a um numero pré-definido de passos P , geram-se os gráficos e armazenam-se os dados oriundos da simulação. Em caso contrário, introduzem-se mais n esferas na saída do

bocal e ativa-se o quarto bloco, responsável pela determinação das posições e velocidades iniciais das esferas.

Esse processo pode ser utilizado também para determinar o tempo de exposição mínimo necessário para se atingir 98% de cobertura. Ao invés de se definir o tempo total da simulação, utiliza-se um tempo suficientemente pequeno, responsável apenas por dar a partida ao sistema. Ao se completar o ciclo de poucas iterações, o algoritmo confere o valor da cobertura. Se for inferior a 98%, a simulação é retomada por mais um período pequeno de tempo. Esse processo é repetido até que se atinja a cobertura de 98%. O tempo total final será o tempo de saturação de cobertura.

Este diagrama de blocos descreve apenas a simulação do modelo. Conforme surge a necessidade de se analisar eventos específicos, novas funções são adicionadas ao sistema.

A estimação da cobertura do processo, por exemplo, requer um bloco de comandos voltados à execução das seguintes tarefas: identificação da ocorrência de colisão com a placa, armazenamento da posição da esfera colidente, estimação do diâmetro da endentação causada pela colisão e armazenamento desse dado em um vetor. Ao final da simulação, utiliza-se um outro módulo para ordenar e fazer a interação entre as endentações que se sobrepõem, o que possibilita a estimação da porcentagem da área alvejada pelas colisões.

Outro exemplo de função utilizada pelo sistema é a função responsável pelo registro da velocidade e da posição das esferas quando estas colidem com a placa. Utilizando-a, pode-se determinar a velocidade média das esferas incidentes na placa e suas posições. Essas informações são de fundamental importância para a estimativa do campo de tensões residuais e do raio de curvatura da placa.

Dessa forma, um segundo módulo pode realizar a tão desejada missão de planejamento do processo de *peen forming*. De posse de um valor de raio de curvatura de projeto, esse módulo determina, através de um processo iterativo, e usando as equações do modelo analítico de estimação do campo de tensões residuais, o valor da velocidade média de incidência das granalhas que irá gerar o resultado pretendido. Tal informação poderá alimentar o primeiro módulo também de forma iterativa até que se obtenham as

condições iniciais que irão produzir a velocidade média na placa necessária para gerar a curvatura desejada.

O programa também possui alguns módulos auxiliares dedicados à: 1º) geração de análises gráficas baseadas nas trajetórias das esferas; 2º) estimativa das distribuições da energia cinética transferida à placa; 3º) estimativa dos eventos de colisão com a placa e entre as próprias esferas; 4º) geração de animações da dinâmica das esferas; 5º) geração de gráficos capazes de determinar a relação entre variáveis de interesse e parâmetros de interesse.

Os códigos utilizados para simular a dinâmica das granalhas, para simular o comportamento do fluido, a dinâmica das partículas, estimar o raio de curvatura e o perfil de tensões são apresentados nos apêndices 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

4.4. PLANEJAMENTO E REALIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS

O planejamento de processos de *peen forming* capazes de produzir curvaturas locais desejadas, seja em uma placa seja em um painel, requer a correta definição dos valores das variáveis que influenciam a formação do campo local de tensões residuais.

Conforme já mencionado em capítulos anteriores, essas variáveis divididas em ‘variáveis de entrada’ e ‘variáveis de saída’, podem ser classificadas em quatro grupos:

- 1) da granalha: propriedades do material que a constitui (dureza, densidade etc.), diâmetro médio.
- 2) do jato de ar+granalhas: diâmetro do bocal, distância entre a seção de saída do bocal e o plano da placa, vazão mássica de material particulado na saída do bocal, tempo de aplicação, ângulo entre o eixo de simetria do bocal e o plano da placa.
- 3) da peça a ser conformada: dimensões geométricas e propriedades do material que a constitui (módulo de elasticidade, dureza etc.).

4) da interação granalha-granalha e granalha-placa: coeficientes de restituição associados aos eventos de choque ($C_r=1$, para choques granalha-granalha, conforme indicado na seção 4.1 e $C_r<1$, para choques ‘granalha-placa’).

Para reduzir o tamanho do conjunto de experimentos requeridos para identificar a influência relativa dos parâmetros de entrada no em processos de *peen forming*, admitiu-se que:

- o material das granalhas seja previamente definido;
- o material da placa seja previamente definido;
- a vazão mássica de granalhas seja mantida constante, em um valor compatível com a máxima capacidade de descarga de material particulado pelo bocal, para uma dada vazão de ar;
- o eixo de simetria do bocal se mantenha normal ao plano da placa.

Feitas as considerações anteriores, chega-se a um conjunto de 5 parâmetros de entrada: diâmetro médio das granalhas, diâmetro do bocal, distância entre a seção de saída do bocal e o plano da placa, velocidade média do ar na saída do bocal e tempo de aplicação do jato de granalhas.

Com relação aos parâmetros de saída, o mais relevante para o planejamento de projeto é a cobertura, dada a importância de se atingir o valor de aproximadamente 100%.

Estando definidos os parâmetros relevantes do processo, - doravante denominados ‘fatores’, pode-se aplicar técnicas de projeto de experimentos (Montgomery,1984) para investigar a influência relativa dos parâmetros de entrada sobre os de saída.

Dentre os possíveis projetos, o mais simples é conhecido como experimento fatorial completo. Essa técnica é adequada para se investigar o efeito conjunto de vários fatores sobre uma variável de saída. De um modo geral, cada fator poderia ser observado em vários níveis (valores), porém os experimentos mais utilizados na prática são os de dois níveis. Como o experimento fatorial completo inclui todas as combinações entre os níveis dos fatores, apresenta como limitação o número (n^{2k}) exponencialmente explosivo de experimentos requeridos à medida que se lida com muitos fatores intervenientes.

Conforme visto anteriormente, o número de fatores de entrada considerados neste trabalho totaliza 5; logo, deve-se realizar, no mínimo, $2^5=32$ corridas para abranger todas as interações previstas em um experimento fatorial completo de 2 níveis. Para este trabalho, seria necessário utilizar, idealmente, ao menos 3 níveis, o que implicaria em um grande número ($3^5 = 243$) de corridas para se levar a cabo o experimento fatorial completo.

É possível, porém, realizar um teste da magnitude dos efeitos de cada um dos fatores a fim de eliminar os menos influentes. Ou seja, pode-se inicialmente fazer um experimento menor, com menos níveis, a fim de reduzir o número de fatores e, posteriormente, executar um experimento fatorial completo com mais níveis. Esta técnica é conhecida como *screening*.

Uma das formas de realizar um *screening* é por meio de um experimento fatorial fracionado em dois níveis. Neste tipo de projeto, eliminam-se as interações de maior ordem, isto é, as que envolvem muitos fatores. Não é absurdo fazer esse tipo de redução, visto que, em geral, interpretar o significado dessas interações não costuma ser algo trivial. Este tipo de experimento permite que se faça uma boa análise das interações de ordens mais baixas, pois num experimento fatorial fracionado realiza-se apenas uma fração das corridas de um fatorial completo. Pode-se, então, executar um experimento com 5 fatores e dois níveis, com apenas 2^{5-1} , isto é, 16 corridas.

Após a realização dos experimentos, utilizou-se o programa Minitab™ para a análise estatística dos dados. O método gráfico de Daniel (1959), adotado neste trabalho, facilita o processo de *screening*. Por meio desse método compara-se a magnitude e a significância estatística dos efeitos principais e de interação de um dado projeto fatorial de dois níveis. Conforme se ilustra na Fig.14, a reta contínua desenhada no gráfico indica a região que abrange os fatores que têm efeito nulo sobre a variável analisada. Efeitos significantes estarão afastados desta linha e serão indicados como tal pelo programa.

FIGURA 14 EXEMPLO DE TESTE DE DANIELS

Para analisar o experimento final, estão disponíveis no Minitab™ funções que geram gráficos de interações e de efeito bem como um otimizador de resposta, que encontra a combinação de níveis dos fatores dentre aqueles escolhidos para o experimento que irão atender à especificação de engenharia, podendo maximizar, minimizar ou direcionar para um valor específico a variável de saída.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a primeira parte dos resultados obtidos, utilizou-se a Tab.1 como referência para os parâmetros de entrada. Adiante serão definidos aqueles utilizados no projeto de experimentos.

