

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDA KOUKETSU

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE *SHOT PEENING* NO PERFIL DE
TENSÕES RESIDUAIS DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR
TEMPERADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Tcc2 - N° de Inscrição - 59)

CURITIBA

2017

FERNANDA KOUKETSU

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE *SHOT PEENING* NO PERFIL DE
TENSÕES RESIDUAIS DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR
TEMPERADO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr, Julio Cesar Klein das Neves

CURITIBA

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "Efeitos dos parâmetros de *shot peening* no perfil de tensões residuais de um ferro fundido nodular temperado", realizado pela aluna Fernanda Kouketsu, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr., Julio Cesar Klein das Neves

DAMEC, UTFPR

Orientador

Prof. Dr., Giuseppe Pintaúde

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. Dr., Ricardo Fernando dos Reis

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 07 de dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo.

Agradeço à minha família: meu pai, meu irmão e minha madrinha pelo apoio e suporte durante toda a minha vida, e ao meu namorado, pelo incentivo e compreensão.

Agradeço ao professor Julio Cesar Klein das Neves pela orientação e aos professores da banca, Giuseppe Pintaúde e Ricardo Reis, pelos comentários e conhecimentos que agregaram nesse trabalho.

Agradeço ao Gustavo Takehara pela amizade e sinceridade e à Marina Grabarski, pelo tempo despendido em me ensinar as técnicas utilizadas, além das sugestões dadas para melhorar o trabalho.

Aos meus amigos e demais professores que de alguma forma, contribuíram para que esse trabalho pudesse ser desenvolvido.

E por fim, à UTFPR pela bolsa de apoio à execução de trabalhos de conclusão de curso.

RESUMO

KOUKETSU, Fernanda. **Efeito dos parâmetros de *shot peening* no perfil de tensões residuais de um ferro fundido nodular temperado**. 2017. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Mecânica, Curitiba, 2017.

O Grupo de Materiais, Tribologia e Superfícies (GrMaTS) da UTFPR, ao longo dos últimos anos tem estudado a resistência à fadiga de contato de ferros fundidos nodulares. De acordo com a literatura, ao introduzir tensões compressivas no material aumenta-se a vida em fadiga de contato do mesmo. No entanto, em trabalhos anteriores, onde foram introduzidas tensões compressivas por meio de compressão mecânica, nitretação por plasma e *shot peening*, a vida em fadiga do ferro fundido nodular temperado e revenido não aumentou conforme esperava-se. No caso da introdução de tensão residual por meio do *shot peening*, verificou-se que a tensão compressiva, medida através do método de difração de raios-X, não foi tão profunda quanto a máxima tensão cisalhante, aproximadamente 100 μm , gerada pelo carregamento de contato não conforme. Em decorrência desta situação, o presente trabalho buscou aprofundar os estudos acerca dos parâmetros do *shot peening*, diâmetro de granalha e pressão de jateamento, a fim de aumentar a profundidade das tensões residuais compressivas. Para tanto, foram ensaiados seis corpos de prova em três condições distintas. Cada condição contou com um diâmetro e uma pressão de jateamento diferente. A altura Almen foi a mesma para as três condições. Para determinação do perfil de tensões foi utilizada a técnica de difração de raios-X associada com a remoção de material por ataque químico. Para a caracterização mais aprofundada após o tratamento superficial, foram realizadas análises metalográficas, medições de microdureza e análises topográficas. Os resultados encontrados mostraram que a variação nos parâmetros de *shot peening*, em relação aos trabalhos anteriores, foram bem sucedidos na criação de tensões residuais compressivas na profundidade de máxima tensão cisalhante (obtida em ensaios de fadiga, anteriormente). A tensão residual compressiva máxima, 815 MPa, foi obtida a partir de granalhas com diâmetro e pressão intermediários. Essa condição também levou a maior tensão residual compressiva, 300 MPa, na profundidade de 100 μm .

Palavras-chave: *shot peening*, ferro fundido nodular, tensões residuais, difração de raios-X.

ABSTRACT

KOUKETSU, Fernanda. **Efeito dos parâmetros de *shot peening* no perfil de tensões residuais de um ferro fundido nodular temperado**. 2017. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Mecânica, Curitiba, 2017.

The Group for Research on Materials, Tribology and Surfaces (GrMaTS) from Federal University of Technology -Paraná (UTFPR) have been studying over the past years the contact fatigue resistance of ductile cast iron. According to the literature, residual compressive stresses increase contact fatigue life. However, previous studies, in which compressive stresses were induced by means of mechanical compression, plasma nitriding and shot peening, revealed no increase on endurance of hardened ductile cast iron specimens submitted to pure rolling contact fatigue. In the study concerning shot peening, it was found that the compressive stress, measured by the X-ray diffraction method, wasn't as deep as the maximum shear stress, about 100 μm deep, generated by the non-conformal loading contact. As a result of this situation, this paper aims to evaluate shot peening process parameters, as blast particles diameter and blast pressure, in order to extend the depth of the residual stress profile. For this purpose, six specimens were submitted to 3 different shot-peening conditions. Each condition had a different diameter and blast pressure, but a constant Almen height. X-ray diffraction and chemical removal were employed on stress profile measurements. Samples were characterized by metallography analysis, microhardness - measurement and topographic analysis. Results showed that changes in shot-peening process, with respect to previous works, were successful on creating compressive residual stresses in the zone of depth of maximum shear stress (obtained, previously, by the fatigue process). The maximum compressive residual stress of 815 MPa was a result of an intermediate particle size and blast pressure. Such condition has also lead to the higher compressive stress at a depth of 100 μm , which was 300 MPa.

Keywords: shot peening, ductile cast iron, residual stress, X-ray diffraction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fatores que podem influenciar a vida em fadiga de um material.....	17
Figura 2- Localização da tensão cisalhante máxima no caso de rolamento puro, deslizamento puro e combinação entre rolamento e deslizamento para um contato não conforme de cilindro com superfície plana.	18
Figura 3- Possível distribuição de tensões residuais em um componente.	19
Figura 4- Influência dos tratamentos termoquímicos de nitretação e cementação no valor e profundidade da tensão residual compressiva.	20
Figura 5- Incremento na vida em fadiga de um aço CrSi temperado e revenido com diferentes processos de jateamento.	21
Figura 6- Impacto da granalha na superfície do material cria uma pequena concavidade.	22
Figura 7- Camada uniforme de tensões residuais compressivas gerada abaixo das concavidades criadas pelo impacto das granalhas.	22
Figura 8- Distribuição de tensões residuais trativas e compressivas no material.....	23
Figura 9- Relação entre a profundidade e a tensão residual utilizando diferentes materiais de granalhas.	24
Figura 10- Relação entre a σ compressiva e profundidade para diâmetros diferentes.	25
Figura 11- Relação entre a σ e a profundidade para materiais da granalha com durezas diferentes.	26
Figura 12- Métodos para acelerar as granalhas. a) utiliza a pressão do ar. b) utiliza a força centrífuga.	27
Figura 13- Bloco padrão para fixação das plaquetas padronizadas.....	29
Figura 14- “ <i>Almen Gauge</i> ” - Dispositivo para medir a deflexão das plaquetas.	29
Figura 15- Esquema de obtenção para intensidade Almen.....	29
Figura 16-Seleção de parâmetros de ensaio (diâmetro de granalha e pressão de jateamento) para obtenção de determinada Intensidade de jateamento	30

Figura 17- Intensidade de jateamento em função da camada desejada de tensão residual compressiva para diferentes materiais sendo jateado.....	31
Figura 18- Diferentes percentuais de cobertura de jateamento.....	32
Figura 19- Curva típica de tempo de exposição <i>versus</i> altura Almen, representando ponto de saturação.	32
Figura 20- Representação da incidência e da difração de um feixe de raios-X na estrutura cristalina de um material.	34
Figura 21- Exemplo de interferência construtiva, onde há um aumento na intensidade do feixe.....	35
Figura 22- Variação nos picos de difração devido a diferentes esforços aplicados. .	35
Figura 23- (a) Tensão residual na direção <i>OC</i> e (b) Variação da orientação do feixe de raios-X em ψ graus.	36
Figura 24- Distância interplanar <i>versus</i> $\sin^2\psi$ para uma amostra de alumínio 5056-O submetida a shot peening, apresentando tensão residual de -148 MPa.....	37
Figura 25- Ângulos e rotações utilizadas na medição de tensão residual por difração de raios-X.....	38
Figura 26- Comparação entre valores do perfil de tensão residual corrigido e não corrigido para um aço AISI 1070 cementado.	39
Figura 27- Classificação dos valores de <i>Ssk</i>	40
Figura 28- Classificação de valores para <i>Sku</i>	41
Figura 29- Superfície com múltiplos picos (<i>ssk</i> igual a 3,20 e <i>Sku</i> igual a 18,71)...	41
Figura 30- Superfície periódica (<i>ssk</i> igual 0,16 e <i>Sku</i> igual a 1,63).....	41
Figura 31- Superfície com diferente <i>Str</i> . (a) <i>Str</i> igual 0,11. (b) <i>Str</i> igual a 0,88.	42
Figura 32- Superfície com <i>Sds</i> igual a 2600 μm^2	43
Figura 33- Representação da rugosidade média <i>Ra</i>	43
Figura 34- Diferentes superfícies para um mesmo valor de <i>Ra</i>	44
Figura 35 - Fluxograma com a metodologia utilizada no trabalho.....	45
Figura 36- Representação dos corpos de prova para processamento.....	46

Figura 37- Corpo de prova polido.....	46
Figura 38- Região atacada do CP.....	48
Figura 39- Montagem do corpo-de-prova no difratômetro de Raios-X, com destaque para o emissor e receptor de Raios-X.....	49
Figura 40- Perfis de tensões residuais.....	51
Figura 41- Comparação entre os perfis de tensões residuais nas condições 1,2 e 3 com o perfil obtido no trabalho de Grabarski e Weigert (FFN-TRS) (2015)	52
Figura 42- Perfis de microdureza para os CP's 1,3 e 5 a partir da superfície sem <i>shot peening</i> com desvio padrão da média.	54
Figura 43- Perfis de microdureza para os CP's 1,3 e 5 após <i>shot peening</i> com desvio padrão da média.	55
Figura 44- Regiões com descarbonetação no CP5.....	56
Figura 45- Regiões com descarbonetação no CP5, similares à figura anterior, mas em maior detalhe.	56
Figura 46- Região descarbonetada CP1.....	57
Figura 47- Região descarbonetada CP3.....	58
Figura 48- Topografia da superfície sem <i>shot peening</i>	59
Figura 49- Topografia do CP na condição 1 (CP2)	59
Figura 50- Topografia do CP na condição 2 (CP4)	60
Figura 51-Topografia do CP na condição 3 (CP6)	60
Figura 52- Microscopia eletrônica de varredura da superfície do CP2. Imagem de elétrons retroespalhados.....	63
Figura 53- Microscopia eletrônica de varredura da superfície do CP4. Imagem de elétrons retroespalhados.....	63
Figura 54- Microscopia eletrônica de varredura da superfície do CP6. Imagem de elétrons retroespalhados.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais designações de granalhas metálicas e seu respectivo diâmetro em mm.	25
Tabela 2- Tipos de plaquetas padronizadas para medir intensidade Almen	28
Tabela 3- Métodos mais comuns para medição de tensão residual.....	33
Tabela 4- Composição química do ferro fundido nodular (%p.).	46
Tabela 5- Parâmetros de processamento	47
Tabela 6- Parâmetros de difração recomendados para ligas ferrosas.....	49
Tabela 7- Parâmetros de Rugosidade 3D	61
Tabela 8- Parâmetros de Rugosidade 2D	62

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

GrMaTS- Grupo de Materiais, Tribologia e Superfícies;

UTFPR- Universidade Tecnológica Federal do Paraná;

FFN- Ferro fundido nodular;

FTRN- Ferro fundido nodular temperado, revenido e nitretado;

FTR- Ferro fundido nodular temperado e revenido;

FFN-TRS- Ferro fundido nodular temperado, revenido e com *shot peening*;

CP- Corpo de prova;

Ssk- Assimetria da distribuição de alturas da Topografia;

Sku- Curtose da Distribuição das Alturas da Topografia;

Str- Relação de aspecto de texto;

Sds- Densidade de cumes;

APT- Alívio parcial de tensões;

MEV- Microscópio eletrônico de varredura;

HRC- Dureza Rockwell C;

MIC- *Metal Improvement Company*;

CMCM- Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais;

EHD- Modelo de lubrificação elasto-hidrodinâmico.

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_R - Tensão Resultante em um elemento;

σ_{apl} - Tensão aplicada em um elemento;

σ_ϕ - Tensão residual na direção ϕ ;

σ - Tensões residuais;

λ - Comprimento de onda do raio incidente;

2Θ - Ângulo de difração;

Φ - Ângulo Phi;

E- Módulo de elasticidade;

ν - Coeficiente de Poisson;

d - Distância interplanar;

d_ϕ - Distância interplanar na direção ϕ ;

$d_{\phi\theta}$ - Distância interplanar quando o material não está submetido a um estado de tensões;

$d_{\phi\psi}$ - Distância interplanar quando o material está submetido a um estado de tensões medido em um determinado ângulo ψ ;

ψ - Ângulo Psi;

Θ - Ângulo de incidência do feixe de raios-X;

X- Direção chi;

ω - Ângulo ômega;

ν - Coeficiente de Poisson;

Λ - Espessura específica de filme;

h_{min} - Espessura mínima de filme;

h_c - Espessura de filme lubrificante no centro da área de contato;

R_{q1} - Rugosidade quadrática média da superfície 1 em contato;

R_{q2} - Rugosidade quadrática média da superfície 2 em contato.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. Fadiga de contato	16
2.2. Tensões Residuais	18
2.2.1 <i>Shot Peening</i>	21
2.3. Medição de tensões residuais	33
2.3.1 Difração de Raios-X	33
2.4. Rugosidade	39
2.4.1 Parâmetros de Rugosidade 3D	40
2.4.2 Parâmetros de Rugosidade 2D	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	45
2.1. Corpos de Prova	46
3.2 <i>Shot Peening</i>	47
3.3 Caracterização dos corpos de prova	47
3.3.1 Tensão Residual	47
3.3.2 Microdureza	50
3.3.3 Análise Topográfica	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
5. CONCLUSÕES	65
6. REFERÊNCIAS	66
ANEXO A – Certificados <i>Shot peening</i>	72
ANEXO B- Valores obtidos nas medições de difração de raios-x	75

1. INTRODUÇÃO

Há dez anos o Grupo de Materiais, Tribologia e Superfícies (GrMaTS) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná vem desenvolvendo pesquisas que buscam estudar a resistência à fadiga de contato de rolamento no ferro fundido nodular. A introdução de tensões compressivas no material é benéfica e tende a melhorar a vida em fadiga dos componentes (NORTON, 2011). Amplamente utilizado para materiais como o aço (BIRNFELD *et al*, 2009; LITVIN *et al*, 2013), esse efeito ainda não é efetivo para ferros fundidos nodulares. Técnicas como compressão mecânica (NEVES, 2006), nitretação por plasma (WOLLMANN, 2012) e *shot peening* (MELO e NUNES, 2013) já foram empregadas, contudo, sem resultados positivos.

No trabalho de Melo e Nunes (2013) foram introduzidas tensões compressivas por meio do *shot peening* em um ferro fundido nodular temperado, revenido e nitretado (FTRN) e comparado com amostras do mesmo material que foram somente temperadas e revenidas (FTR). A comparação mostrou que o processo de *shot peening*, com intensidade Almen de 0,364 mmA, gralha de 0,3 mm de diâmetro nominal (designação S110) e pressão de 6,9 bar, levou a uma vida média em fadiga de contato superior ao FTRN, porém inferior ao FTR.