TABELA 1 - PARÂMETROS DE REFERENCIA

Parâmetro	Valor de referência
<i>Tempo de simulação</i>	2s
Diâmetro médio das esferas (d)	1.18 mm
Diâmetro do bocal (D^*)	9.5 mm
Distanciabocal-placa (H^*)	120mm
Coefficiente de Restituição do material (C_r)	0.5
Velocidade média da partícula no plano do bocal (V)	27 m/s

As esferas selecionadas são do tipo S550 de aço fundido de densidade igual a 7.4g/cm^3 , a unidade de tempo de integração foi da ordem de 10^{-4}s , a vazão mássica foi fixada em 0.0105 kg/s e o fluido utilizado foi o ar atmosférico. O valor de C_r foi adotado uma vez que não se encontrou na literatura valores para esse coeficiente referentes ao impacto de aço fundido contra as ligas de alumínio abordadas na presente dissertação.

A forma mais elementar de se visualizar a dinâmica do jato consiste em se elaborar um gráfico que facilite a análise visual do fenômeno em si. A capacidade do algoritmo de armazenar todas as propriedades de cada uma das esferas a cada instante permite que se desenhem suas trajetórias sobrepostas, como se pode observar na Fig. 15.

FIGURA 15 TRAJETÓRIA DAS ESFERAS

Pode-se verificar que as trajetórias das partículas, desde a saída do bocal até o primeiro encontro com a superfície da placa, seguem, aproximadamente, as linhas de corrente do fluido. Observa-se ainda que essas trajetórias são aproximadamente simétricas em relação ao eixo de simetria do bocal, podendo-se atribuir as discrepâncias desse padrão aos eventos de colisão entre esferas.

É natural que se deseje identificar o modo como se distribuem as colisões na superfície da placa. Para tanto, registrou-se a posição de cada esfera em condição de choque com a placa e levantou-se o histograma da Fig. 16.

FIGURA 16 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS COLISÕES DAS ESFERAS NA PLACA

Observa-se que a distribuição apresenta a forma de uma gaussiana, com moda localizada sobre o eixo de simetria do bocal. Aplicando-se um teste de aderência (vide Fig.17) aos dados anteriores, confirma-se a natureza gaussiana da distribuição espacial das colisões sobre a placa.

FIGURA 17 TESTE DE ADERÊNCIA À DISTRIBUIÇÃO NORMAL

Pode-se, também, confirmar que essa distribuição é normal através do valor de Ryan-Joiner (RJ) (Ryan, T. e Joiner, B. (1973)). Distribuições normais têm RJ muito próximo de 1. Neste caso, o valor de RJ é 0.99, confirmando, portanto, a hipótese de normalidade. Esses resultados estão de acordo com o modelo proposto por Wustefeld et al. (2002), que prevê este comportamento para a distribuição de colisões na superfície da placa.

No que diz respeito à cobertura, pode-se traçar um gráfico dessa variável em função do tempo de simulação, conforme indicado na Fig. 18:

FIGURA 18 COBERTURA X NUMERO DE ITERAÇÕES

Nota-se que a evolução da cobertura se dá de forma exponencial, com um decréscimo na taxa de incremento, como previsto por Karuppanan et al. (2002).

A fim de validar o modelo de cálculo de raio de curvatura, foram utilizados dados de experimentos realizados no Laboratório de Metalurgia do IPT. Utiliza-se então granalhas S550 (1.94mm de diâmetro) em placas de 5mm e 10mm , com pressões de 10, 20 e 30psi. Para converter os valores de pressão para velocidade, a fim de executar o algoritmo proposto, utilizou-se a seguinte tabela fornecida pelo IPT(Tab. 2):

TABELA 2 - RELAÇÃO ENTRE PRESSÃO E VELOCIDADE DE IMPACTO

Granalha	Pressão [psi]	Velocidade de Impacto [m/s]
S550	30	28,6
	20	22,4
	10	16,2

Para cada combinação de parâmetros, foram realizados experimentos com três placas e a média desses valores foi utilizada para comparação com os resultados estimados. Os experimentos foram realizados em condições de 60% e 200% de cobertura. Como o algoritmo parte da suposição de 100% de cobertura, espera-se que os valores analíticos sejam maiores que as medidas em 200% e menores que aquelas em 60% de cobertura. O valores experimentais médios e analíticos dos raios de curvatura, em metros, para granalhas S550 e 30 psi de pressão são apresentados na Tab.3:

TABELA 3 - VALORES DO RAI0 DE CURVATURA - 30PSI

Espessura [mm]	Experimental - 60%	Analítico -100%	Experimental - 200%
5mm	3535	2466	1902
10mm	18009	10902	9835

Para uma pressão de 20 psi, os raios de curvatura são os mostrados na Tab.4:

TABELA 4 - VALORES DE RAI0 DE CURVATURA - 20PSI

Espessura[mm]	Experimental - 60%	Analítico - 100%	Experimental - 200%
5mm	3535.68	2994.3	2464.33
10mm	19579.32333	13050.3	11712.04667

E para 10psi, os mostrados na Tab.5:

TABELA 5 - VALORES DO RAI0 DE CURVATURA - 10PSI

Espessura[mm]	Experimental - 60%	Analítico - 100%	Experimental - 200%
5mm	6190	3841	3177
10mm	18627	16485	17230

Pode-se observar que em todos os casos o valor calculado se comportou como previsto, exceto nos experimentos em que se utilizou uma placa de 10mm e esferas a 10 psi de pressão. Esse erro provavelmente ocorre pela dificuldade de se medir com exatidão raios de curvatura muito grandes.

Foi realizado então um experimento para analisar a sensibilidade do raio de curvatura aos valores de diâmetro e de velocidade de saída. Nele, foram selecionados 5 diferentes esferas e foram arbitradas pressões, representadas por velocidades, como mostrado na Tab. 6:

TABELA 6 - PARÂMETROS DOS EXPERIMENTOS DE RAO DE CURVATURA

Diametro [m]	Velocidade [m/s]
0.44	10
0.73	20
1.94	30
2.88	40
4.66	50

Todas as combinações foram realizadas no experimento, do tipo fatorial completo, e os resultados são registrados na Tab.7:

TABELA 7 - RESULTADO DO EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO

Diametro [mm]	Velocidade[m/s]	Raio de Curvatura[m]
0.44	10	112.694
0.44	20	70.528
0.44	30	53.207
0.44	40	43.432
0.44	50	37.045
0.73	10	65.017
0.73	20	40.532
0.73	30	30.486
0.73	40	24.821
0.73	50	21.124
1.94	10	23.616
1.94	20	14.490
1.94	30	10.762
1.94	40	8.668
1.94	50	7.305
2.88	10	15.977
2.88	20	9.687
2.88	30	7.127
2.88	40	5.692
2.88	50	4.760
4.66	10	9.161
4.66	20	5.405
4.66	30	3.887
4.66	40	3.041
4.66	50	2.494

Esses resultados permitiram gerar um gráfico que ilustra a variação do valor de raio de curvatura em função dos parâmetros testados:

FIGURA 19 GRÁFICO DE EFEITOS PRINCIPAIS PARA RAIOS DE CURVATURA

A Fig. 19 mostra que a variação do raio de curvatura é inversamente proporcional ao aumento de ambos parâmetros, e a queda ocorre de forma exponencial com decréscimo na taxa de incremento. É possível então concluir que o valor do raio de curvatura tende a uma saturação, e que pequenas variações de velocidade e de diâmetro, quando esses valores são pequenos, têm um efeito maior sobre o raio de curvatura do que quando são maiores. Essa informação é importante para o planejamento do processo.

Conforme mencionado no capítulo anterior, realizou-se inicialmente um experimento fatorial fracionado com o objetivo de identificar as variáveis mais significativas do processo. Nesse *screening* foram analisados cinco fatores com dois níveis cada um. Esses valores podem ser encontrados na Tab. 8.

TABELA 8 - VALORES DOS PARÂMETROS DO EXPERIMENTO DE SCREENING

Nível	dp [mm]	vel saída [m/s]	tempo [s]	H* [mm]	D* [mm]
1	1	27	1	90	9.5
-1	2.8	75	3	180	19.1

Os valores considerados para o diâmetro médio das granalhas e para o diâmetro do bocal são normalizados, conforme normas e catálogos comerciais (SAE International(2012); Kennametal(2015)). As faixas de velocidade de saída e de

distâncias entre o bocal e a placa foram escolhidas segundo experimentos descritos em Nguyen et al. (2014). Conforme Karuppanan et al. (2002), o aumento da cobertura em função do tempo ocorre de forma exponencial, de forma que um longo tempo de exposição resultará em coberturas próximas a 99% independentemente da combinação dos outros fatores, situação não favorável à análise de experimentos, visto que, a partir desse ponto de saturação, a influência de outros valores não pode mais ser avaliada. A fim de evitar esta situação foram escolhidos então valores de tempo suficientemente pequenos. Ao utilizar o programa MiniTab™ para planejar os testes, utilizaram-se as combinações de níveis indicadas na Tab. 9.

TABELA 9 - NÍVEIS DOS FATORES EM CADA CORRIDA

<i>Corridas</i>	<i>dp [mm]</i>	<i>vel saída [m/s]</i>	<i>tempo [s]</i>	<i>H* [mm]</i>	<i>D* [mm]</i>
2	1	-1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	-1
8	1	1	1	-1	-1
9	-1	-1	-1	1	-1
12	1	1	-1	1	-1
14	1	-1	1	1	-1
15	-1	1	1	1	-1
17	-1	-1	-1	-1	1
20	1	1	-1	-1	1
22	1	-1	1	-1	1
23	-1	1	1	-1	1
26	1	-1	-1	1	1
27	-1	1	-1	1	1
29	-1	-1	1	1	1
32	1	1	1	1	1

Os resultados oriundos dos 16 experimentos de *screening* são apresentados na Tab.10.

TABELA 10 - RESULTADO DO EXPERIMENTO DE *SCREENING*

<i>dp [mm]</i>	<i>vel saída [m/s]</i>	<i>tempo [s]</i>	<i>H* [mm]</i>	<i>D* [mm]</i>	<i>Cobertura</i>	<i>EngCin</i>
2.8	27	1	90	9.5	0.971508	2.275
1	75	1	90	9.5	0.8195	0.7159
1	27	3	90	9.5	0.964896	0.9077
2.8	75	3	90	9.5	0.9999	48.3075
1	27	1	180	9.5	0.4691	0.0984
2.8	75	1	180	9.5	0.8963	16.03
2.8	27	3	180	9.5	0.958157	7.1187
1	75	3	180	9.5	0.95024	2.1929
1	27	1	90	19.1	0.6838	0.0991
2.8	75	1	90	19.1	0.9829	15.603
2.8	27	3	90	19.1	0.9999	6.7903
1	75	3	90	19.1	0.99514	47.2795
2.8	27	1	180	19.1	0.7402	1.931
1	75	1	180	19.1	0.57348	0.7172
1	27	3	180	19.1	0.795	0.3161
2.8	75	3	180	19.1	0.9999	48.29

Esta tabela foi então transferida para o MiniTab™ a fim de se identificar a influência dos fatores considerados.

Na Fig.20 apresenta-se o gráfico de efeito, que avalia a média das respostas de cada fator em cada um dos níveis. Quanto maior a diferença dos valores, isto é, quanto mais inclinados os segmentos de reta, maior a significância do fator. Este gráfico nos indica previamente quais fatores serão considerados significantes segundo a análise de Daniel, que é o método gráfico utilizado para tal fim. Note-se que fatores como tempo, diâmetro médio de granalha e distância bocal-placa parecem ser os mais relevantes no que tange à cobertura.

FIGURA 20 GRÁFICO DE EFEITOS DO EXPERIMENTO DE SCREENING SOBRE A COBERTURA

Apesar de indicarem se um dado fator é relevante ou não, os gráficos anteriores não apresentam informações sobre a interação entre fatores.

A análise de Daniels, relativamente aos fatores significantes para cobertura é apresentada na Fig. 21.

FIGURA 21 TESTE DE SIGNIFICANCIA DE DANIELS PARA COBERTURA

Como já visto, pontos mais afastados da reta são os fatores mais significantes, e aqueles afastados que alcançaram um nível de significância igual ou superior a 95% são destacados. O primeiro gráfico, que analisa a cobertura, confirma as informações do gráfico de efeitos: diâmetro da esfera, tempo e distância bocal-placa são os fatores relevantes para a determinação da cobertura.

Realizou-se então um segundo experimento para analisar a interação dos três fatores eleitos como significantes.

O planejamento deste novo experimento seguiu as premissas de um experimento fatorial completo, com três fatores e três níveis, abrangendo todas as possibilidades de combinações. Para esse novo experimento, adotaram-se para os parâmetros os valores mostrados na Tab. 11.

TABELA 11 - VALORES DOS FATORES NO EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO

Nível	dp [mm]	H* [mm]	tempo [s]	D* [mm]	vel saída [m/s]
-1	1	90	1	19.1	27
0	2	135	2		
1	2.8	180	3		

Na Tab.12 indicam-se os níveis dos fatores utilizados em cada um dos testes do projeto fatorial completo.

TABELA 12 - NÍVEIS DOS FATORES EM CADA TESTE

<i>Corrida</i>	<i>dp</i>	<i>H*</i>	<i>tempo</i>
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	1
7	-1	1	-1
8	-1	1	0
9	-1	1	1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	1
16	0	1	-1
17	0	1	0
18	0	1	1
19	1	-1	-1
20	1	-1	0
21	1	-1	1
22	1	0	-1
23	1	0	0
24	1	0	1
25	1	1	-1
26	1	1	0
27	1	1	1

Na Tab.13 apresentam-se os resultados gerados pelo experimento.

TABELA 13 RESULTADO DO EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO

<i>Corrida</i>	<i>dp [mm]</i>	<i>H* [mm]</i>	<i>tempo [s]</i>	<i>Coverage</i>
1	1	90	1	0.5309
2	1	90	2	0.7905
3	1	90	3	0.8917
4	2	90	1	0.7885
5	2	90	2	0.9123
6	2	90	3	0.9891
7	2.8	90	1	0.8687
8	2.8	90	2	0.9488
9	2.8	90	3	0.9999
10	1	135	1	0.5351
11	1	135	2	0.7532
12	1	135	3	0.8396
13	2	135	1	0.7123
14	2	135	2	0.9492
15	2	135	3	0.9569
16	2.8	135	1	0.8192
17	2.8	135	2	0.9188
18	2.8	135	3	0.9721
19	1	180	1	0.4646
20	1	180	2	0.739
21	1	180	3	0.8293
22	2	180	1	0.6701
23	2	180	2	0.8712
24	2	180	3	0.9666
25	2.8	180	1	0.7821
26	2.8	180	2	0.9454
27	2.8	180	3	0.9813

Aplicando-se algumas das ferramentas de análise estatística do MatLab™ aos dados anteriores, pode-se extrair informações relevantes sobre os fatores considerados. A primeira análise baseou-se no gráfico de interações, o qual indica se as variáveis são ou não independentes entre si. É importante para o planejamento de processos que os fatores sejam independentes, pois se não forem, o planejamento se torna muito mais complexo. Num gráfico de interações, retas paralelas indicam inexistência de interação entre os correspondentes parâmetros; ao contrário, a presença de ângulos acentuados entre retas é um indício de que aqueles parâmetros são interdependentes.

Na Fig. 22 as linhas que conectam as coberturas médias a cada par de interações ou são quase paralelas ou pouco convergentes, de modo que se pode admitir que os fatores em causa possuem baixo grau de interação. Isso posto, a investigação da influência

individual de cada fator sobre a cobertura pode ser realizada a partir da análise dos gráficos de efeitos apresentados na Fig.23.

FIGURA 22 GRÁFICO DE INTERAÇÕES

FIGURA 23 GRÁFICO DE EFEITOS

Esse experimento fatorial completo de três níveis permitiu evidenciar ainda mais a significância dos fatores tempo e diâmetro da esfera e a pouca importância do fator H^* . É interessante notar que conforme previsto em Karuppanan et al. (2002), a taxa de cobertura decai exponencialmente com o tempo. No experimento realizado pôde-se também verificar que o mesmo ocorre quando se aumenta o diâmetro médio das granalhas.