Complementando o trabalho de Melo e Nunes (2013), Grabarski e Weigert (2015) utilizaram duas técnicas de remoção de material (por ataque químico e remoção mecânica), associadas com a difração de raios-X, para medir tensões residuais em amostras de FTRN, FTRN com difusão após a nitretação e FTR com *shot peening*. Com os mesmos parâmetros de *shot peening* utilizados por Melo e Nunes (2013), Grabarski e Weigert (2015), obtiveram para a amostra FTR com *shot peening*, uma tensão máxima compressiva de aproximadamente 580 MPa, para uma profundidade entre 25 e 30 μm . Para essa mesma condição FTR, mas com um tratamento de difusão em forno a 400°C por 16 horas, houve um aumento da profundidade da zona com tensão compressiva de cerca de 75 μm , passando de 25 μm para quase 100 μm . Com os resultados obtidos, concluiu-se que os tratamentos superficiais realizados (*shot peening* e nitretação) não foram capazes de introduzir tensões compressivas na profundidade de máxima tensão cisalhante, 108 μm da

superfície, valor este obtido nos ensaios de fadiga de contato de Wollmann (2012) e Melo e Nunes (2013).

Observando os resultados de Grabarski e Weigert (2015), referentes as amostras que passaram pelo *shot peening*, percebeu-se a necessidade de compreender melhor a influência dos parâmetros do processo no perfil de tensões residuais de um ferro fundido nodular temperado e revenido. Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo verificar como os parâmetros diâmetro da granalha e pressão de jateamento, afetam a profundidade das tensões residuais geradas e, com isso, obter dados para compatibilizar esses perfis de tensão a situações de alta pressão de contato. Para a medição de tensão residual, foi utilizada a técnica de difração de raios-X associada com a remoção de material por ataque químico. Foram realizadas ainda análises metalográficas, análises topográficas e medições de microdureza.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Fadiga de contato

A fadiga de contato decorre do carregamento cíclico sobre contatos não conformes (NEVES, 2006) - quando o contato entre os corpos se dá em apenas um ponto ou linha de ação, como no caso de dentes de engrenagens, pista de rolamento, etc. São vários os fatores que podem influenciar a vida em fadiga de contato, conforme mostra a Figura 1.



Figura 1- Fatores que podem influenciar a vida em fadiga de um material.
Fonte: Neves (2006)

Ao longo do tempo, esse carregamento resulta em um acúmulo de deformações plásticas. As tensões subsuperficiais desenvolvidas podem interagir e após um número finito de ciclos, podem conduzir a nucleação de uma trinca (NEVES, 2006) que, devido as tensões trativas, podem se propagar (NORTON, 2011).

A Figura 2 apresenta um exemplo de como se comporta a tensão cisalhante máxima no contato não conforme entre um cilindro e uma superfície plana.

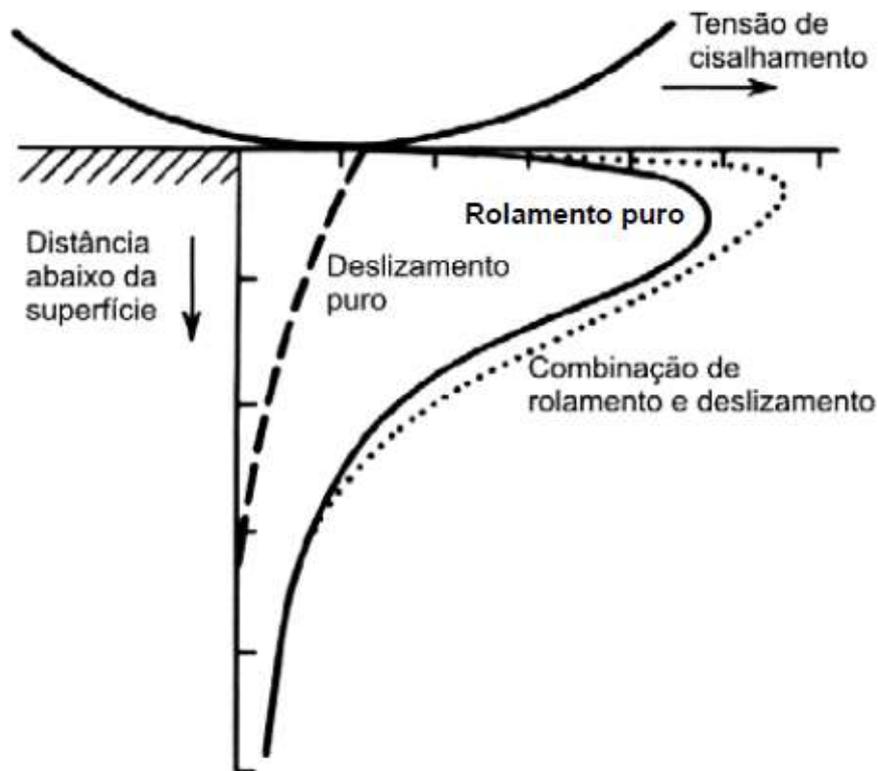


Figura 2- Localização da tensão cisalhante máxima no caso de rolamento puro, deslizamento puro e combinação entre rolamento e deslizamento para um contato não conforme de cilindro com superfície plana.

Fonte: ASM (1996)

Conforme observado, no caso do rolamento puro, a máxima tensão cisalhante estará abaixo da superfície de contato; no deslizamento puro, na superfície e na combinação entre rolamento e deslizamento dependerá da magnitude do atrito de deslizamento. A profundidade e o nível das tensões envolvidos dependem das dimensões e geometria dos corpos em contato, da carga de contato e das propriedades dos materiais envolvidos (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001).

2.2. Tensões Residuais

Como visto no item 2.1, são vários os fatores que podem influenciar a vida em fadiga de contato de um material, entre eles as tensões residuais (σ).

As σ podem ser entendidas como tensões que permanecem em uma peça sobre a qual não há esforços atuando (NORTON, 2011). Para que a distribuição de σ esteja

em equilíbrio em um componente, é necessário que as parcelas trativas e compressivas estejam balanceadas (GRABARSKI E WEIGERT, 2015), conforme mostra a Figura 3.

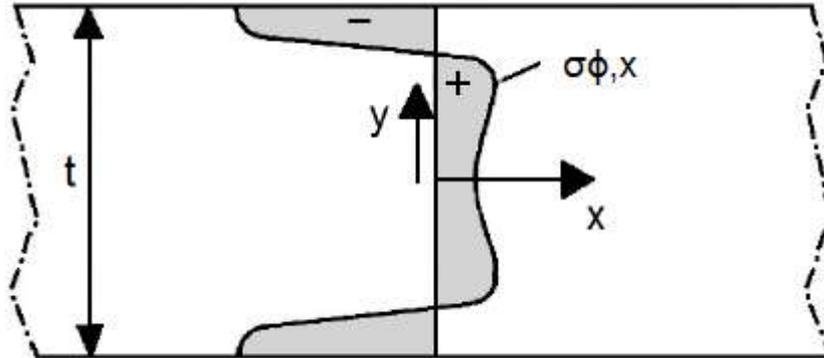


Figura 3- Possível distribuição de tensões residuais em um componente.

Fonte: Schijve (2004) (Adaptado)

Ao aplicar uma carga sobre um elemento, se este tiver um material com comportamento elástico, a tensão resultante (σ_R) sobre ele será igual a soma das tensões aplicada (σ_{apl}) e residual (σ) (NIKU-LARI, 1987), como é representado na Equação (1).

$$\sigma_R = \sigma_{apl} + \sigma \quad (1)$$

Quando esta carga aplicada for cíclica, a distribuição de tensões resultante terá um valor médio e uma amplitude. A amplitude não será influenciada pela σ . No entanto, a parcela média sofrerá um acréscimo, no caso da σ ser trativa, ou um decréscimo, se for compressiva. Por consequência, o valor da σ_R também será afetado dependendo da situação. Se o valor for positivo, a nucleação e o crescimento de trincas podem ser favorecidos, com isso o material poderá falhar por fadiga. Se esse valor máximo for negativo, será improvável que haja nucleação de microtrincas. Caso a nucleação aconteça, o crescimento das microtrincas poderá ser retardado (SCHIJVE, 2004).

As σ têm origem em deformações plásticas não uniformes causadas mecanicamente, termicamente ou durante transformações de fases/alterações microestruturais. As σ originadas termicamente são decorrentes sempre que há um gradiente de temperatura na peça, como quando ocorre um tratamento térmico

(têmpera, por exemplo) ou um processo de fabricação (como soldagem, usinagem, etc.). As σ devido a transformação de fase e alterações microestruturais estão relacionadas com reações químicas e físicas (como os tratamentos termoquímicos) que podem alterar a distribuição interna de tensões (SCURACCHIO, 2012).

A Figura 4 ilustra um exemplo da variação da tensão residual compressiva com a profundidade abaixo da superfície de um material que passou por um processo de cementação e outro de nitretação.

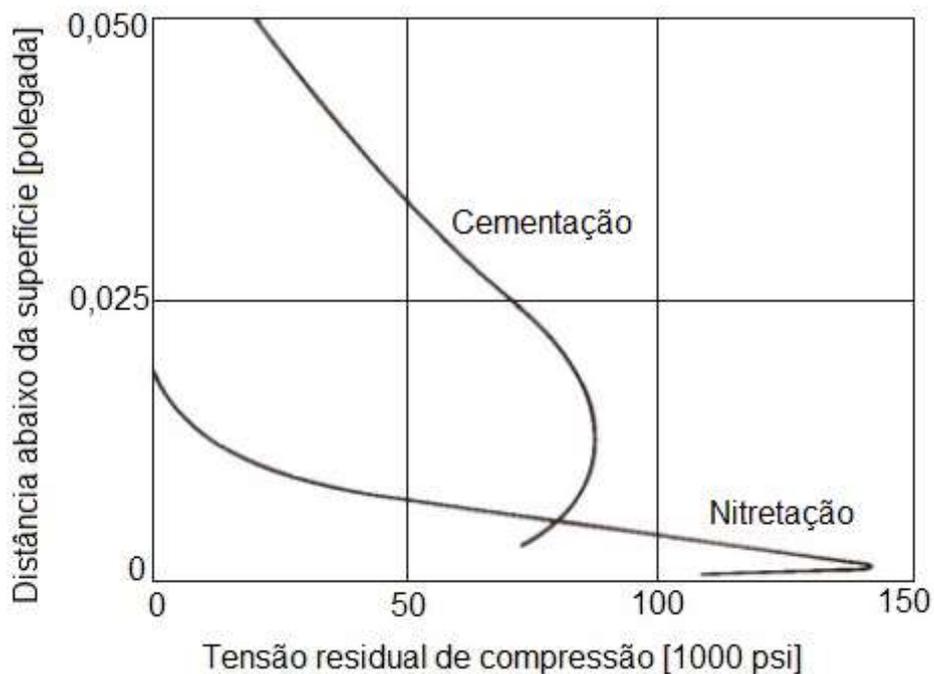


Figura 4- Influência dos tratamentos termoquímicos de nitretação e cementação no valor e profundidade da tensão residual compressiva.

Fonte: Norton (2011) (Adaptado)

Conforme Figura 4 é possível notar que a máxima tensão residual compressiva para o material nitretado encontra-se logo abaixo da superfície. No caso do cementado, o valor da tensão é menor, mas a profundidade é relativamente maior.

Por fim, as σ mecânicas são decorrentes da deformação plástica não uniforme do material, como quando o material é conformado (*shot peening*, laminação, etc.). Na Figura 5 é possível verificar a influência que vários tipos de *shot peening* tem no aumento percentual da vida em fadiga estrutural de componentes automotivos fabricados em aço CrSi, temperado e revenido (SCURACCHIO, 2012). Vale salientar

que, apesar de não ser apresentada no trabalho de Scuracchio (2012), a dureza do material, antes do processo de *shot peening*, é um fator importante que influencia nos resultados referentes a vida em fadiga (BIRNFELD *et al*, 2009).

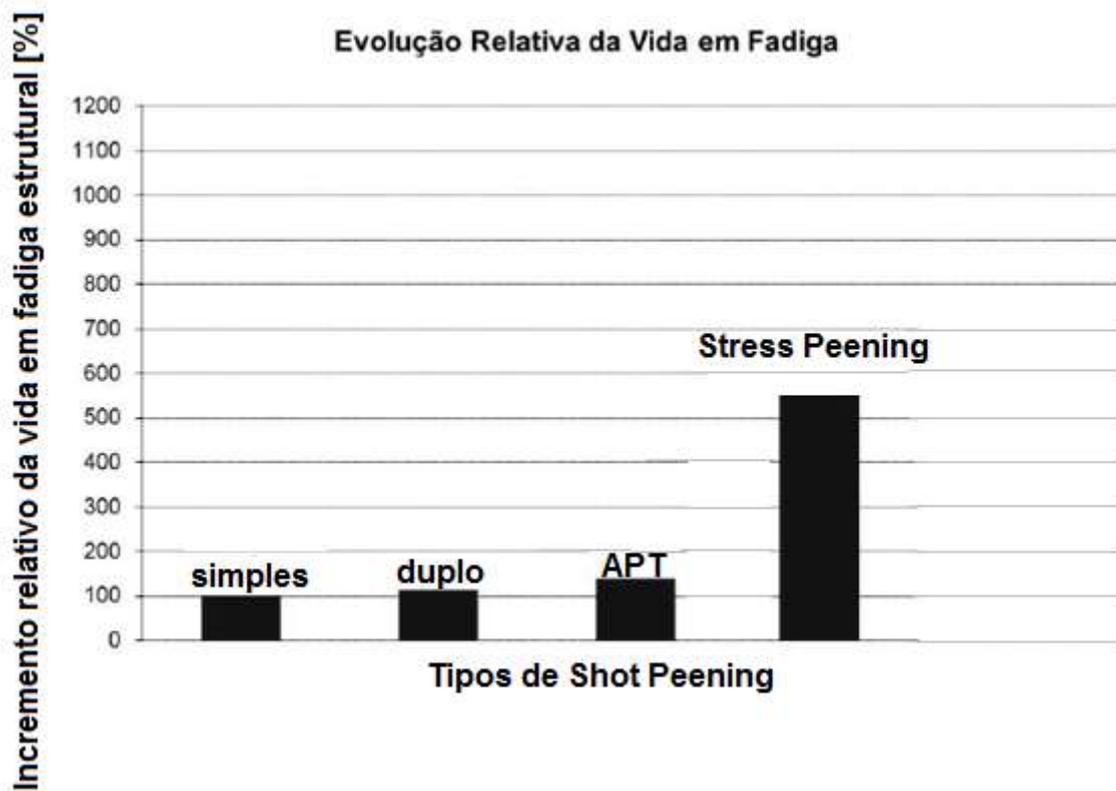


Figura 5- Incremento na vida em fadiga de um aço CrSi temperado e revenido com diferentes processos de jateamento.

Fonte: Scuracchio (2012) (Adaptado)

Conforme ilustrado na Figura 5, os processos de *shot peening* avaliados foram o simples, o duplo, com alívio parcial de tensões (APT) e do tipo *stress peening* (em que o material se encontra pré-tensionado). Sendo que, neste último caso, é possível obter um aumento percentual na vida em fadiga estrutural que ultrapassa os 500%.

2.2.1 Shot Peening

O *shot peening* é um processo de deformação à frio em que tensões compressivas são introduzidas em superfícies metálicas através de um jato de granalhas direcionadas a altas velocidades e sob parâmetros controlados. Além de aumentar a resistência a fadiga, este processo também atua no alívio de tensões

trativas e na limpeza da superfície exposta (ASM, 2007). Quando ocorre o impacto da granalha a alta velocidade na superfície da peça, uma deformação plástica no formato de uma pequena concavidade é produzida (TOTTEN, 2004), conforme ilustrado na Figura 6.