Para fins de planejamento de processo, analisados os efeitos e tendo-se as informações acerca do comportamento das diversas variáveis sobre os resultados do processo de *peen forming*, pode-se utilizar o algoritmo aqui apresentado para gerar gráficos de referência que auxiliem a seleção dos parâmetros do processo a fim de se atingir a curvatura de projeto. É possível, uma vez definida a espessura da placa a ser conformada, traçar linhas que representem a variação do raio de curvatura com a velocidade média das esferas para diferentes diâmetros de granalhas.

Para uma placa com 5mm de espessura, por exemplo, tem-se(Fig. 24):

FIGURA 24 RELAÇÃO ENTRE RAO DE CURVATURA E VELOCIDADE MÉDIA PARA DIVERSOS DIÂMETROS

Os valores de diâmetros foram arbitrados, porém é possível calibrar o algoritmo para responder a diâmetros de interesse. Esse gráfico pode ser utilizado para se eliminar diâmetros que não produzam o resultado desejado, e, após selecionados os candidatos a serem utilizados no projeto, é possível traçar os gráficos individuais referentes a esses diâmetros. Pode-se, por exemplo, traçar o gráfico de uma esfera de 1.94mm para uma espessura de 5mm:

FIGURA 25 RELAÇÃO ENTRE RAIOS DE CURVATURA E VELOCIDADES PARA A ESFERA S550

Esse gráfico (Fig. 25) serve como referência rápida para se visualizar as faixas de trabalho a serem utilizadas na conformação do material. No entanto, o algoritmo é capaz de estimar a velocidade correspondente a um raio de curvatura de interesse de forma iterativa com mais precisão do que o método gráfico.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho se prestou a criar um modelo computacional que pudesse prever o campo de velocidades de um jato de *peen forming* incidente em uma placa plana, estimar a distribuição da fração de energia cinética a ela transferida e planejar o processo de *peen forming* com vistas à produção de uma placa com curvatura pré-estabelecida (curvatura de projeto) a partir de uma placa plana. Simultaneamente, realizou-se um projeto de experimentos destinado a investigar a influência dos parâmetros do processo sobre as variáveis de interesse – cobertura e energia cinética.

A partir do modelo matemático proposto elaborou-se um algoritmo que se mostrou capaz de realizar os cálculos necessários à integração das equações de movimento de um grande número de partículas impelidas por um jato de ar em regime permanente, a identificação de eventos de choque entre partículas e dessas contra a placa e à manutenção do registro de toda a história temporal de cada partícula, desde a sua entrada no volume de controle do jato até sua eventual expulsão.

Este algoritmo permitiu que se realizasse o levantamento da distribuição espacial de colisões sobre a superfície da placa e a estimação da correspondente distribuição espacial de energia cinética, tornando possível, com o auxílio de modelos analíticos descritos na literatura, estimar campo de tensões residuais induzidas na placa e a curvatura resultante. Os resultados gerados pelo modelo encontram confirmação em artigos publicados previamente na literatura.

Com o auxílio de um software de análise estatística, foi possível descobrir quais os fatores que exercem maior influência sobre a cobertura. Utilizando-se a técnica de projeto de experimentos, identificou-se que os fatores mais relevantes para a cobertura são a distância bocal-placa, o diâmetro das esferas e o tempo de exposição. Identificou-se ainda que esses três fatores apresentam baixo grau de interação e que a influência dos fatores tempo e diâmetro médio decai com taxa exponencial à medida que estes são incrementados. Esses resultados, porém, devem ser investigados de forma mais profunda. Os resultados da análise da influência dos parâmetros testados sobre o valor da cobertura deveriam ser investigados mais acuradamente. Ressalta-se, porém, que

existem muitos trabalhos na literatura que tratam desse assunto (análise dos fatores que influenciam a cobertura), enquanto são raros os que buscam construir uma metodologia de planejamento de processos de *peen forming*, assunto principal da presente dissertação.

É importante destacar que o programa computacional desenvolvido durante a realização deste trabalho é uma ferramenta de auxílio à tarefa de planejamento de processos de *peen forming* para produção de curvaturas cilíndricas permanentes em placas metálicas planas, de vez que permite determinar os valores das variáveis requeridas do processo que induzirão na placa um campo de tensões residuais compatível com a curvatura de projeto almejada.

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- 1) incluir a velocidade de avanço do bocal e seus efeitos sobre a cobertura;
- 2) aprimorar o modelo dinâmico do jato de *shot peening*, de modo a considerar os efeitos da dinâmica das granalhas sobre o escoamento;
- 3) incluir um modelo de escoamento compressível que permita determinar a velocidade do jato de ar na seção de saída do bocal em função da pressão de entrada;
- 4) substituir o atual modelo de jato bidimensional axi-simétrico por um modelo tridimensional;
- 5) utilizar um modelo analítico mais avançado para estimação do campo de tensões residuais induzidas na placa pelo processo de *peen forming*.
- 6) fazer um estudo estatístico mais elaborado do resultado dos experimentos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AIRBUS UK, **Process specification (ABP 1-2031)**, 1993, p. 1-1 I,
- [2] AL-HASSANI, S. T. S., **Mechanical aspects of residual stress development in shot peening**, ICSP-1, Paris, France, 1981, p. 583-602
- [3] ALMEN, J.O., **The application of shot peening**. Plastic Working of Metals, 1964, p.20.40 – 20.49.
- [4] AL-OBAID, Y.F. **Shot peening mechanics: experimental and theoretical analysis**. Mechanics of Materials, 19, 1995, p.251-260.
- [5] BAIKER, A.G. **Modern equipment for controlled shot peening and peen forming**, ICSP-4, Tokyo, Japan, 1990, p. 573-584
- [6] BANDINI, M. **Almen Strip Saturation Curve needs Review**, The Shot Peener magazine, Vol 26 ,2012
- [7] BARKER, B., YOUNG, K., POULIOT, L. **Particle velocity sensor for improving shot peening process control**. International Conference on Shot Peening, 9, Marne La Vallée, France, 2005. Proceedings, p. 385-391.
- [8] CLAUSEN, R., STANGENBERG, J. **Device for the determination of impact velocities in shot peening**. International Conference on Shot Peening, 8, Munich, Germany, 2002. Proceedings, p. 89-95.
- [9] COIMBRA, C.F.M., RANGEL, R.H. **General solution of the particle momentum equation in unsteady stokes flow**. Journal of Fluid Mechanics, 1998, p. 53-72.

- [10] CURTIS, S. et al. **Analysis of the effects of controlled shot peening on fatigue damage of high strength aluminum alloys.** international journal of fatigue 25, 2003, p. 59-66
- [11] DAI, K. et al. **Finite element modeling of the surface roughness of 5052 Al alloy subjected to a surface severe plastic deformation process.** Acta Materialia volume 52 , edição 20, 2004, p. 5771-5782
- [12] DALLA PACCE, P.H,MARTINS, F.P.R., FLEURY, A. T. **Analysis of the residual stress induced by peen forming in aluminum alloy specimens.** 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), 2013
- [13] DANIEL, C. **Use of half-normal plots in interpreting factorial two-level experiments.** Technometrics 1,1959, p.311-340.
- [14] DUCHAZEABENEIX, J.M. **Stressonic shot peening (Ultrasonic process).** ICSP-7,Nantes,France,1999,p. 442-452
- [15] FETT, G.A. **Understanding shot peening: a case history.** Modern Casting, 1983,p. 29-31
- [16] FLAVENOT, J. F., NIKULARI, A. **La mesure de contraintes residuelles: methode de la (Fleche) Methode de la (Source de contraintes).** Le memoire techniques du CETIM, 1977
- [17] FLEURY, A.T et al. **Residual stresses induced by peen forming processes applied to conform aluminum alloy plates.** International

Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2009, 20, 9, Gramado, Proceedings, 2009, 8p.

- [18] FLEURY, A.T. et al. **Modelagem, simulação e validação experimental de processos de peen forming em placas de ligas de alumínio.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 6, Caxias do Sul. Anais, 2011, 10p.
- [19] FLEURY, A.T.; DELIJAICOV, S.; MARTINS, F. P. R. **Análise do processo de peen forming aplicado a chapas de liga de alumínio 7050 usando regressão multivariável e redes neurais.** Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 6, 2011, Caxias do Sul. Anais, 9p.
- [20] FRITTS, T. N. **Shot peen training. 1998 shot peening & blast cleaning workshop.** Atlanta, USA, 1998
- [21] FUCHS, H.O. **Defects and virtues of the Almen intensity scale.** Proceedings of the 2nd International Conference on Shot Peening, 1984, p.74-78.
- [22] HRIBERNIK, A., BOMBEK, G., MARKOCIK, I. **Velocity measurements in a shot blasting machine.** Flow Measurement and Instrumentation, 14, 2003, p. 225-231.
- [23] HRYB, D. et al. **Particle transport in turbulent flow using both lagrangian and an eulerian formulation.** International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 36, 2009, P. 451-457

- [24] IIDA, K. **Dent and affected layer produced by shot peening.** International Conference on Shot Peening, 2, Chicago, USA, 1984. Proceedings, p. 283-292.
- [25] IPT. **Análise experimental e modelagem numérica do processo de conformação de placas de ligas de alumínio por jateamento de esferas.** Relatório Técnico no 102200-205, 2008.
- [26] IPT. **Modelagem numérico-experimental do processo de conformação de peças metálicas por peen forming.** Relatório Técnico no 87807-205, 2006.
- [27] IPT. **Modelamento, monitoramento e controle de processo de conformação por jateamento de esferas de peças usinadas de ligas de Alumínio.** Relatório Técnico no 102200-205, 2006.
- [28] KALPAKDJIAN, S., SCHMIDT, S.R. **Manufacturing Engineering and Technology**, 4th ed. Prentice Hall, 2001.
- [29] KARUPPANAN S. et al. **A Theoretical and Experimental Investigation into the Development of Coverage in Shot Peening.** International Conference on Shot Peening, 8, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2002, p. 16-20
- [30] KIRK, D. **Shot Peening Coverage: Prediction and Control.** The shot peener magazine, vol 23,2009, p. 24-32,
- [31] KIRK, D. **Interactive shot peening control.** International Conference on Shot Peening, 5, Oxford, UK. Proceedings, p. 9-14.

- [32] KÖNITZER, A. M. ,POLANETZKI, H. **Implementation of velocity measurement as intensity verification in production.** South Bend, USA,2011, p. 19-24
- [33] KYRIACOU, S. **Shot-peening mechanics, a theoretical study.** Proceedings of the 6th International Conference on Shot Peening,1996, p. 505-516.
- [34] LAHRMAN, D. F., GAYDOS, P. A. **Laser peening for prevention of fatigue failures.** ICSP-11,South Bend, USA, p. 353-358
- [35] LECOFFRE, Y el at. **A real-time particle velocity measurement system for use in shot peening.** The shot peener, v. 7, n. 2, p. 22-24.
- [36] LEGHORN, G. **The story of shot peening.** ASNE,1957
- [37] MAJZOobi, G.H., AZIZI, R. **A 3-D Numerical Study of Shot peening process using multiple shot impacts,** ICSP-9,Paris,France, 2005, p. 88-93
- [38] MANOUCHERIFAR, A., REZVANI, K. **3D FE analysis of shot peening process for simulation and research on shotpeening process parameters,** ICSP -11, South Bend, EUA, 2011, p. 67-74
- [39] MATHAR, J. **Determination of initial stresses by measuring the deformation around drilled holes.** ASME 56, No.4, 1934, p. 249-254
- [40] MAXEY, M.R., RILEY, J.J. **Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow.** Physics of Fluids, 1983 p. 883-889.

- [41] MEGUID, S. A., SHAGAL, G.,STRANART, J. C. **Finite element modelling of shot-peening residual stresses.** Journal of materials processing technology 92-93,1999,p. 401-404
- [42] MILBURN, E. W. **X-Ray diffraction applied to shot peened surfaces.** Met. Treat., 1945
- [43] MONTGOMERY, D.C. **Applied statistics and probability for engineers.** Wiley, 2003.
- [44] MYLONAS, G. I., LABEAS, G. N. **A comprehensive stream analysis and a numerical simulation of shot peening for the prediction of representative impact patterns.** International Conference on Shot Peening, 11,South Bend,USA,2011, p. 75-80
- [45] PERSON, N. L. **Effect of shot peening variables on fatigue of aluminum forgings.** Metal Progress, Vol 119,No. 6, 1981, p. 33-35
- [46] PLASTER,H. J. **Technical Aspects of Shot Peening.** ICSP-1, Paris,France,1981.p. 83-94
- [47] PRESS, W.H., TEUKOLSKY, S.A., VETTERLING, W.T. **Numerical Recipes 3rd ed.: the art of scientific computing.** Cambridge. Cambridge University Press, 2007.
- [48] ROUTH,R.J., **Dynamics of a system of rigid bodies,** 7 ed., New York, Dover Publications, 1960
- [49] RYAN, T. , JOINER, B. **Normal probability plots and tests for normality.** Tech. Rept., Pennsylvania State Univ.,1973

- [50] SAE FATIGUE DESIGN AND EVALUATION COMMITTEE, **SAE Manual on Shot Peening (SAEHS-84)**. 3rd ed :Society of Automotive Engineers, Inc., 1991.
- [51] SAE INTERNATIONAL, **Cast shot and grit size specifications for peening and cleaning**. J444, 2012
- [52] SHAW, M. C., DE SALVO, G. **On the plastic flow beneath a blunt axi-symmetric indenter**. ASME Journal of Engineering for Industry 92,1970, p, 480-493
- [53] STOTSKO, Z.A., STEFANOVYCH, T.O. **Ensuring uniformity of strengthening for machine parts surfaces by shot-peening**. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, v. 43, Nov. 2010, p. 440-447.
- [54] TAKEMOTO, M. **Prevention of stress corrosion cracking Of weldment by wet shot peening**, ICSP-2,Chicago,EUA,1984,p. 39-42
- [55] TARO, M., CHAISE, T., NELIAS, D. **A methodology to predict the roughness of shot peened surfaces**. Journal of materials processing technology 217,2015, p. 65-76
- [56] TORRES, M. A. S., NASCIMENTO M. P., VOORWALD, H. J. C., **Consideration of shot peening treatment applied to a high strength aeronautical steel with different hardnesses**. ICSP-8, Garmisch-Partenkirchen, Alemanha, 2002, p. 37-43

- [57] VIEIRA, L.C. et al. **Application of computer vision methods to estimate the coverage of peen formed plates.** Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 43, no 2, 2010, pp. 743-749.
- [58] VISHAY MEASUREMENTS GROUP INC. **Measurement of residual stresses by the hole drilling strain-gage method.** Measurement Good Practice Guide No.53, National Physical Laboratory, Teddington, UK, 2002.
- [59] WUSTEFELD, F., LINNEMANN, W., KITTEL S. **Towards peen forming process automation.** International Conference on Shot Peening, 8, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2002
- [60] XU, Z., HANGAN, H., YU, P. **Analytical solutions for a family of Gaussian impinging jets.** Journal of Applied Mechanics, V.75, 2008.
- [61] ZENG, Y., **Finite element simulation of shot peen porming,** International Conference on Shot Peening, 8, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2002