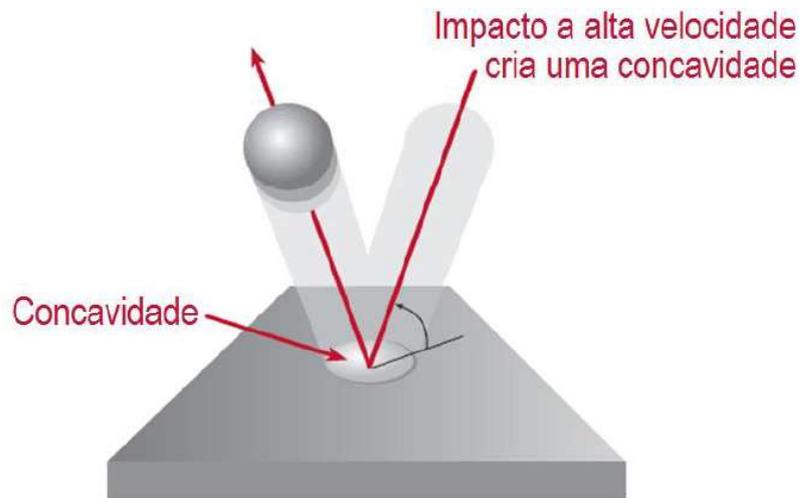


Figura 6- Impacto da granalha na superfície do material cria uma pequena concavidade.

Fonte: MIC (2016)

Abaixo de cada concavidade criada, o material que foi deformado tenta retornar à sua forma original, criando assim tensões compressivas (MELO E NUNES, 2013). A partir da sobreposição das concavidades resultantes de um jato de granalhas, forma-se uma camada uniforme de σ compressivas, conforme Figura 7 (MIC, 2016)



Figura 7- Camada uniforme de tensões residuais compressivas gerada abaixo das concavidades criadas pelo impacto das granalhas.

Fonte: MIC (2016)

À medida que essas σ compressivas são introduzidas na superfície, surgem σ trativas subsuperficiais de reação. Isso ocorre a fim de satisfazer as condições de equilíbrio de forças e momentos internos do material (STEPHENS, 2001). A Figura 8 ilustra esquematicamente essa distribuição de tensões.

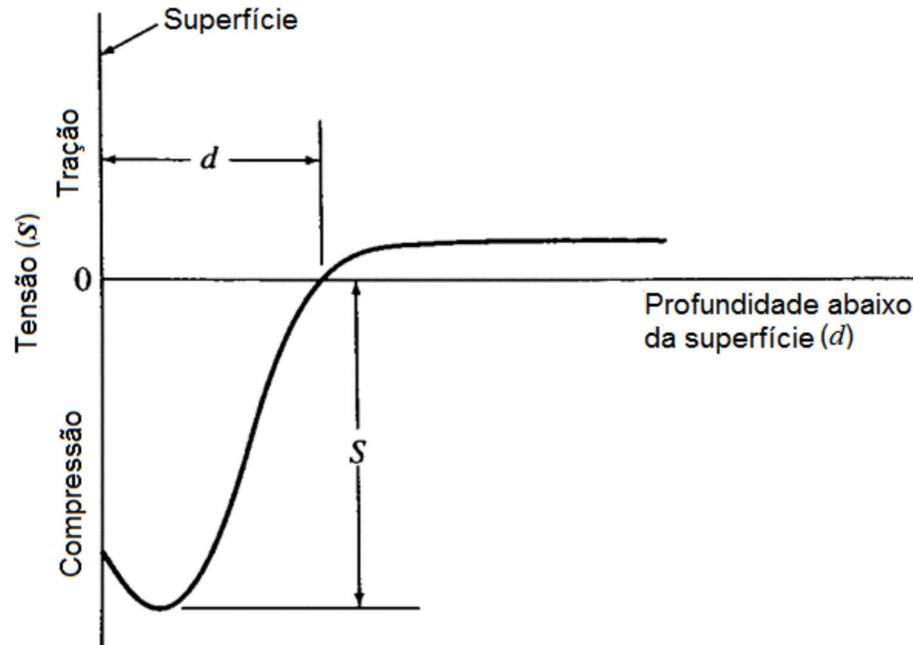


Figura 8- Distribuição de tensões residuais trativas e compressivas no material.

Fonte: Stephens (2001) (Adaptado)

A magnitude da σ que pode ser introduzida pelo *shot peening* é limitada, e depende principalmente do material da peça. Para metais de elevada dureza, a tensão pode chegar a pouco mais da metade do valor da tensão de escoamento do material (ASM, 2007; STEPHENS, 2001).

A profundidade da camada onde se concentram as σ compressivas, que podem variar entre 0,03 mm a 2 mm (ROCHA, 2010), e a rugosidade da superfície jateada são determinadas pelo material da peça e pela intensidade de jateamento. A intensidade de jateamento depende do tamanho, do peso e da dureza do material da gralha, da velocidade do jato, do ângulo de jateamento e do tempo de exposição (ASM, 2007; STEPHENS, 2001). Todos esses parâmetros, além da cobertura e saturação são variáveis importantes no controle dos resultados do *shot peening*

(OLIVEIRA, 2014). Nos itens a seguir, essas variáveis serão abordadas mais detalhadamente.

2.2.1.1 Granalhas

As granalhas empregadas no *shot peening* normalmente são de formato esférico e podem ser fabricadas em ferro, aço, vidro ou cerâmica (ZIRTEC, 2016). A Figura 9 apresenta uma comparação entre a profundidade e as σ compressivas obtidas para diferentes materiais.

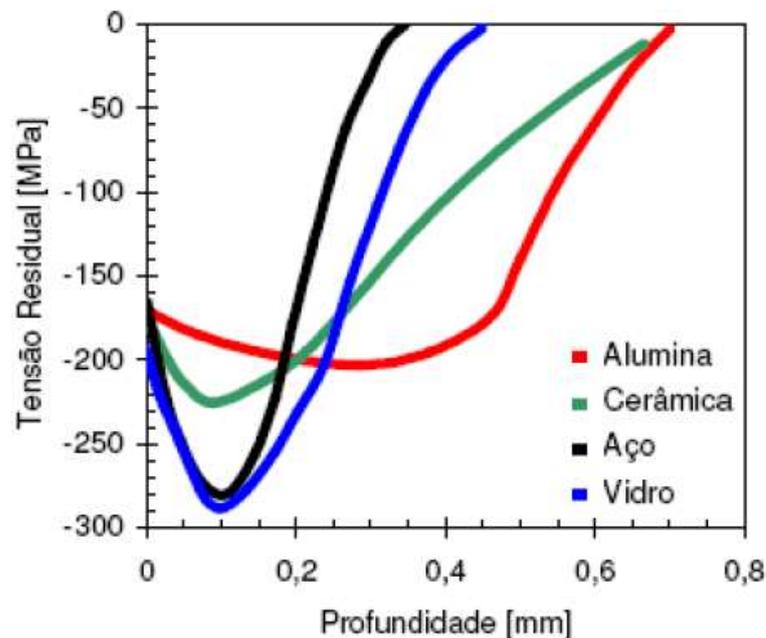


Figura 9- Relação entre a profundidade e a tensão residual utilizando diferentes materiais de granalhas.

Fonte: Rocha, 2010 (Adaptado)

A escolha do material da granalha vai depender das necessidades requeridas ao processo. Conforme ilustrado na Figura 9, o aço e o vidro possibilitam σ de compressão maiores até certa profundidade, enquanto que na alumina, as tensões são menores, mas mais profundas.

De acordo com a norma AMS-S-13165, a designação da granalha corresponde, aproximadamente, ao seu diâmetro em polegadas multiplicado por 10.000. A Tabela 1 apresenta os principais diâmetros de granalhas metálicas com sua respectiva denominação.

Tabela 1- Principais designações de granalhas metálicas e seu respectivo diâmetro em mm.

Designação	Diâmetro nominal (mm)
S780	2
S660	1,7
S550	1,4
S460	1,18
S390	1
S330	0,85
S280	0,71
S230	0,6
S170	0,42
S110	0,3
S70	0,18

Fonte: Oliveira, 2014 (Adaptado)

O diâmetro da granalha é outra variável que influencia as σ compressivas. Se outros parâmetros do processo se mantiverem constantes, um aumento no diâmetro da granalha resultará no aumento da intensidade Almen e da profundidade da camada compressiva (SUCHARSKI,2016).

A Figura 10 apresenta uma comparação entre a profundidade e os valores de σ para diferentes parâmetros de processo. O material jateado é um aço temperado com tensão máxima de resistência de 1300 MPa e as granalhas são de aço (OSK, 2016).

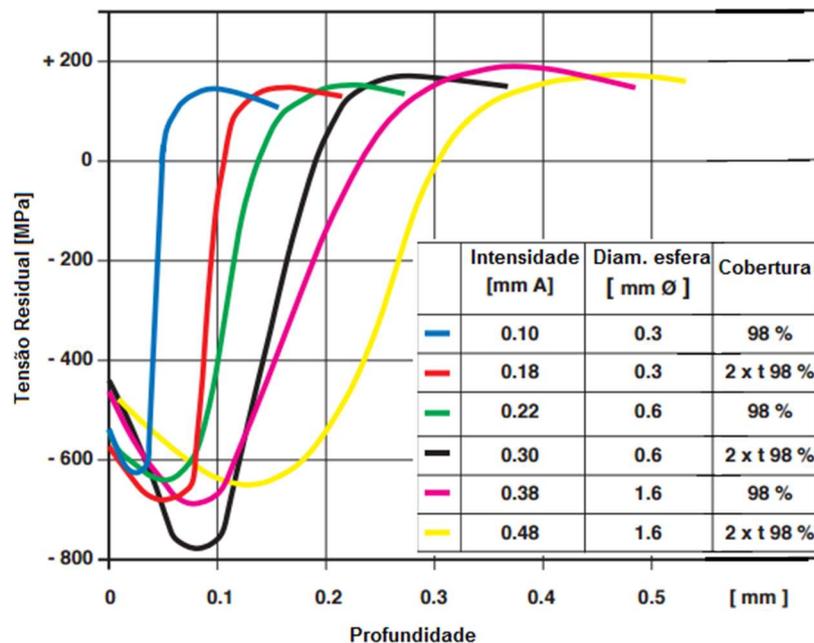


Figura 10- Relação entre a σ compressiva e profundidade para diâmetros diferentes.

Fonte: OSK (2016) (Adaptado)

Conforme observado na Figura 10, o módulo das σ compressivas são diferentes variando diâmetro da granalha, intensidade de jateamento (ver item 2.2.1.2) e a cobertura (ver item 2.2.1.3). Para um mesmo diâmetro intermediário, por exemplo, quanto maior a intensidade de jateamento e a cobertura, maior o módulo da σ compressiva. Quando avaliada a profundidade da máxima σ compressiva, quanto maior o diâmetro, para uma mesma cobertura, mais profundas são as σ .

Além de influenciar na distribuição da σ compressiva, as dimensões da granalha também influenciam na rugosidade da peça. A superfície que passa pelo processo de *shot peening* sofre alterações microscópicas que serão de maior magnitude quanto maior a massa da granalha (SUCHARSKI, 2016).

Assim como o diâmetro, a dureza da granalha influencia na magnitude da tensão compressiva, sendo que granalhas de dureza mais elevadas levam, até uma dada profundidade, às maiores tensões residuais compressivas. Este efeito pode ser verificado na Figura 11.

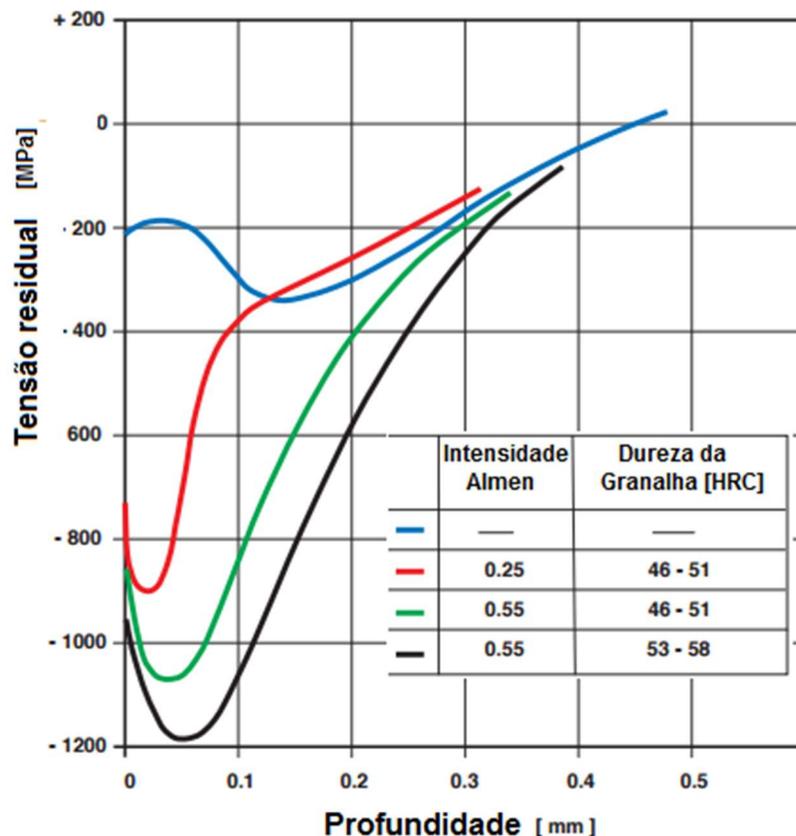


Figura 11- Relação entre a σ e a profundidade para materiais da granalha com durezas diferentes.

Fonte: OSK (2016) (Adaptado)

O gráfico da Figura 11 representa a relação entre a σ e a profundidade para um aço DIN 16MnCr5 endurecido que passou pelo *shot peening*. Verifica-se que para uma mesma intensidade Almen e cobertura (98%) a maior tensão residual compressiva, até determinada profundidade, se dá para a granalha de maior dureza.

Outro fator importante no processo do *shot peening* é a pressão com que as granalhas são aceleradas. De acordo com Oliveira (2011), esse parâmetro interfere diretamente na profundidade das σ compressivas geradas no material mas não influencia nos valores da σ máxima. Ademais, segundo Oliveira (2011), quanto maior for a pressão de jateamento, menor serão os valores de σ compressiva na superfície dos componentes tratados. Esse comportamento se dará em decorrência do relaxamento da rede que ocorre devido ao alto impacto das granalhas com a peça (BERTUOL, 2014).

Para acelerar as esferas, pode-se utilizar ar pressurizado- que gera uma força de aceleração- como ilustrado na Figura 12-a; ou a força centrífuga, gerada mecanicamente por uma roda centrífuga, conforme Figura 12-b. No primeiro caso, a velocidade da partícula é função do diâmetro e da pressão no bico de jateamento; no segundo, a velocidade da partícula é função da rotação e do diâmetro da roda centrífuga (ROCHA, 2010).

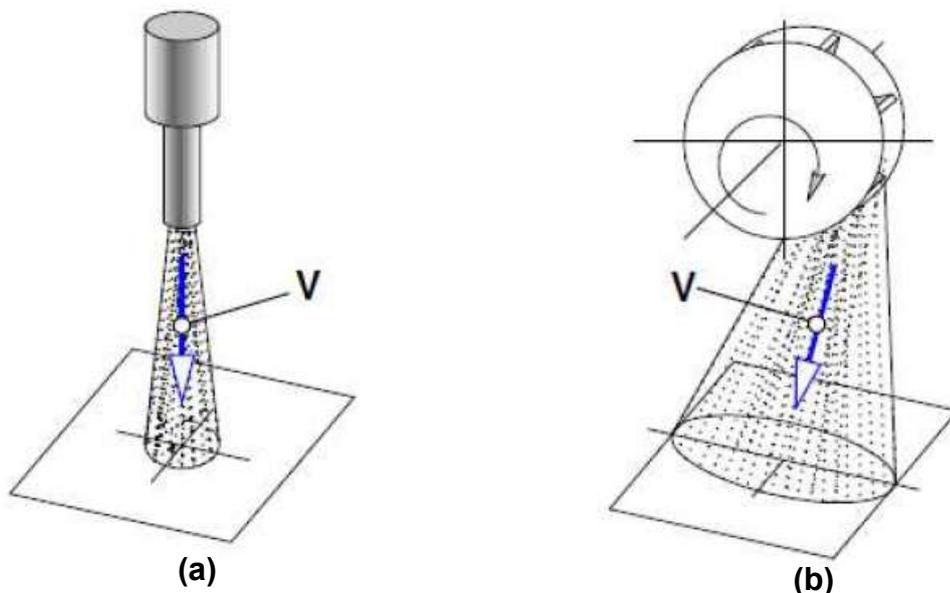


Figura 12- Métodos para acelerar as granalhas. a) utiliza a pressão do ar. b) utiliza a força centrífuga.