APÊNDICE A

Script do programa que calcula o campo de velocidades do fluido

A) Entrada de dados e calculo de constantes

```
Rj=1/2*3/8*25.4; % raio do jato: igualaremos ao valor do raio do bocal
Rj=55; % raio do jato
Rbocal=3/8*25.4/2; % raio do bocal
Zj=120.0; % distância entre a saída do bocal e o plano da placa
Rmax=55.0; % largura máxima do campo de velocidades
% As equações do modelo baseiam-se nos seguintes adimensionais:
%1)  $r=r_j/R_j$ , onde  $r_j$ =medida radial em mm a partir do centro do jato
%2)  $z=z_j/R_j$ , onde  $z_j$ =medida vertical em mm a partir da placa
%3)  $u=u_j/v_m$ , onde  $u_j$ =componente radial da velocidade do jato e
%            $v_m$ =velocidade média do jato na saída do bocal
%4)  $v=v_j/v_m$ , onde  $v_j$ =componente vertical da velocidade do jato
v_m=16.2; % velocidade do jato na saída do bocal
% O coeficiente empírico 'k' depende dos seguintes parâmetros
% a1 = coeficiente de forma do jato: a1 em [0.06; 0.08]
% b1 = constante empírica = 0.294
a1=0.07;
b1=0.294;
k=2.2*(a1*Zj/Rj+b1);

% Cálculo das constantes c
ns=400;
c(1)=-1;
for (i=2:ns)
    c(i)=-c(i-1)*i/(i+1)^2;
end;

nL=120; % no. de linhas
nC=55; % no. de colunas
dz=Zj/nL/Rj; %variação em z
dr=Rmax/nC/Rj; %variação em r
z=0;
ir=zeros(nL,nC);
iz=zeros(nL,nC);
```

```

u=zeros (nL,nC) ;
v=zeros (nL,nC) ;
psi=zeros (nL,nC) ;
rref=Rbocal/Rj;
xref=2*rref^2/k;
B) Calculo das linhas de corrente
for (i=1:nL)
    r=0;
    for (j=1:nC)
        ua=0;
        va=0;
        vb=0;
        ir(i,j)=r*Rj;
        iz(i,j)=z*Rj;
        psi=0;
        psiref=0;
        for (p=1:ns)
            x=2*r^2/k;
            h=sqrt(8*p/k);
            %cálculo da componente radial
            ua=ua+c(p)*Laguerre(p,x)*h*exp(-h*z);
            va=va+c(p)*Laguerre(p,x)*exp(-h*z);
            %cálculo da componente vertical
            vb=vb+c(p)*dLdr(p,r,k)*exp(-h*z);
            %cálculo da função corrente psi
            psi=psi+c(p)*Laguerre(p,x)*exp(-h*z);
            psiref=psiref+c(p)*Laguerre(p,xref)*exp(-h*z);
        end;
        psi=-(k/2)*(1-exp(-x/2))+r^2*exp(-x/2)*psi;
        psiref=-(k/2)*(1-exp(-xref/2))+rref^2*exp(-xref/2)*psiref;
        if ((psi>=psiref) || (z<10/Rj))
            u(i,j)=vm*r*exp(-x/2)*ua;
            v(i,j)=vm*(-exp(-x/2)+2*(1-x/2)*exp(-x/2)*va+r*exp(-x/2)*vb);
        else
            u(i,j)=0;
            v(i,j)=0;
        end;
        disp(u(i,j));
        disp(v(i,j));
        r=r+dr;
    end;
end;

```

```

        z=z+dz;
    end;
    vf=v;
    uf=u;
    quiver(ir,iz,u,v);
    streamslice(ir,iz,u,v);

```

C) Funcao Laguerre

```

function L=Laguerre(n,x)
l=zeros(100);
l(1)=-1;
l(2)=2*(x-2);
for (i=3:100)
    l(i)=i/(i-1)*((2*(i-1)-x)*l(i-1)-(i-1)^2*l(i-2));
end;
L=l(n);

```

D) Funcao dLdr

```

function dL=dLdr(n,r,k)
dl=zeros(100);
dl(1)=0;
dl(2)=8*r/k;
for (i=3:100)
    dl(i)=i/(i-1)*((2*(i-1)-2*r^2/k)*dl(i-1)-(i-1)^2*dl(i-2))-4*i*r/((i-1)*k)*dl(i-1);
end;
dL=dl(n);

```

APÊNDICE B

Script do programa que calcula a dinâmica das partículas

A) Entrada de dados e calculo de constantes e posicoes iniciais

```
clear all
alfa = 0.785; %angulo do bocal
D = 9.5; %diametro do bocal [mm]
h = 120; %distancia bocal - placa [mm]
dm = 4.66;% diametro medio das granalhas [mm]
v =16.2; %velocidade media na saida do bocal [mm]
ro = 0.00000786; % densidade das granalhas [mm]
ct=1;% parametro de contagem, sempre =1
dt = 0.1;%insira o valor de um passe de tempo [s^-3]:');
P = 4; %('insira o numero de passes entre waves');
I = 100;%('insira o numero total de interações'); %caso o numero de passes
seja determinado pelo tempo total de simulacao, podemos dizer que I =
T*10^3,sendo o tempo dado em segundos
Cob=0;% parametro de contagem, nao alterar
Cobertura=0;% parametro de contagem, nao alterar
Psi = 0.5; %('insira o coeficiente de perda de energia'); %devera ser
calculado
l=1; %posicao da primeira esfera no vetor de esferas excluidas;
Zd = 0.95/6;%('insira a variacao maxima admitida do diametro')/6;
Zb = 0.314/6;%('insira a variacao maxima admitida para o angulo b[rad]')/6;
%Ze = input('insira a variacao maxima admitida para o espaçamento')/6;
Zv = v/30; %input('insira a variacao maxima admitida para a velocidade
absoluta')/6;
%Zn = input('insira a variacao maxima admitida para o numero de
granalhas')/6;
Et = 0; %parametro de contagem, nao alterar
Ex = 0 ;%parametro de contagem, nao alterar
m=1; % parametro de contagem, nao alterar
nm = 1;% D/(2*dm); %numero medio,nao varia com o tempo.
Zn= (nm*(10)^-1)/6; %desvio padrao do numero de granalhas adicionadas ao
sistema
n=0 ; %numero de esferas incial,excluindo as introduzidas no passe, nao
alterar
```



```

t=0; % parametro de contagem,nao alterar
Ey=0;% parametro de contagem,nao alterar
Ni=1;%parametro de contagem,nao alterar
g=0.098; %gravidade local
vet = [0];% parametro de contagem,nao alterar
exc= [0]; %esferas excluidas colisao
k=1;% parametro de contagem,nao alterar
o=1;% parametro de contagem,nao alterar
u=1;% parametro de contagem,nao alterar
Dev = h/12; % margem que define a area a ser analisada pelo comando de
analise de perfil de velocidades contado a partir de uma cota fixa
Dis = h/6;%cota que define os pontos em y que serao utilizados para
analisar perfil de velocidades
lok= 8; %fator usado para determinar os momentos em que as "fotos" do
sistema serao tiradas por eventual algoritmo de representacao grafica
CD= 0.445 ;%(10^(MY-2)) ;%constante relacionada ao reynolds number
rof=1.1644*(10^-9); %densidade do fluxo (ar)
RO=rof/ro; % adimensional
kl= ((1-RO)/(1+0.5*RO))*g; %constantes da equacao BBO
MM=1;% parametro de contagem,nao alterar
Ec=0.026;% parametro de contagem,nao alterar
Hd=120;% parametro de contagem,nao alterar
U=1; % parametro de contagem,nao alterar
AA=1;% parametro de contagem,nao alterar
Coverage= zeros(ceil(5*(nm/(P*dt)*I/10+2)),2); %tamanho do vetor de
cobertura
VazaoMassica=(nm/(P*dt))*ro*((dm)^3)*pi/6*1000;% vazao massica [kg/s]
Inc=0; % parametro de contagem,nao alterar
jL=1;% parametro de contagem,nao alterar
Dpad = pi/20;% parametro de contagem,nao alterar
choque=0;% parametro de contagem,nao alterar
phi= (pi-alfa)/2;%valor de referencia para contas futuras
H= D*tan(phi)/2;%valor de referencia para contas futuras
Des=(h+H)/tan(phi);%valor de referencia para contas futuras
Derron=Des-D/2;%valor de referencia para contas futuras
FatorEng=0;% parametro de contagem,nao alterar
EcTotal=0;% parametro de contagem,nao alterar
Dim=1;% parametro de contagem,nao alterar
ii=1% parametro de contagem,nao alterar

for i=1:6

```

```

Layer(i)=1;
end
while Cobertura <0.97.5 %definir valor da cobertura desejado ao fim do
processo iterativo,quando a simulacao terminara. caso nao precise ser feita
a analise de cobertura,retirar esse loop

if Cob==1
    ii=I
    I=I+50
end
for it = ii : I
    exc = [0];
    if floor(it/P) - it/P == 0 | it == 1

        Et=0;
        Ed=0;
        Em=0;
        Ex=0;

        %inicio dos calculos
N = nm; %numero de esferas introduzidas no passe
N = floor(N);
for i = n+1:N+n %calculo dos diametros e das massas das esferas
    esf(i).d = dm - Zd*randn(1);
    esf(i).m= (((esf(i).d)^3)*ro*pi)/6;
    esf(i).choque=0;
end
Ey=1;
while Ey==1
    Ey=0;
    for i = n+1:1: N+n

        esf(i).Sx(it)= D*rand(1);
        for j = n+1:i-1
            if j == 0
                continue
            end

            while abs(esf(i).Sx(it)-esf(j).Sx(it)) <= 1.6
                esf(i).Sx(it)=D*rand(1);
            MM.it(it)= abs(esf(i).Sx(it)-esf(j).Sx(it));

```

```

    MM.i(it) = i;
    M.j(it) = j;
    Ey=1;
    end
    j=n+1;
end
esf(i).Sy(it) = 0;
end
end
%calculo das posicoes iniciais concluido.
%calculo das velocidades.
for i = n+1:1:N+n
    esf(i).V = v +Zv*randn(1); %claculo das velocidades absolutas iniciais
de cada esfera
    esf(i).B = 0; %angulo Beta
    esf(i).check5 = esf(i).B;
    esf(i).Zb= abs((2*Dpad/(3*D))*esf(i).Sx(it) - Dpad/3);
    esf(i).B = esf(i).B+ (esf(i).Sx(it)-(D/2))/abs(esf(i).Sx(it)-
(D/2))*abs(esf(i).Zb*randn(1)); %variacao do angulo Beta
    esf(i).seno = sin(esf(i).B);
    esf(i).cosseno = cos(esf(i).B);
    esf(i).Vx(it) = (esf(i).V)*esf(i).seno; %vel inicial em x
    esf(i).Vy(it) = (esf(i).V)*esf(i).cosseno ;%vel inicial em y
    esf(i).check4(it) = esf(i).Vx(it);
end
end

```

B) Calculo de posições e velocidades das granalhas

```

%Dinamica do problema
%dinamica sem colisao
if it == 1
    n=N;
end
for i = 0:1:n
    if it-1~=0 & norm(double(i==vet)) == 0
esf(i).k2=(0.75*RO*(CD/esf(i).d))/(1+0.5*RO);% constante da eq BBO
esf(i).Afl(it) = v/(2*h);
esf(i).Vfy(it) = 2*esf(i).Afl(it)*(h-esf(i).Sy(it-1));
esf(i).Vfx(it) = esf(i).Afl(it)*(esf(i).Sx(it-1)-(D/2));
esf(i).Vfy(it) = esf(i).Vfy(it)+esf(i).Sy(it-
1)*esf(i).Vfy(it)*0.01*randn(1);

```

```

esf(i).Vfx(it) = esf(i).Vfx(it)+esf(i).Sy(it-1)*esf(i).Vfx(it)*0.01*randn(1);
esf(i).fy(it)=k1+esf(i).k2*(esf(i).Vfy(it-1)-esf(i).Vy(it-1))*abs(esf(i).Vfy(it-1)-esf(i).Vy(it-1));
esf(i).Vy(it)=esf(i).Vy(it-1) + esf(i).fy(it)*dt;
esf(i).Sy(it) = esf(i).Sy(it-1) + ((esf(i).Vy(it)+esf(i).Vy(it-1))/2)*dt;
esf(i).fx(it)=esf(i).k2*(esf(i).Vfx(it-1)-esf(i).Vx(it-1))*abs(esf(i).Vfx(it-1)-esf(i).Vx(it-1));
esf(i).Vx(it)=esf(i).Vx(it-1) + esf(i).fx(it)*dt;
esf(i).Sx(it) = esf(i).Sx(it-1) + ((esf(i).Vx(it)+esf(i).Vx(it-1))/2)*dt;
end
end
%Dinamica com colisao
for i = 0:1:n
    if norm(double(i==vet)) == 0
        for j= 0:1:n
            if norm(double(j==vet)) == 0
                if (esf(i).Sx(it) - esf(j).Sx(it))^2 + (esf(i).Sy(it) -
esf(j).Sy(it))^2 <= ((esf(i).d+esf(j).d)/2)^2 && i ~= j & norm(double(i ==
exc)) == 0 & norm(double(j==exc)) == 0 & norm(double(i==vet)) == 0 &
norm(double(j==vet)) == 0

                velix = esf(i).Vx(it);
                veliy = esf(i).Vy(it);
                veljx = esf(j).Vx(it);
                veljy = esf(j).Vy(it);

                esf(i).Vx(it) = ((velix*(esf(i).m-
esf(j).m)+2*esf(j).m*veljx)/(esf(i).m+esf(j).m));
                esf(j).Vx(it) = ((veljx*(esf(j).m-
esf(i).m)+2*esf(i).m*velix)/(esf(i).m+esf(j).m));
                esf(i).Vy(it) = ((veliy*(esf(i).m-
esf(j).m)+2*esf(j).m*veljy)/(esf(i).m+esf(j).m));
                esf(j).Vy(it) = ((veljy*(esf(j).m-
esf(i).m)+2*esf(i).m*veliy)/(esf(i).m+esf(j).m));

                Diff = abs(sqrt((esf(i).Sx(it) - esf(j).Sx(it))^2 +
(esf(i).Sy(it) - esf(j).Sy(it))^2) - (esf(i).d+esf(j).d)/2); %valor da
diferenca entre a distancia entre os centros e a soma dos raios,isto
eh,quanto uma esfera " entrou" na outra

                Sent = [(esf(i).Sx(it)-esf(j).Sx(it)),(esf(i).Sy(it)-
esf(j).Sy(it))];

```

```

        Versor.a =
[esf(i).Vx(it),esf(i).Vy(it)]/(sqrt((esf(i).Vx(it))^2 +
(esf(i).Vy(it))^2));
        Versor.b =
[esf(j).Vx(it),esf(j).Vy(it)]/(sqrt((esf(j).Vx(it))^2 +
(esf(j).Vy(it))^2));
        Vertor.a = Diff*Versor.a;
        Vertor.b = Diff*Versor.b;
        esf(i).Sx(it)= esf(i).Sx(it) + (Vertor.a(1)/2);
        esf(i).Sy(it) = esf(i).Sy(it) + (Vertor.a(2)/2);
        esf(j).Sx(it) = esf(j).Sx(it) +(Vertor.b(1)/2);
        esf(j).Sy(it) = esf(j).Sy(it) + (Vertor.b(2)/2);
        exc(m)=i;
    exc(m+1)= j;
    if abs(esf(i).Vy(it))> 0.1*v | abs(esf(j).Vy(it))> 0.1*v
    lecheck(1,Ni) = esf(j).Sy(it);
    lecheck(3,Ni) = esf(j).Vy(it);
    lecheck(2,Ni) = esf(i).Sy(it);
    lecheck(4,Ni) = esf(i).Vy(it);
    Ni=Ni+1;
end
break
    end
    end

    end
    end
end
%colisao da esfera com a placa
for i = 0:1:n
    if norm(double(i==vet)) == 0
    if esf(i).Sy(it) >= h - (esf(i).d)/2
        if esf(i).Vy(it) >1
            Choque.Sx(ct) = esf(i).Sx(it);
            Choque.Vy(ct) = esf(i).Vy(it);
            Choque.Esf(ct) = i;
            Choque.Ec(ct)= esf(i).m*(esf(i).Vy(it)^2)/2;
            ct = ct+1;
            esf(i).choque=1;
            %calculando tamanho de identacao ( diametro)

```

```

        Dimple(Dim)=
4*Ec*abs(esf(i).Vy(it))*sqrt(ro)/sqrt(Hd/1000000);
    %registrando dados para calcular cobertura
    X1=esf(i).Sx(it)-Dimple(Dim)/2;
    X2=esf(i).Sx(it)+Dimple(Dim)/2;
    Dim=Dim+1;
    Coverage(U,1)=X1 +20;
    Coverage(U,2)=X2 +20;
    U=U+1;
    end
    esf(i).Vy(it) = -1*(Psi)*esf(i).Vy(it);
    esf(i).Sy(it) = h - (esf(i).d)/2;
    end
    end
end
%conferir se a esfera ainda esta no dominio do sistema
for i = 1:n
    if norm(double(i==vet)) == 0
        if esf(i).Sy(it)< -h/Derron*esf(i).Sx(it) | esf(i).Sy(it)<
(h/Derron*esf(i).Sx(it)-((h*D)/Derron)) | esf(i).Sy(it) <0%&
norm(double(i==vet)) == 0% & norm(double(j==vet)) == 0
        if esf(i).choque==0
            choque=choque+1;
        end
        vet(1)=i ;%vetor de esferas excluidas
        l=l+1;
        %adicionar esfera i ao vetor de esferas excluidas
    end
    end
end
%Vetor de resultados: Distribuicao de velocidades em cada uma das camadas:
if it ==(floor(I/lok))+ (Inc)
    for i=1:5
        for k = 1:n
            if norm(double(k==vet)) == 0
                if esf(k).Sy(it) > Dis*i - 0.5*Dev & esf(k).Sy(it) <
Dis*i+0.5*Dev
                    Tempo(10-lok).Camada(i).V(Layer(i)) = esf(k).Vy(it);
                    Layer(i)=Layer(i)+1;

                    check = 1;