Fonte: Rocha (2010)

2.2.1.2. Intensidade de Jateamento - Método Almen

O método de Almen é o método padronizado mais utilizado nas indústrias para determinar a intensidade de jateamento (SCURACCHIO, 2012). John O. Almen padronizou três tipos de plaquetas de aço SAE 1070 iguais em dimensões, dureza (45HRC), planicidade e acabamento, variando apenas a espessura (ALMEN, 1963). A Tabela 2 apresenta os três tipos de padrões desenvolvidos.

Tabela 2- Tipos de plaquetas padronizadas para medir intensidade Almen

Tipo	Espessura (mm)	Aplicação
N	0,79±0,02	Usadas para pequenas intensidades como as obtidas em esferas de vidro
C	2,39±0,02	Mais espessas das tiras Almen, é utilizada em grandes intensidades de jateamento, geralmente granalhas de aço
A	1,29±0,001	Normalmente utilizadas para avaliar processos de <i>shot peening</i> com granalha de arame cortado ou granalha de aço. São as mais utilizadas.

Fonte: Autoria própria¹

Essa padronização está de acordo com as normas SAE AMS 2430 e SAE J442 (ZIRTEC, 2016).

Para realização da medição de intensidade utiliza-se um bloco padronizado para fixação das plaquetas e um dispositivo com instrumento de medição para determinar a deflexão das plaquetas (SCURACCHIO, 2012). A Figura 13 e a Figura 14 apresentam os dispositivos usados na indústria atualmente.

¹ Tabelas ou imagens não referenciadas são de autoria própria.



Figura 13- Bloco padrão para fixação das plaquetas padronizadas.

Fonte: Zirtec (2016)



Figura 14- "Almen Gauge" - Dispositivo para medir a deflexão das plaquetas.

Fonte: Zirtec (2016)

Para determinação da intensidade Almen, com a plaqueta de dimensão padronizada fixada no bloco, a superfície de apenas um dos lados da plaqueta é jateada e essa indução de tensões desiguais provoca um encurvamento da placa. A medida da deflexão (medido no ponto oposto ao lado jateado) e o tipo da placa definem a intensidade Almen (ASM, 2007). Por exemplo, um número Almen 0,35A (em mm) significa que a intensidade a ser aplicada deve provocar uma deflexão na plaqueta "A" de 0,35 mm (ROCHA, 2010). A Figura 15 apresenta esquematicamente a obtenção dessa intensidade.

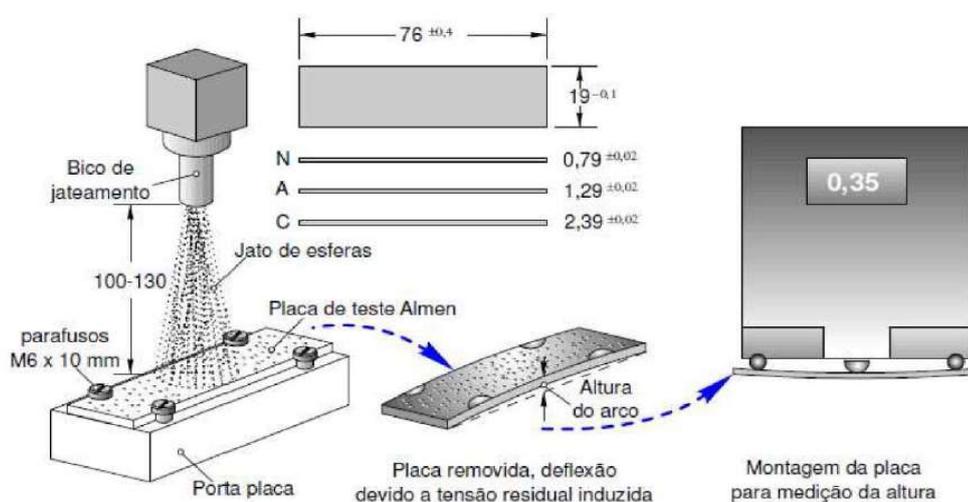


Figura 15- Esquema de obtenção para intensidade Almen.

Fonte: Rocha (2010)

É importante encontrar uma intensidade de jateamento apropriada, uma vez que uma intensidade elevada pode gerar σ trativas subsuperficiais excessivas, além de aumentar a rugosidade superficial. Por outro lado, uma intensidade insuficiente não é eficaz para aumentar a resistência à falha por fadiga (STEPHENS, 2001).

A Figura abaixo apresenta uma relação entre os parâmetros do *shot peening* (diâmetros de granalha e pressão de jateamento) para se obter determinada intensidade de jateamento.

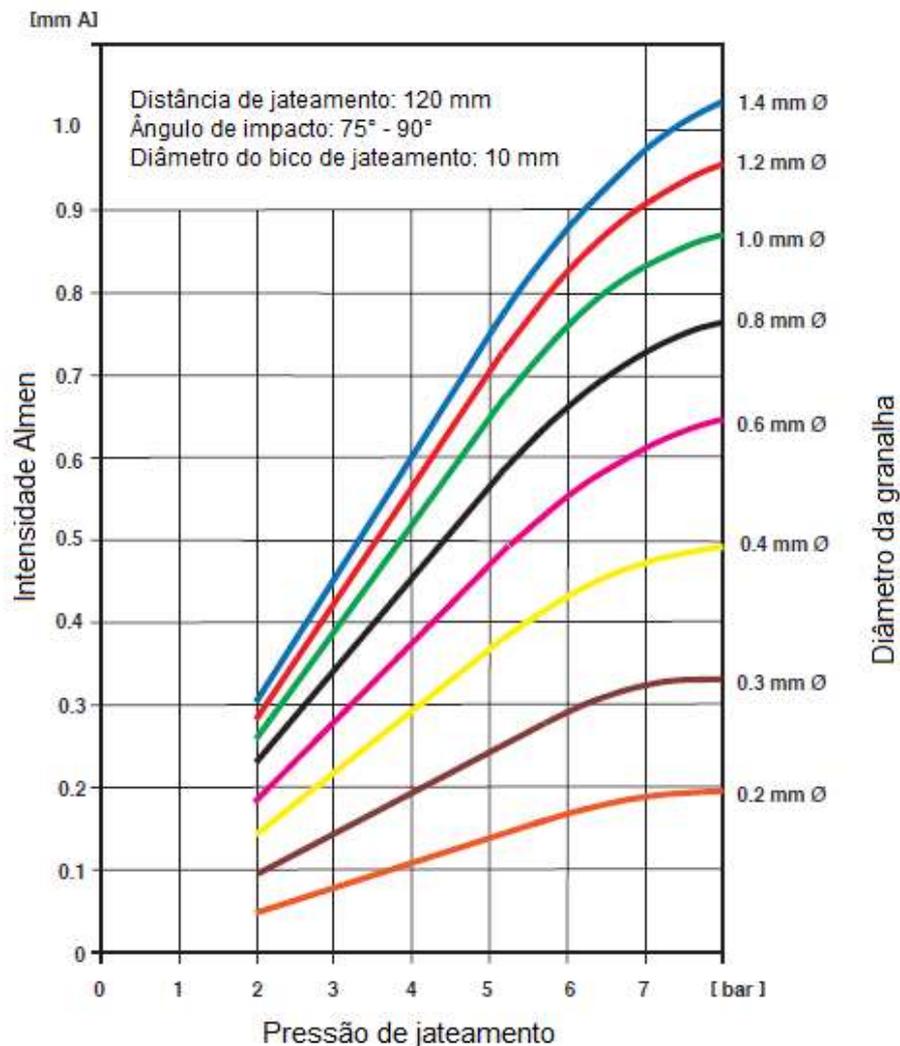


Figura 16-Seleção de parâmetros de ensaio (diâmetro de granalha e pressão de jateamento) para obtenção de determinada Intensidade de jateamento

Fonte: OSK (2016) (Adaptado)

A profundidade da tensão compressiva pode ser relacionada com base na intensidade de jateamento e na dureza do material, como representado no gráfico da Figura 17.

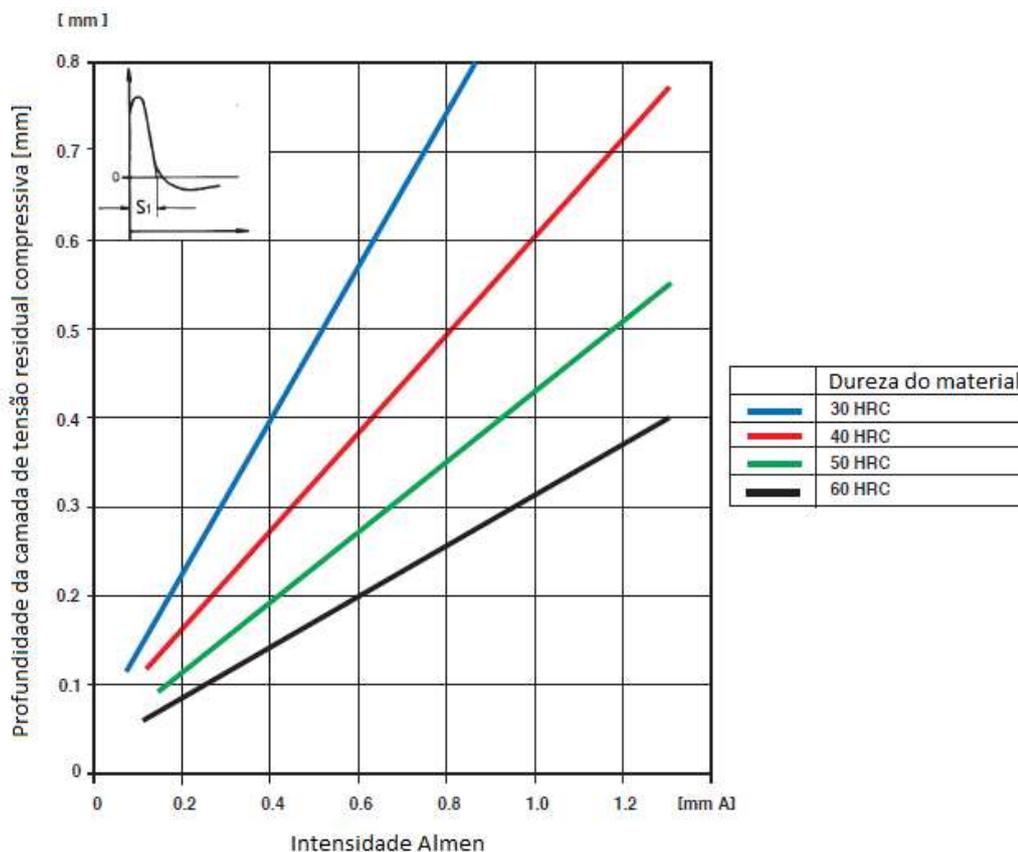
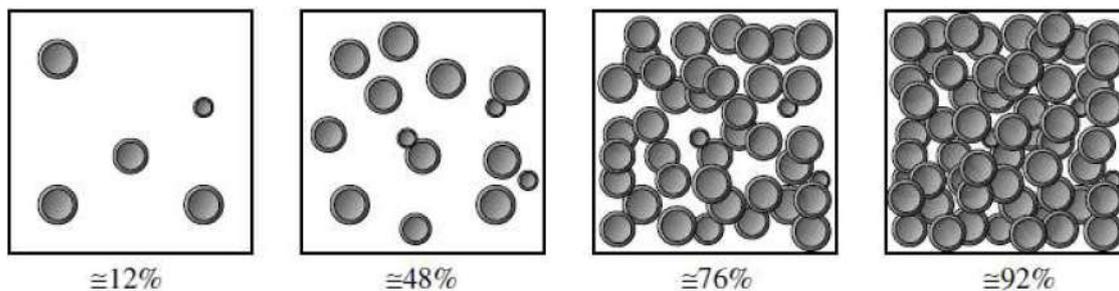


Figura 17- Intensidade de jateamento em função da camada desejada de tensão residual compressiva para diferentes materiais sendo jateado.

Fonte: OSK (2016) (Adaptado)

2.2.1.3. Cobertura e Saturação

Além de especificar a intensidade Almen, outro parâmetro importante é a cobertura. Dependendo de como se realiza o *shot peening*, uma área da superfície total pode ser mais atingida pelas esferas que outras. A Figura 18, apresenta 4 exemplos de percentuais de cobertura diferentes.



**Figura 18- Diferentes percentuais de cobertura de jateamento.
Fonte: Rocha (2010)**

A cobertura é diretamente influenciada pela distância e angulação dos bicos de jateamento em relação a superfície (a variação desses parâmetros altera a direção dos jatos, conseqüentemente a área que vai ser atingida pelas granalhas).

Outro fator determinante para o controle das condições de cobertura especificadas é o tempo de exposição. Ele é controlado de forma a determinar o ponto de saturação, que corresponde ao ponto onde com o dobro do tempo a intensidade Almen aumenta menos que 10% (ZIRTEC,2016). Na Figura 19 é apresentada uma curva típica de saturação.

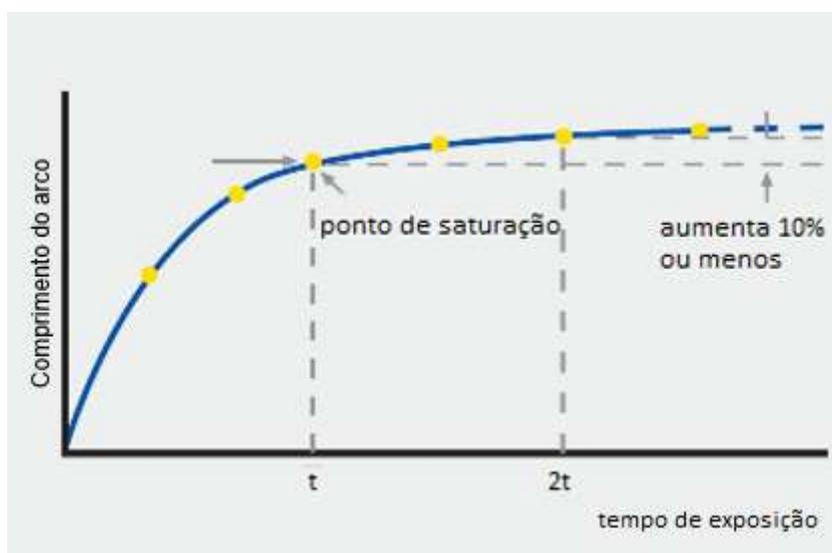


Figura 19- Curva típica de tempo de exposição versus altura Almen, representando ponto de saturação.

Fonte: Wheelabratorgroup, 2016 (Adaptado)

2.3. Medição de tensões residuais

Existe uma série de técnicas para medição de tensão residual. A Tabela 3 apresenta uma síntese com as mais comuns.

Tabela 3- Métodos mais comuns para medição de tensão residual

Métodos	Comentários
Remoção de camadas	Camadas retiradas por ataque químico, polimento eletrolítico (pode ser aliada do método de difração de raios-X).
Seccionamento	Cortes parciais transversais ou longitudinais ao eixo de peças assimétricas.
Método do furo cego	Normalizado pela ASTM-E837 (execução de furo de 0,8 a 3,2 mm de diâmetro).
Difração de raios-X	Normalizado pela SAE J784a (variação da distância entre planos atômicos).
Difração de nêutrons	Semelhante ao processo de difração de raios-X, mas com inspeção em todo o volume.
Ultrassônico	Variação de velocidade de ondas ultrassônicas no interior do material.

Fonte: Rocha (2010) (Adaptado)

O método mais utilizado atualmente para medição é o de difração por raios-X (SCURACCHIO, 2012). Nesse método, a tensão residual é calculada a partir de alterações na distância interplanar geradas pela deformação no cristal do agregado policristalino, comparado aos parâmetros de rede do cristal do mesmo material sem sofrer deformação (SOUZA, 2012).

2.3.1 Difração de Raios-X

O método de difração de raios-X foi proposto inicialmente por Lester e Aborn em 1925. Desde então, houve um notável progresso na metodologia utilizada.

A medição da tensão residual por difração de raios-X não ocorre de forma direta. Conhecendo o comprimento de onda do raio incidente na amostra, λ , e o ângulo de difração, 2θ , é possível determinar a variação na distância interplanar antes e depois do carregamento ter sido aplicado utilizando a lei de Bragg (SCURACCHIO, 2012), apresentada na Equação (2).

$$\lambda = 2d \cdot \sin\theta \quad (2)$$

Quando um feixe de raios-X interage com a estrutura cristalina, parte desse feixe é disperso em forma de calor ou absorvida pelo material, e outra parte é difratada. Conforme apresentado na Figura 20.

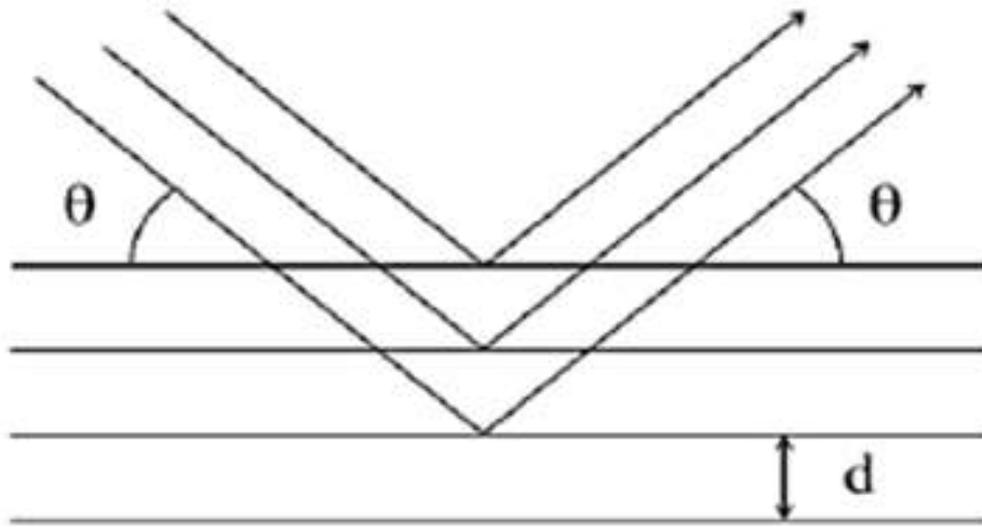


Figura 20- Representação da incidência e da difração de um feixe de raios-X na estrutura cristalina de um material.

Fonte: Freund e Suresh (2003) (Adaptado)

Os raios dispersos podem ser anulados, caso a geometria do cristal faça com que haja interferência destrutiva, ou somados, caso a interferência seja construtiva (ASM, 1998). Quando houver interferência construtiva da difração, haverá um aumento na intensidade do feixe (surgimento de picos no difratograma), como ilustra a Figura 21.

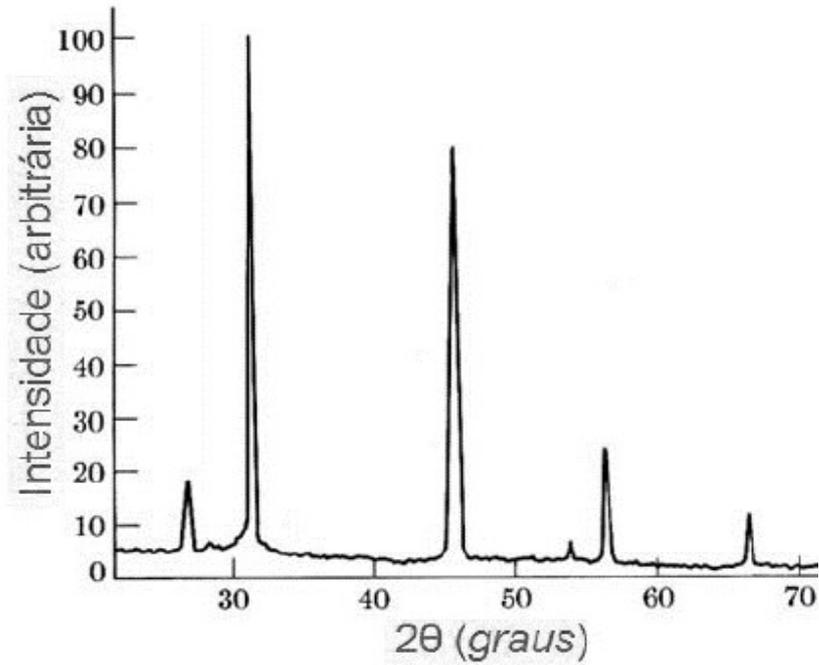


Figura 21- Exemplo de interferência construtiva, onde há um aumento na intensidade do feixe.

Fonte: Sousa (2012)

A existência de tensões residuais em um material provoca mudanças em seu espaçamento interplanar, e em consequência disso, podem ser observadas mudanças nos parâmetros de difração, como ilustra a Figura 22.

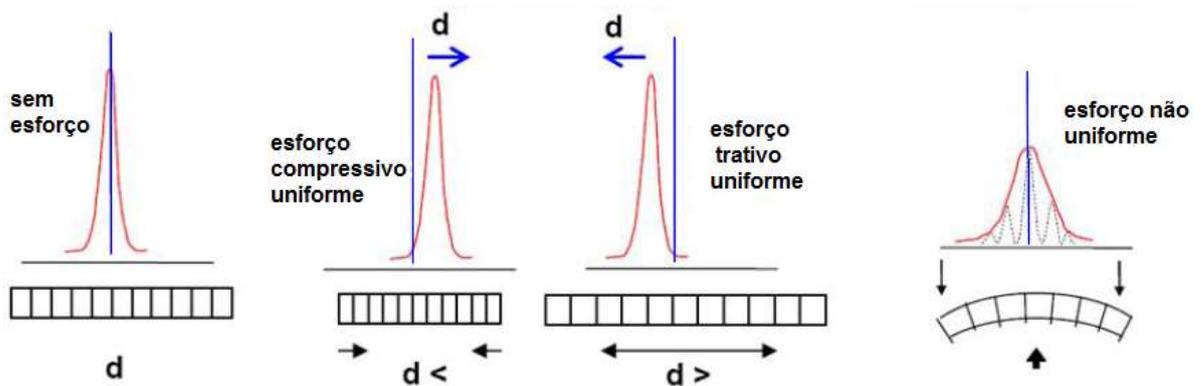


Figura 22- Variação nos picos de difração devido a diferentes esforços aplicados.

Fonte: Sousa (2012) (Adaptado)

A Figura 23-a ilustra o arranjo das tensões principais no material, além da tensão residual σ_ϕ , em uma direção qualquer \overline{OC} , que faz um ângulo ϕ com a direção principal

“1”. Durante a realização da medição da distância interplanar (d), ocorre variação do ângulo ψ , pertencente ao plano \overline{OBC} . Esse ângulo também pode ser visualizado entre a direção normal da superfície e a bissetriz do feixe de raios-X, como se vê na Figura 23-b (CULLITY, 1978; ASM, 1998).

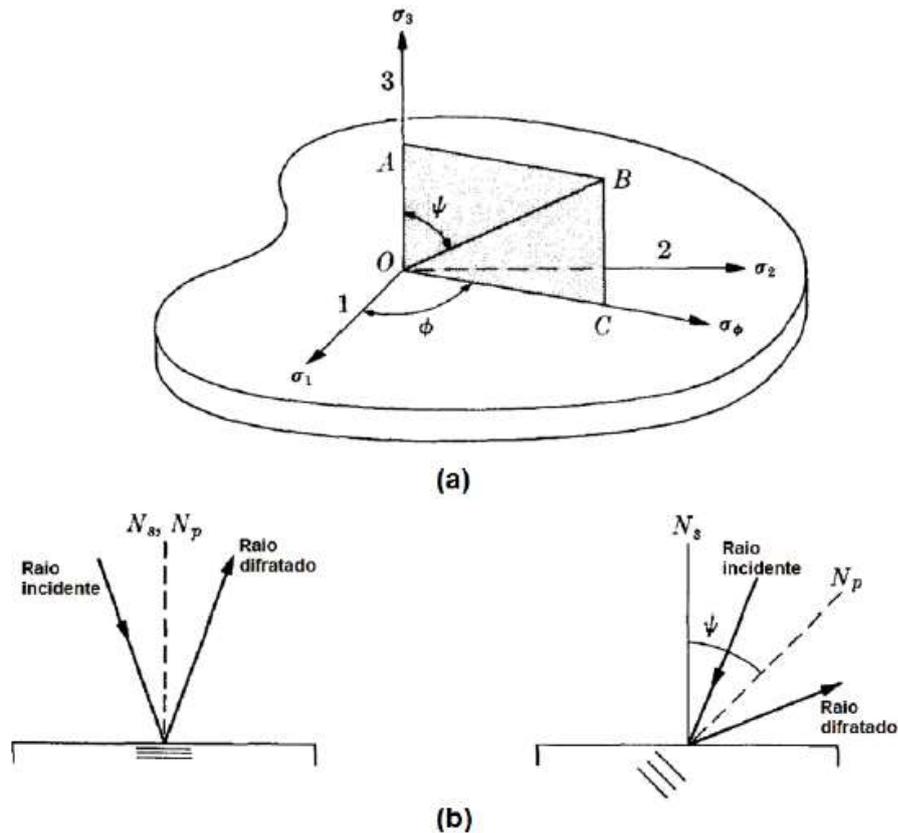


Figura 23- (a) Tensão residual na direção \overline{OC} e (b) Variação da orientação do feixe de raios-X em ψ graus.

Fonte: Cullity (1978) (Adaptado)

A medição da d é feita para a família de planos que é perpendicular à bissetriz do feixe de raios-X. Para cada valor de ψ será feita a medição de uma orientação cristalográfica diferente. Para determinar o valor da tensão residual são necessárias pelo menos duas medições, em geral uma com $\psi = 0^\circ$ e outra com $\psi = 45^\circ$ (CULLITY, 1978; ASM, 1998). Os resultados gerados nas medições devem ser plotados em um gráfico $d\phi \times \sin^2 \psi$, onde a ordenada representa a distância interplanar naquela direção e na abscissa, o \sin^2 do ângulo utilizado. Um exemplo de gráfico obtido é representado na Figura 24.

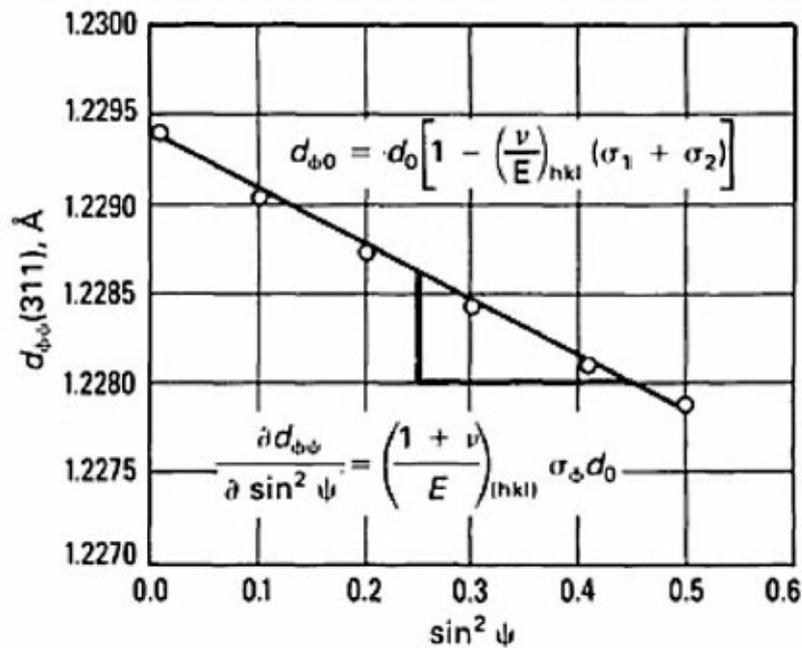


Figura 24- Distância interplanar versus $\sin^2\psi$ para uma amostra de alumínio 5056-O submetida a shot peening, apresentando tensão residual de -148 MPa.

Fonte: ASM (1998)

A partir do coeficiente angular da reta gerada, do inverso do coeficiente linear, além do módulo de elasticidade (E) e do coeficiente de Poisson (ν) é possível determinar a σ_{ϕ} , utilizando a Equação (3).

$$\sigma_{\phi} = \left(\frac{E}{1 + \nu} \right) \cdot \frac{1}{d_{\phi_0}} \cdot \frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} \quad (3)$$

Onde:

σ_{ϕ} -Tensão residual na direção ϕ ;

E - Módulo de elasticidade;

ν - Coeficiente de Poisson;

d_{ϕ_0} - Distância interplanar quando o material não está submetido a um estado de tensões;

$d_{\phi\psi}$ - Distância interplanar quando o material está submetido a um estado de tensões medido em um determinado ângulo ψ .

Em geral os equipamentos de difração de raios-X possuem a configuração como a ilustrada na Figura 25. Para permitir a medição da distância interplanar em múltiplas direções pelo método do $\sin^2\psi$, é necessário que a amostra seja rotacionada. Existem dois métodos que possibilitam essa rotação: o método Ômega, em que a amostra é rotacionada ao redor do eixo ω , em consequência disso, valores de ψ serão adicionados ou subtraídos de θ ; e o método Chi, em que a amostra deve ser rotacionada ao redor do eixo χ , e da mesma forma que no método anterior haverá variação dos valores de ψ . A escolha do método dependerá do equipamento disponível, pois nem todos os difratômetros possibilitam o uso do método χ (FITZPATRICK *et al*, 2005). A representação dos eixos ω e χ também são apresentados na Figura 25.

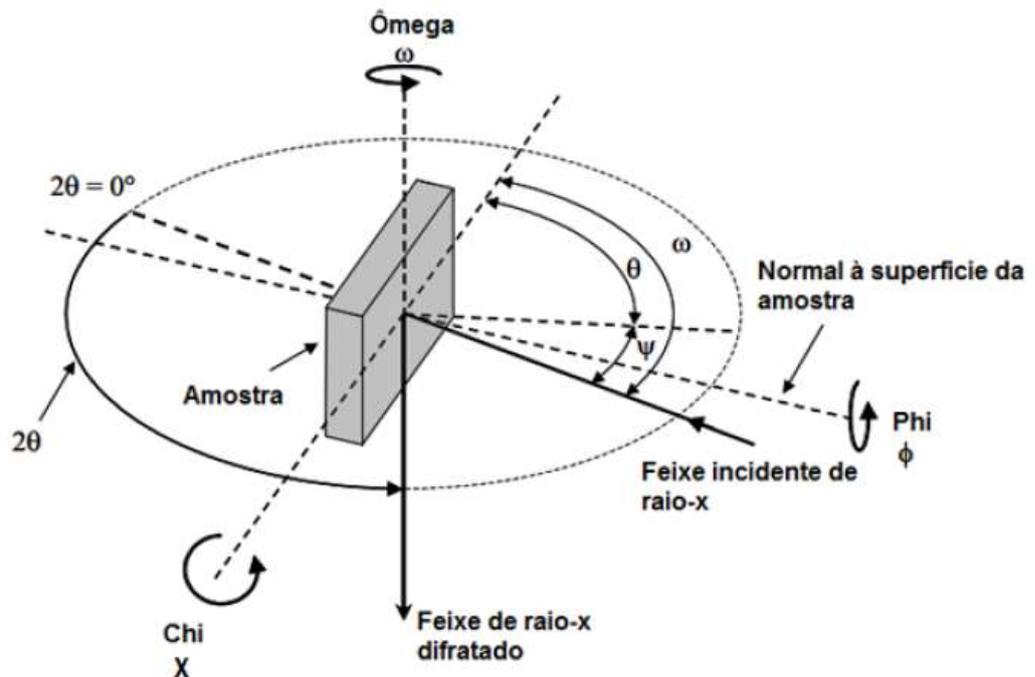


Figura 25- Ângulos e rotações utilizadas na medição de tensão residual por difração de raios-X.