```

```

        end
    end
end
for k=1:n
    if norm(double(k==vet)) == 0
if esf(k).Sy(it) > Dis*6 - Dev
        Tempo(10-lok).Camada(6).V(Layer(6)) = esf(k).Vy(it);
        esf(k).confer(j) = Layer(6);
        Layer(6)=Layer(6)+1;
    end
    end
end
Inc=Inc+1;
if Inc==50;
    for i=1:6
        Layer(i)=1;
    end
    Inc=0;
    lok = lok-2;
    if lok==0
        lok=1;
    end
end
end
end
if floor(it/P) - it/P == 0
n=n+N; %o incremento foi colocado aqui pois a dinamica do sistema pede que
hajam dados das esferas em it-1. se o incremento for feito antes da
dinamica das esferas, haveria um erro. eh essencial que haja uma condicao de
incremento de N+n pois N nao pode ser zerado.
end
t = t+dt;
end

```

C) Calculos de energia cinetica e de cobertura

```

for i= 1:numel(lecheck)/4
Mat(i)=lecheck(3,i);
end
for i=numel(lecheck)/4+1:numel(lecheck)/2
Mat(i)=lecheck(4,(i-numel(lecheck)/4));
end
k=1;

```

```

for i=1:115
Soma=0;
Soma1=0;
HistMedVy(i)=0;
EngCine(i)=0;
    HistVy(i)=0;
    for j=1:numel(Choque.Sx)
if Choque.Sx(j) >= (i-56) & Choque.Sx(j) <= (i-55)
Soma = Soma+Choque.Vy(j) ;
Soma1= Soma1+Choque.Vy(j)^2;
HistVy(i)=HistVy(i)+1;
HistVyy(k)=Choque.Vy(j);
k=k+1;
end
end
PosVy(i)=(i-56);
if HistVy(i) >0
    EngCine(i)=Soma1*(ro*((dm)^3)*pi/6)/2;
HistMedVy(i)=Soma/HistVy(i);
end
FatorEng=FatorEng+EngCine(i)/(abs(PosVy(i))+2);
EcTotal=EcTotal+EngCine(i);
end
T=D*(h/55.3398+1);
Coverar=sortrows(Coverage);
Sum=0;
for i = 1:length(Coverar)-2
    if Coverar(i,2) < 20-T/2 +D/2% | Coverar(i,1)>(D+T)/2
        Coverar(i,2) = 0;
        Coverar(i,1) =0;
    end
    if Coverar(i,1)>20+T/2 + D/2
        Coverar(i,2) = 0;
        Coverar(i,1) =0;
    end

    if Coverar(i,1)< 20-T/2 +D/2 && Coverar(i,2)>= 20-T/2 +D/2
        Coverar(i,1) = 20-T/2+D/2;
    end
    if Coverar(i,2) > 20+T/2 +D/2 && Coverar(i,1) < 20+T/2 +D/2
        Coverar(i,2) = 20+T/2+D/2;
    end
end

```



```

        end
    end
    for i = 1:(length(Coverar)-2)
        A=0;
        j=1;
        K=0;
        while K==0
            if Coverar(i,2) >Coverar(i+j,1)
                if Coverar(i,2)>Coverar(i+j,2)
                    Coverar(i+j,1)=0;
                    Coverar(i+j,2)=0;
                    A=1;
                else
                    Coverar(i,2)=Coverar(i+j,2);
                    Coverar(i+j,1)=0;
                    Coverar(i+j,2)=0;
                end
                if (i+j)<= length(Coverar)
                    j=j+1 ;
                end
            else
                K=1;
            end
        end
        i=i+j-1;
    end
    Coverar=sortrows(Coverar);
    for i= 1: length(Coverage)
        if Coverar(i,1) >= 20-T/2+D/2 && Coverar(i,2) <= 20+T/2+D/2
            Sum=Coverar(i,2)-Coverar(i,1) + Sum;
        end
    end
    Cobertura=Sum/T;
    for i= 1:length(Coverage)
        Cover(AA,i)=Coverar(i,1);
    end
    Cober(AA)=Cobertura;
    Eixo(AA)= I;
    AA=AA+1;

```

```
Cob=1;  
end
```

APÊNDICE C

Script do programa que calcula a tensão máxima e o raio de curvatura

A) Programa Principal

```
clear all

E = 71.7*10^9; % modulo young [Pa]
ni = 0.33 ; % poisson
dm= 0.73*10^-3; %[m]
Vs=15; %velocidade media [m/s]
esp = 10*(10^-3); % espessura da placa [m]
lar= 50*(10^-3); % largura da Placa [m]
l=400*(10^-3); % comprimento da placa [m]
I=lar*(esp^3)/12;% momento de inercia
Alpha = 0;%fracao da profundidade hp onde ocorre tensao maxima
Alph=(1-Alpha);
Y= 454*10^6; % Tensao de escoamento do material da placa [Pa]
Rom= 2830; % densidade do material [kg/m3]
Pb= 3*Y; % parametro de dureza
R=dm/2;
C3=((2/3)^(0.25))*3*(R);
hp=C3*((Rom*(Vs^2)/Pb)^(0.25));
lbd= hp/esp; %lambda
C2=1+sin(pi*Alpha/(2*Alph));
C1=C2-2*lbd+(4*lbd/pi)*Alph*cos(pi*Alpha/(2*Alph))
G1=hp+R;
G2=esp+R;
Tmax=Y*(1-2*log(G1/R)-2*(1-((G1^3)/(G2^3))));
Defm=(1-ni)/E*Tmax/(2*lbd/pi*(3*C1+1)-1);
z=0;
prec= 10000
h=hp/prec;

Mom=0;
```

```
for i=1:prec

    if i==1 || i==prec
        M=E*Defm*cos(pi*z/(2*hp))*(esp/2-z)*lar;
    else
        M=2*E*Defm*cos(pi*z/(2*hp))*(esp/2-z)*lar;
    end
    Mom=Mom+M;
    z=z+h;
end
Mom=abs(Mom*h);
raiocurv= E*I/Mom
```

APÊNDICE D

Script do programa que gera o perfil de tensoes residuais

A) Programa Principal

```

clear all
dm= 1.94*10^-3; %diametro medio das granalhas [mm]
R=dm/2;% raio medio das granalhas [mm]
E = 71*10^9; % modulo young [Pa]
ni = 0.33 ; % poisson
esp = 10*(10^-3); % espessura da placa [mm]
lar= 50*(10^-3); % largura da Placa [mm]
l=400*(10^-3); % comprimento da placa [mm]
I=lar*(esp^3)/12;% momento de inercia
Alpha = 0;%fracao da profundidade hp onde ocorre tensao maxima
Alph=(1-Alpha);
Y= 454*10^6; % Tensao de escoamento do material da placa [Pa]
Rom= 2930; % densidade do material [g/m^3]
Pb= 3*Y; % parametro de dureza
Vs=16.2; %velocidade media da sessao [m/s]
C3=((2/3)^(0.25))*3*(dm/2);
hp=C3*((Rom*(Vs^2)/Pb)^(0.25));
lbd= hp/esp; %lambda
C2=1+sin(pi*Alpha/(2*Alph));
C1=C2-2*lbd+(4*lbd/pi)*Alph*cos(pi*Alpha/(2*Alph));
G1=hp+R;
G2=esp+R;
Tmax=Y*(1-2*log(G1/R)-2*(1-((G1^3)/(G2^3))));
Defm=(1-ni)/E*Tmax/(2*lbd/pi*(3*C1+1)-1);
B=0;

for z= 1:100
    B=B+0.00001;
    Ez(z)=Defm*cos(pi*(B/(2*hp)));
end
B=0;
for z=1:100

```

```

B=B+0.00001;
C4=B+R;
if abs(B) < hp
    Tr(z) = (E*Defm/(1-ni))*((12*lbd/(pi*esp)*Alph*(esp/2-
B)*C1+2*lbd/pi*C2*Alph-Ez(z)/Defm));
    end
    if abs(B) >= hp

Tr(z)=Y*(2/3)*(G1/G2)^3*(0.5*(G2/C4)^3+1);
    end

A(z) = B;
end

plot(Tr,-A)

```