Fonte: Fitzpatrick et al (2005)

A fim de evitar que novas tensão sejam introduzidas no material, para a realização de medições sucessivas de σ , é necessário que pequenas porções do material sejam retiradas. Em geral, essa remoção é feita por polimento eletrolítico ou por ataque químico. Métodos mecânicos de remoção devem ser evitados, ainda que conduzidos em condições pouco severas (ASM, 1998).

Quando uma camada de material é removida ocorre uma mudança no estado de tensões na superfície. Em geral há relaxação da nova superfície exposta. Então, é necessário que seja feita a correção dos valores de tensão medidos para gerar uma nova curva, como exemplifica a Figura 26. Essa correção envolve a integração da distribuição de tensões residuais medidas ao longo das camadas removidas, da superfície original até a superfície exposta. Porém, para pequenas porções de material removido, ou para baixas tensões residuais envolvidas a correção não é significativa (ASM, 1998).

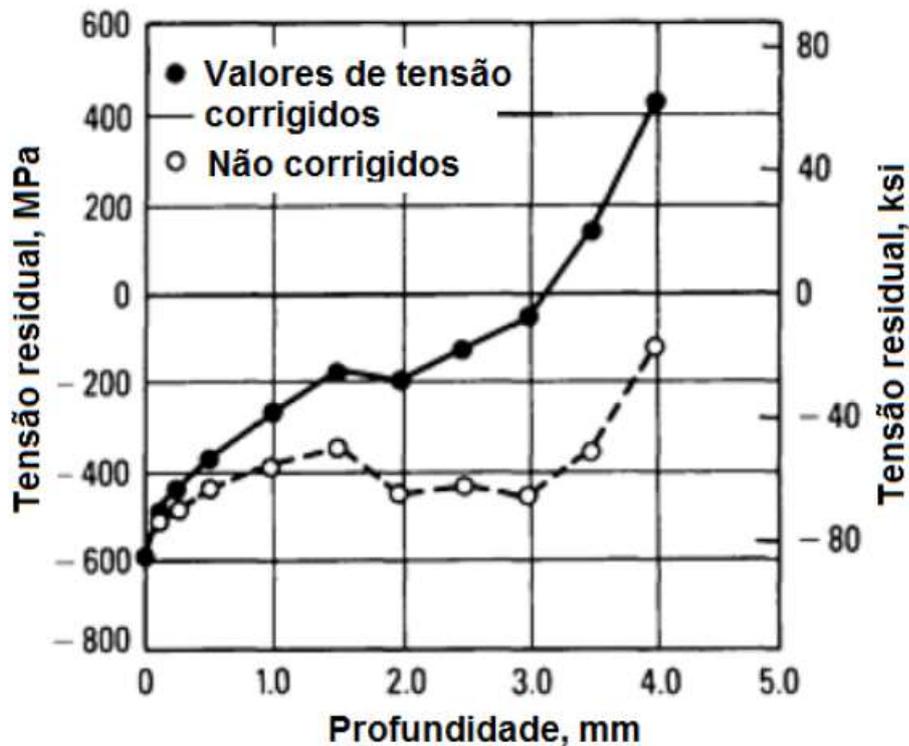


Figura 26- Comparação entre valores do perfil de tensão residual corrigido e não corrigido para um aço AISI 1070 cementado.

Fonte: ASM (1998) (Adaptado)

2.4. Rugosidade

Para caracterizar uma superfície, pode-se utilizar um conjunto de parâmetros. A determinação desses parâmetros depende da particularidade de cada aplicação (SUCHARSKI, 2016).

2.4.1 Parâmetros de Rugosidade 3D

Os parâmetros de rugosidade 3D podem ser classificados em diferentes tipos. Dentre esses tipos, pode-se citar os parâmetros de amplitude e os espaciais. A discussão a seguir se dará para dois parâmetros classificados pela amplitude e dois classificados como espaciais.

O S_{sk} e o S_{ku} são parâmetros de amplitude. O primeiro, chamado *Skewness*, avalia a distribuição gaussiana de vales, picos e platôs. S_{sk} igual a zero, representa uma superfície gaussiana; um valor positivo representa a existência de mais picos e um valor negativo, vales mais profundos e estreitos (DONG *et al*, 1994). A Figura 27 apresenta a distribuição para esses três casos.

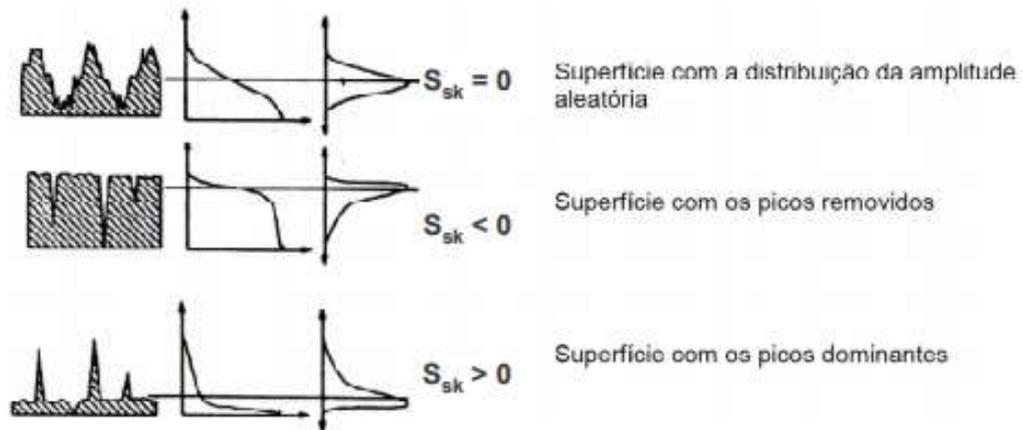


Figura 27- Classificação dos valores de S_{sk} .

Fonte: Farias (2009)

O segundo parâmetro, S_{ku} (Curtose da Distribuição das Alturas da Topografia) é a medida do grau de afinamento ou achatamento da distribuição de picos de alturas (FARIAS, 2009). Para uma superfície com distribuição Gaussiana, o parâmetro S_{ku} é igual a três; para altos picos ou vales excessivamente profundos, seu valor é maior do que três e para a falta deles, o valor é menor do que três. A figura abaixo ilustra esse comportamento.

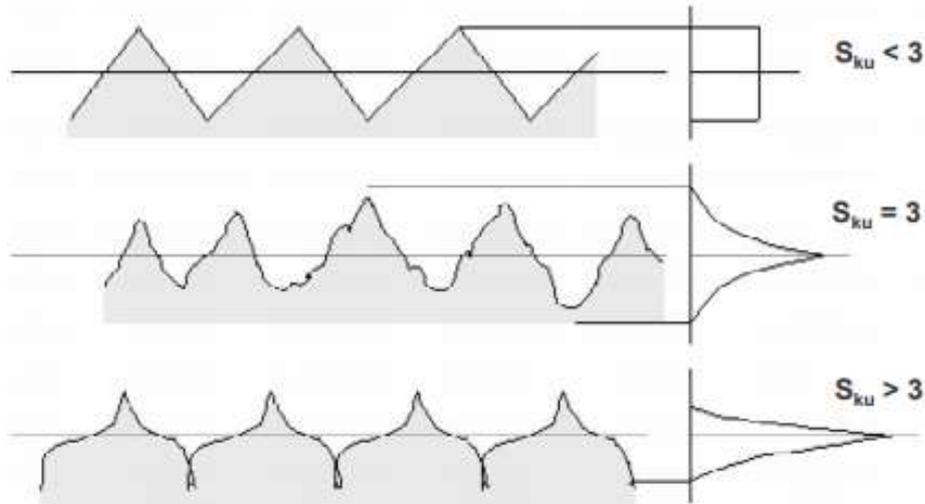


Figura 28-Classificação de valores para S_{ku} .
Fonte: Farias (2009)

A análise dos parâmetros S_{sk} e S_{ku} deve ser realizada em paralelo para melhor interpretação da superfície. A Figura 29 e a Figura 30 ilustram duas superfícies com diferentes valores de S_{sk} e S_{ku} . Na primeira, os valores de S_{sk} e S_{ku} são positivos e maiores que 3, o que representa uma superfície com predominância de picos e picos mais finos. A Figura 30 por sua vez, apresenta valor de S_{sk} próximo a zero e S_{ku} menor que 3, o que compete a uma superfície periódica com picos largamente espalhadas na distribuição.

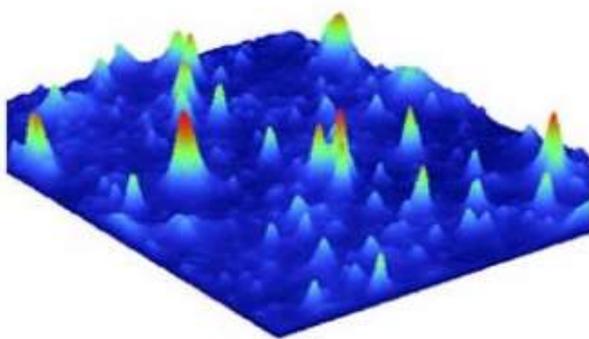


Figura 29- Superfície com múltiplos picos (s_{sk} igual a 3,20 e S_{ku} igual a 18,71).

Fonte: Michigan Metrology (2017)

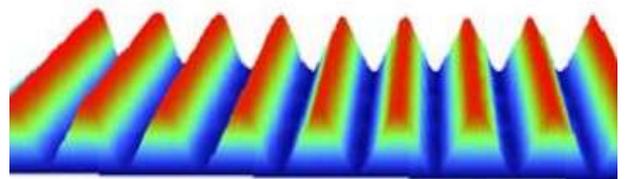
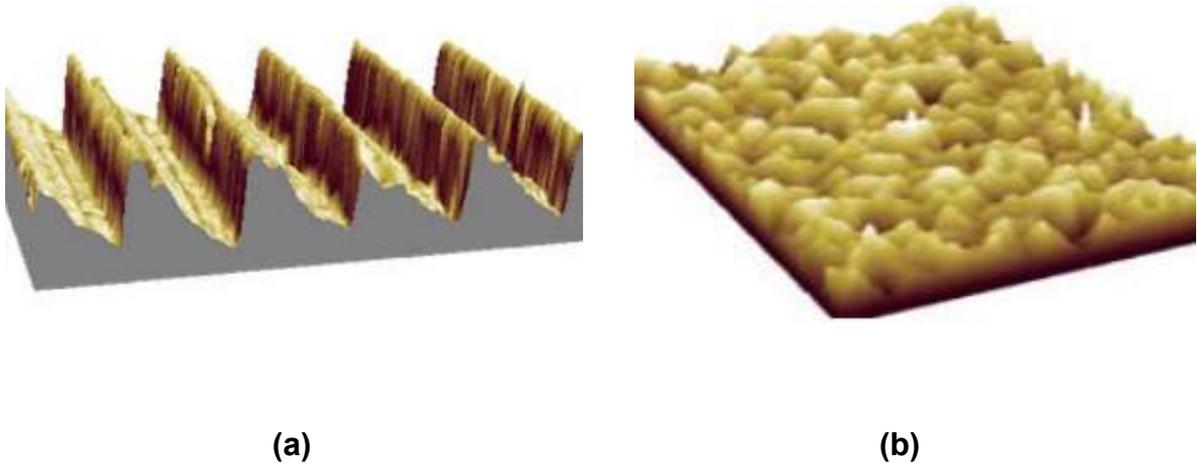


Figura 30- Superfície periódica (s_{sk} igual 0,16 e S_{ku} igual a 1,63).

Fonte: Michigan Metrology (2017)

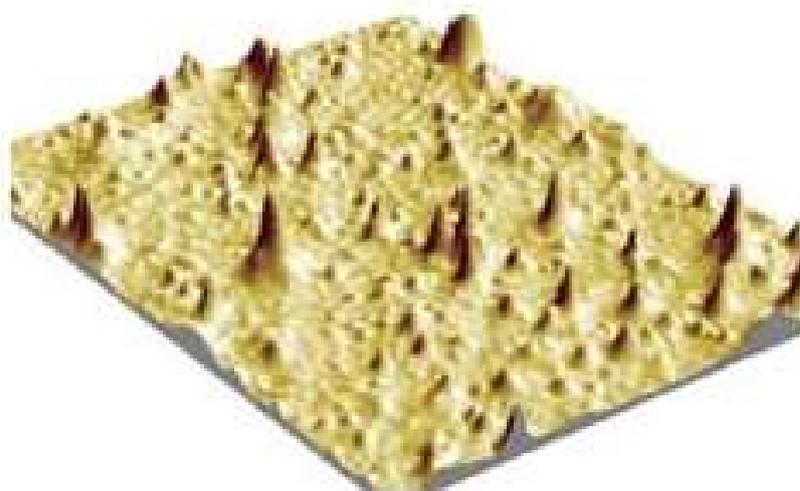
Como parâmetros espaciais pode-se citar o *Str* e o *Sds*. O *Str* é a relação de aspecto da textura, é uma medida da isotropia espacial ou direcionalidade da textura da superfície. Para obter uma superfície dominante anisotrópica, o parâmetro *Str* tenderá para 0, enquanto que uma textura espacialmente isotrópica resultará num *Str* próximo de 1 (MICHIGAN METROLOGY, 2017). A Figura 31 ilustra a comparação entre uma superfície anisotrópica e isotrópica.



**Figura 31- Superfície com diferente *Str*. (a) *Str* igual 0,11. (b) *Str* igual a 0,88.
Fonte: Michigan Metrology (2017)**

A Figura 31(a) apresenta uma superfície anisotrópica, com *Str* igual a 0,11. Figura 31-(b) ilustra uma superfície isotrópica, com *Str* igual a 0,88.

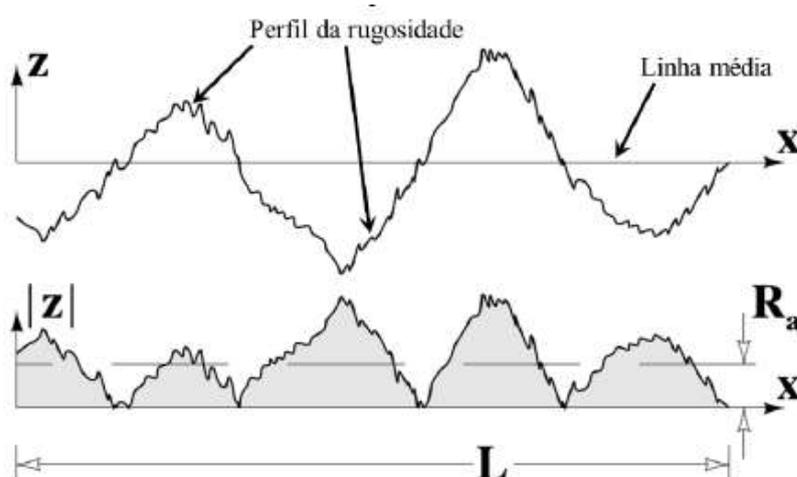
O parâmetro *Sds* (*Density of summits* – Densidade de cume) é definido como o número de cumes por unidade de área, tal que um ponto da superfície é dito como sendo um cume se e somente se tal ponto for maior que os seus oito vizinhos mais próximos (STOUT *et al.*, 1994). Na figura abaixo é possível visualizar um exemplo de superfície com *Sds* igual a 2600 cumes/mm².



**Figura 32- Superfície com Sds igual a 2600 cumes/mm².
Fonte: Michigan Metrology (2017)**

2.4.2 Parâmetros de Rugosidade 2D

Existe uma série de parâmetros 2D de rugosidade, entre eles pode-se citar o R_a , R_q e o R_t . A rugosidade média, R_a , é definida como o desvio médio de um perfil em uma linha reta ao longo do comprimento de avaliação da superfície (HUTCHINGS, 1992), conforme apresentado na Figura 33.



**Figura 33- Representação da rugosidade média R_a .
Fonte: SUCHARSKI (2016)**

Mesmo sendo um parâmetro muito utilizado, o Ra não caracteriza a variabilidade de diferentes locais da rugosidade sobre o perfil analisado. Esse comportamento pode ser observado na figura abaixo, onde para um mesmo Ra as superfícies têm comportamento distintos.

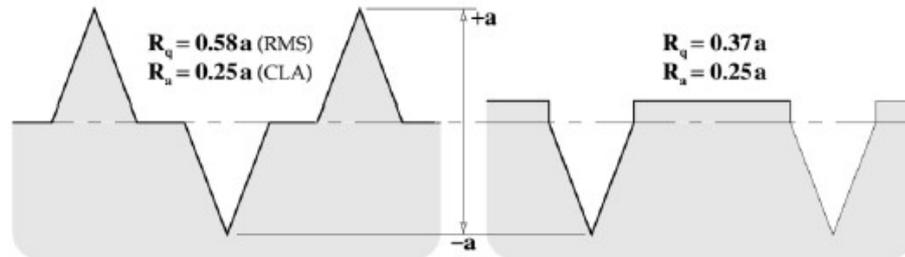


Figura 34- Diferentes superfícies para um mesmo valor de Ra .
Fonte: SUCHARSKI (2016)

De acordo com a NBR ISO 4287, o parâmetro Rq é definido como a raiz quadrada da média dos valores das ordenadas, $y(x)$, no comprimento de amostragem.

O parâmetro de rugosidade Rq pode ser utilizado para determinação do modelo de lubrificação em contatos não conformes (limite, misto ou elasto-hidrodinâmicos (EHD)). A espessura específica do filme (Λ) que é definida como a espessura mínima de filme no centro da área dividida pela rugosidade superficial composta das duas superfícies, pode ser calculada por meio da equação abaixo (NORTON, 2004).

$$\Lambda = \frac{h_c}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}} \quad (4)$$

Na Equação (4) h_c é a espessura do filme de lubrificante no centro da área de contato e R_{q1} e R_{q2} são as rugosidades médias das duas superfícies em contato. O denominador da Equação (4) é denominado rugosidade superficial composta. A espessura do filme no centro da área de contato pode ser relacionada à espessura mínima do filme h_{min} na extremidade da pista de contato, como apresentado na Equação (5) (NORTON, 2004).

$$h_c = \frac{4}{3} h_{min} \quad (5)$$

O parâmetro R_t é definido como a diferença entre o maior pico e o menor vale ao longo do comprimento medido (MICHIGAN METROLOGY, 2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 35 apresenta um fluxograma das atividades desenvolvidas no presente trabalho. Nos itens 3 a 3.3 estas atividades são descritas detalhadamente.

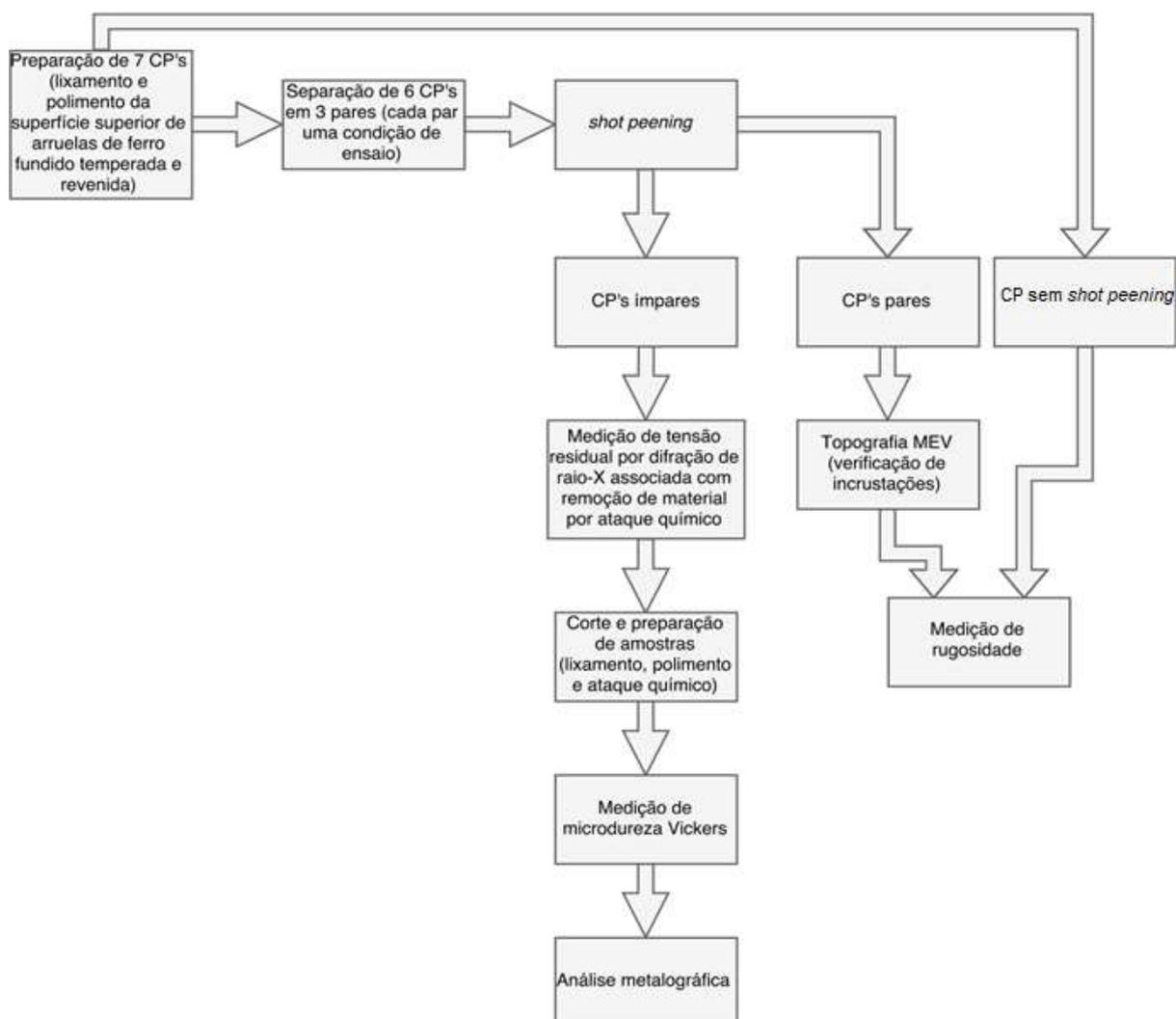


Figura 35 - Fluxograma com a metodologia utilizada no trabalho

2.1. Corpos de Prova

Para desenvolvimento do trabalho foram utilizados 7 corpos de prova (CP) de ferro fundido nodular temperado e revenido (FTR) com matriz perlítica, do mesmo lote utilizado por Grabarski e Weigert (2015). A composição do FTR em estado de fornecimento é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4- Composição química do ferro fundido nodular (%p.).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Mo
3,61	2,43	0,13	0,048	0,004	0,47	0,042	0,14

Fonte: Wollmann (2012)

A geometria dos corpos de prova empregada no presente trabalho foi a mesma utilizada em trabalhos anteriores (WOLLMANN, 2012; MELO e NUNES, 2013; GRABARSKI e WEIGERT, 2015). A Figura 36 e a Figura 37 apresentam a representação do CP utilizado e a superfície do CP após lixamento em lixa d'água de granulometria 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 e polimento em alumina 1 μm , respectivamente.

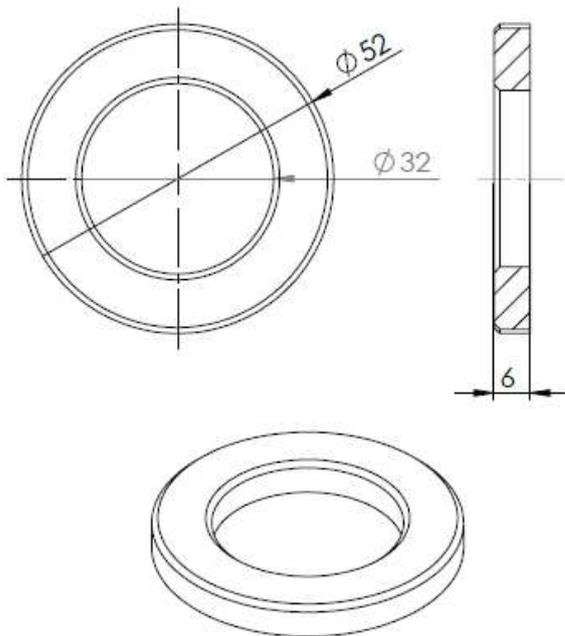


Figura 36- Representação dos corpos de prova para processamento



Figura 37- Corpo de prova polido

3.2 Shot Peening

O processo de *shot peening* foi realizado na empresa ZIRTEC, em São Paulo/SP. O equipamento utilizado foi o Zirtec, modelo ZP-9075Y, a ar comprimido e os certificados emitidos pela ZIRTEC, encontram-se no Anexo A.

Foram determinadas 3 condições de processamento sendo que para cada condição foram ensaiados dois CP's por vez. Os parâmetros de processamento são apresentados na Tabela 5. A condição 1 (CP's 1 e 2) foi a mesma utilizada no trabalho de Melo e Nunes (2013) e para as outras duas condições considerou-se a mesma intensidade Almen mas granalhas de aço com diâmetro nominal maior. A condição FFN-TRS representa os parâmetros utilizados no trabalho de Grabarski e Weigert (2015).

Tabela 5- Parâmetros de processamento

Condições	1	2	3	FFN-TRS
Corpos de Prova (CP)	1-2	3-4	5-6	-
Designação da Granelha	S110	S170	S230	S110
Diâmetro nominal da granelha (mm)	0,3	0,42	0,6	0,3
Material da granelha	Aço	Aço	Aço	Aço
Intensidade Almen (mmA)	0,364	0,364	0,364	0,362
Cobertura (%)	100	100	100	100
Pressão do ar (bar)	6,89	6,20	5,51	6,89
Velocidade do jato (m/s)	1320	1200	1090	-
Distância do jato (mm)	150 a 170	150 a 170	150 a 170	-
Ângulo do jato (°)	90	90	90	90

3.3 Caracterização dos corpos de prova

3.3.1 Tensão Residual

A metodologia para medição de tensão residual utilizada no presente trabalho foi a mesma utilizada por Grabarski e Weigert (2015), onde se associou a técnica de remoção por camadas com a técnica de medição por difração de raios-X. Após o *shot peening*, os CP's 1,3 e 5 passaram pela metodologia apresentada a seguir.

A remoção das camadas do material para permitir a medição das tensões na subsuperfície dos CP's foi feita por ataque químico, utilizando uma solução de 2/3 de ácido nítrico e 1/3 de água destilada. Essas proporções foram baseadas nas

proporções utilizadas por Grabarski e Weigert (2015). Para remoção do material, primeiramente, uma região de aproximadamente 6 mm x 10 mm do CP foi delimitada por papel *contact*, para garantir que o ataque químico ficasse restrito à área desejada. Uma camada de esmalte para as unhas foi aplicada sobre a interface do papel *contact* com o metal, para evitar seu descolamento. A espessura da região selecionada de cada CP foi medida antes do procedimento com um micrômetro digital com resolução de 0,001 mm. Após a medição, o verso de cada CP também foi recoberto com papel *contact*, para preservar a referência dimensional. Após essa preparação prévia, o CP foi posicionado sobre um vidro de relógio e o ácido pipetado sobre a região demarcada para o ataque químico. Após a limpeza (com água corrente e detergente) e secagem do CP, foi realizada uma segunda medição para determinar a espessura da camada de material removida na região atacada. Cada ataque de 60 segundos removia camadas de aproximadamente 10 a 15 μm . Após o procedimento de corrosão, a amostra era encaminhada para a medição de tensão residual por difração de raios-X. Na Figura 38 é possível visualizar como fica a aparência da região atacada.



Figura 38- Região atacada do CP.
Fonte: Grabarski e Weigert (2015)

As medições de tensão residual por difração de raios-X foram realizadas no difratômetro Shimadzu, modelo XRD 7000 da UTFPR. A montagem do CP no difratômetro, com destaque para o emissor e para o receptor de Raios-X é apresentada na Figura 39.

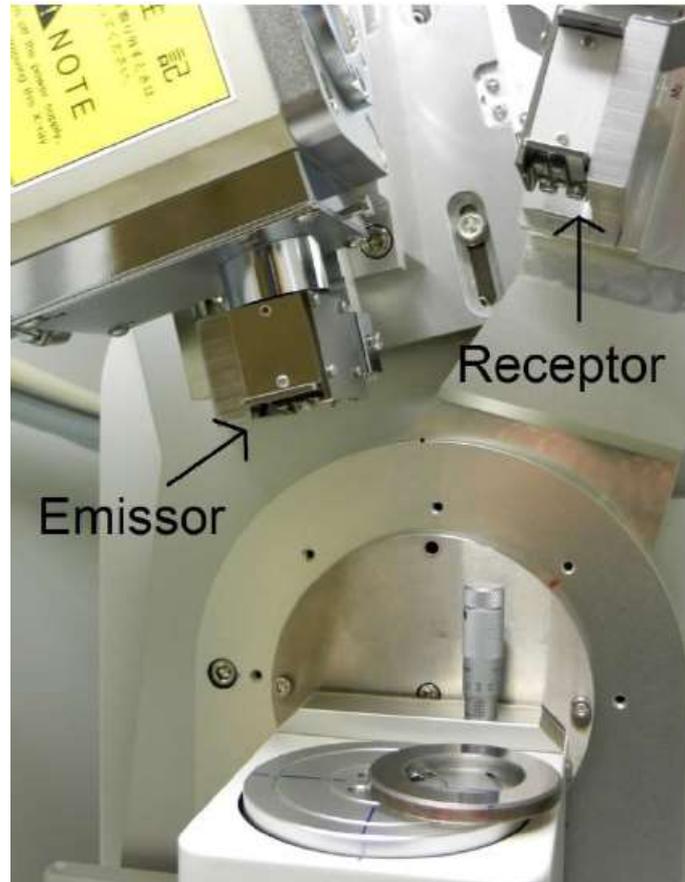


Figura 39- Montagem do corpo-de-prova no difratômetro de Raios-X, com destaque para o emissor e receptor de Raios-X.

Fonte: Melo e Nunes (2013)

Existe um pico de difração recomendado para algumas ligas ferrosas, listadas na Tabela 6. Com base nos valores utilizados nos trabalhos de Melo e Nunes (2013) e Grabarski e Weigert (2015) foi utilizado o ângulo de 156° baseado no pico de difração do aço AISI 1050, que se refere ao plano (211) do ferro.

Tabela 6- Parâmetros de difração recomendados para ligas ferrosas.

Liga ferrosa	Radiação	Plano cristalino (hkl)	Ângulo de difração (2θ)	(GPa)	Coefficiente de absorção - μ (cm ⁻¹)
316	CuK α	(420)	146,5°	132,4 \pm 1,4	2066
1050	CrK α	(211)	156°	184,1 \pm 2,1	885
4340	CrK α	(211)	156°	168,9 \pm 2,8	909
52100	CrK α	(211)	156°	173 \pm 2,1	714

Fonte: ASM (1998)

A varredura escolhida do ângulo 2Θ foi de 152° até 160° e o ângulo ψ foi variado de 0° até 49° com incrementos de 7° .

A tensão residual foi medida em apenas uma direção, o que significa um único ângulo φ (logo atribui-se $\varphi=0$), pois o *shot peening* é um tratamento que induz um campo de tensões isotrópico na superfície, dispensando medições em direções diferentes (GRABARSKI e WEIGERT, 2013). Não foram aplicadas correções no valor de σ , como exemplificado na Figura 26. Para pequenas remoções de material não é necessário que haja correção do valor medido, conforme explicado no item 2.3.1.

3.3.2 Microdureza

Para avaliar a dureza dos CP's após o *shot peening*, foram confeccionadas amostras a partir da seção transversal dos CP's 1,3 e 5. Essas amostras foram lixadas em lixa d'água nas granulometrias 220, 320, 400 e 600 e polidas em alumina de $1\ \mu\text{m}$. Para a obtenção dos valores de microdureza foi utilizado o microdurômetro Shimadzu HMV-2, com uma carga de 0,05 kgf. Foram realizadas três medições na escala Vickers em cada profundidade, começando a $25\ \mu\text{m}$ da superfície processada. Para obtenção do perfil de microdureza do CP após o *shot peening* foi realizado o cálculo da média aritmética e do desvio padrão dos valores encontrados.

A obtenção dos valores de microdureza para cada CP sem *shot peening* implicava no corte e preparação dos mesmos antes das superfícies serem jateadas. Como isso não era possível, para se obter esses valores, nas mesmas amostras confeccionadas após o *shot peening*, foram realizadas medições a partir da superfície oposta à superfície processada, iniciando em $100\ \mu\text{m}$.

Foram realizadas ainda análises de microscopia ótica em todas as amostras, utilizando o microscópio ótico Olympus BX51M para verificação dos resultados de microdureza.

3.3.3 Análise Topográfica

Para avaliar a rugosidade foi utilizado um Interferômetro, modelo CCI Lite, marca Taylor Hobson, com resolução vertical de $0,01\ \text{nm}$, utilizando-se a opção de resolução lateral de $1,632\ \mu\text{m}$. A lente utilizada foi de 20x e a área de análise foi a mesma para

todos os CP's, uma área de 5 mm x 5 mm ao longo da superfície processada. A partir dessas medições foram obtidos os parâmetros de rugosidade 3D (Ssk , Sku , Str , Sds), 2D (Ra , Rq e Rt), bem como uma imagem 3D da superfície medida.

Ademais, para verificar a ocorrência de incrustações da granalha de aço após o *shot peening*, assim como ocorreu no trabalho de Melo e Nunes (2013), foram realizadas análises topográficas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo EVO MA 15, do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 40 apresenta os perfis de tensões residuais obtidos a partir da medição por difração de raios-X associado com a técnica de remoção de material por ataque químico. Os valores de tensão residual e profundidade para obtenção dos perfis encontram-se no Anexo B.

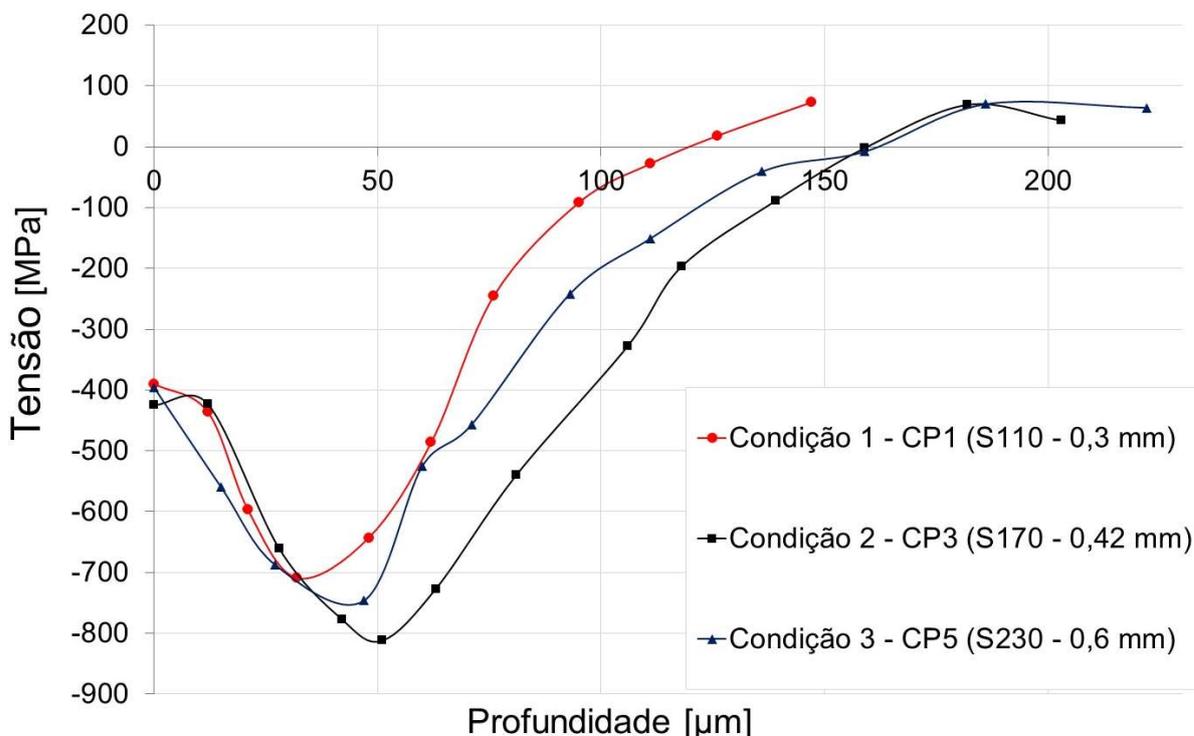


Figura 40- Perfis de tensões residuais.

A partir da Figura 40 é possível observar que para todas as condições ensaiadas, o ponto de máxima tensão residual compressiva se encontra na subsuperfície do material. A partir da superfície até aproximadamente 30 μm , os valores de tensão residual compressiva para as três condições são bem próximos, apesar da condição 3 aparecer com tensões ligeiramente maiores.

Dentre as 3 condições estabelecidas, o valor máximo de tensão residual compressiva encontrado foi para a condição 2, 815MPa, para uma profundidade de 50 μm . Para as condições 1 e 3, os valores de tensão foram 700 MPa, para uma profundidade em torno de 30 μm , e 750MPa, para uma profundidade de 45 μm , respectivamente.

Comparando a condição 1 do presente trabalho com a condição de ensaio da amostra equivalente do trabalho de Grabarski e Weigert (2015), FFN-TRS, no trabalho atual houve um aumento na profundidade e no módulo da máxima tensão residual compressiva, conforme apresentado na Figura 41.

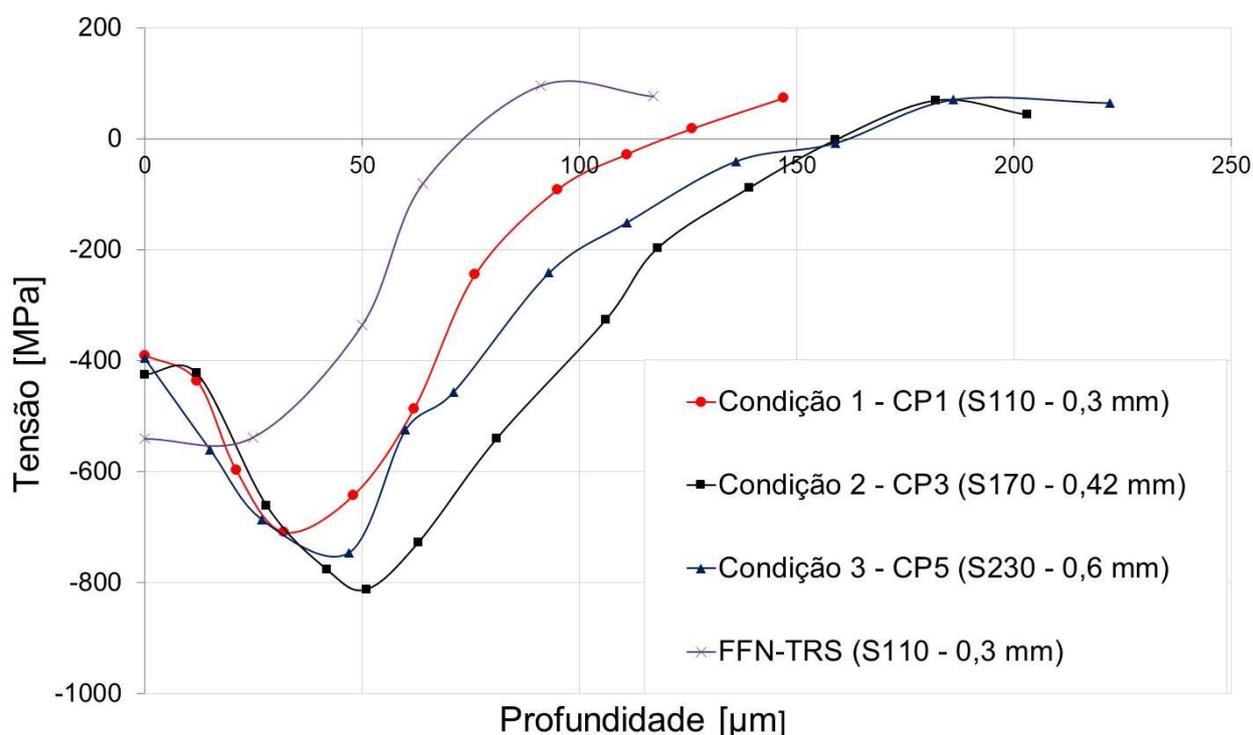


Figura 41- Comparação entre os perfis de tensões residuais nas condições 1,2 e 3 com o perfil obtido no trabalho de Grabarski e Weigert (FFN-TRS) (2015)

No trabalho realizado em 2015, a máxima tensão compressiva de cerca de 550 MPa foi obtida para uma profundidade aproximada de 25 μm . Para a condição 1, a máxima tensão residual compressiva foi de aproximadamente 700 MPa, para uma profundidade de 30 μm . Ademais, nesta condição, a inversão de compressão para tração ocorreu na profundidade de 115 μm , enquanto que no trabalho de Grabarski e Weigert (2015), a inversão ocorreu numa profundidade em torno de 75 μm . Para as condições 2 e 3, a inversão de compressão para tração ocorreu em uma profundidade ainda maior, em torno de 160 μm .

Comparando agora a condição de ensaio do trabalho de Grabarski e Weigert (2015), com a condição 2, onde se obteve a máxima tensão residual compressiva, aumentando o diâmetro da granalha em 40% e diminuindo em 10% a pressão do ar comprimido (para manter constante a intensidade Almen), foi possível aumentar em 100% a profundidade da máxima tensão compressiva. Além disso, foi possível aumentar em 53% a profundidade na qual aparecem as tensões trativas.

Em ensaios de fadiga de contato realizado em trabalhos anteriores (WOLLMANN, 2012; MELO e NUNES, 2013), a máxima tensão cisalhante decorrente do contato esfera sobre plano ocorreu na subsuperfície do material, a 108 μm de profundidade. Na ocasião, os tratamentos superficiais utilizados (nitretação e *shot peening*) não apresentaram tensões residuais compressivas nesta profundidade. No trabalho de Grabarski e Weigert (2015), conforme comentado anteriormente, tensões residuais compressivas também não foram obtidas para esta profundidade.

No presente trabalho, com a variação dos parâmetros de *shot peening* foi possível aumentar a profundidade de ocorrência de tensões residuais compressivas, sendo que para a condição 2, para a profundidade de 108 μm , a tensão compressiva está em torno de 300 MPa e para a condição 3, em torno de 180 MPa. Para avaliar a influência desses valores na vida em fadiga de contato de rolamento, existe a necessidade de ensaios de fadiga de contato que, no entanto, não faz parte do objetivo deste trabalho.

Ainda nessa abordagem, se em trabalhos futuros do GrMaTS forem reduzidas as tensões máximas de contato para valores como 1,6 GPa, usado por Dommarco e colaboradores (2006), o efeito da tensão compressiva pode ser ainda melhor avaliado, pois para esse nível de tensão, a profundidade da máxima tensão cisalhante seria um

pouco menor, cerca de 85 μm , e a tensão residual compressiva cerca de 600 MPa. Alternativamente, dados da literatura, como os apresentados na Figura 10, sugerem que aumentos adicionais na profundidade do pico de tensão compressiva podem ser obtidos pela extensão do tempo de jateamento.

Os perfis de microdureza obtidos para as três condições sem *shot peening* são apresentados na Figura 42.

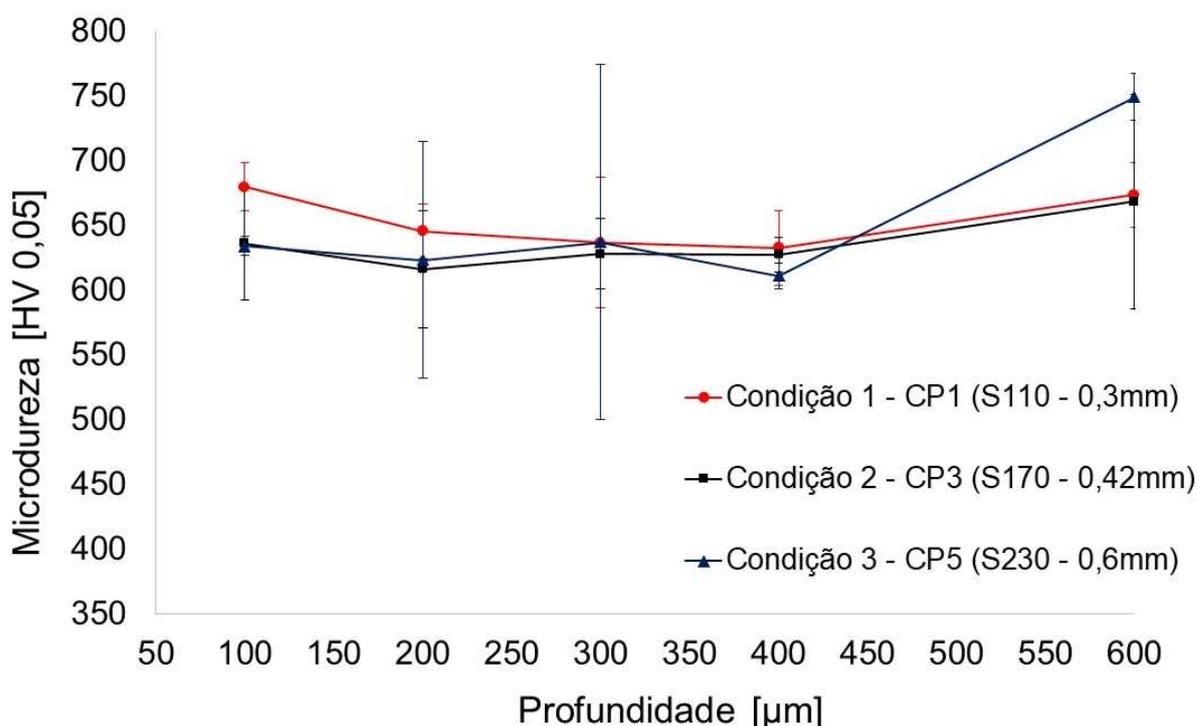


Figura 42- Perfis de microdureza para os CP's 1,3 e 5 a partir da superfície sem *shot peening* com desvio padrão da média.

De acordo com a Figura 42, para as condições 1, 2 e 3 o valor médio de microdureza sem *shot peening* foi de 650 HV. No entanto, observa-se para a condição 3 uma grande variação dos valores de microdureza para uma profundidade de 300 μm .

Os perfis de microdureza obtido para as três condições com *shot peening*, são apresentados na Figura 43.

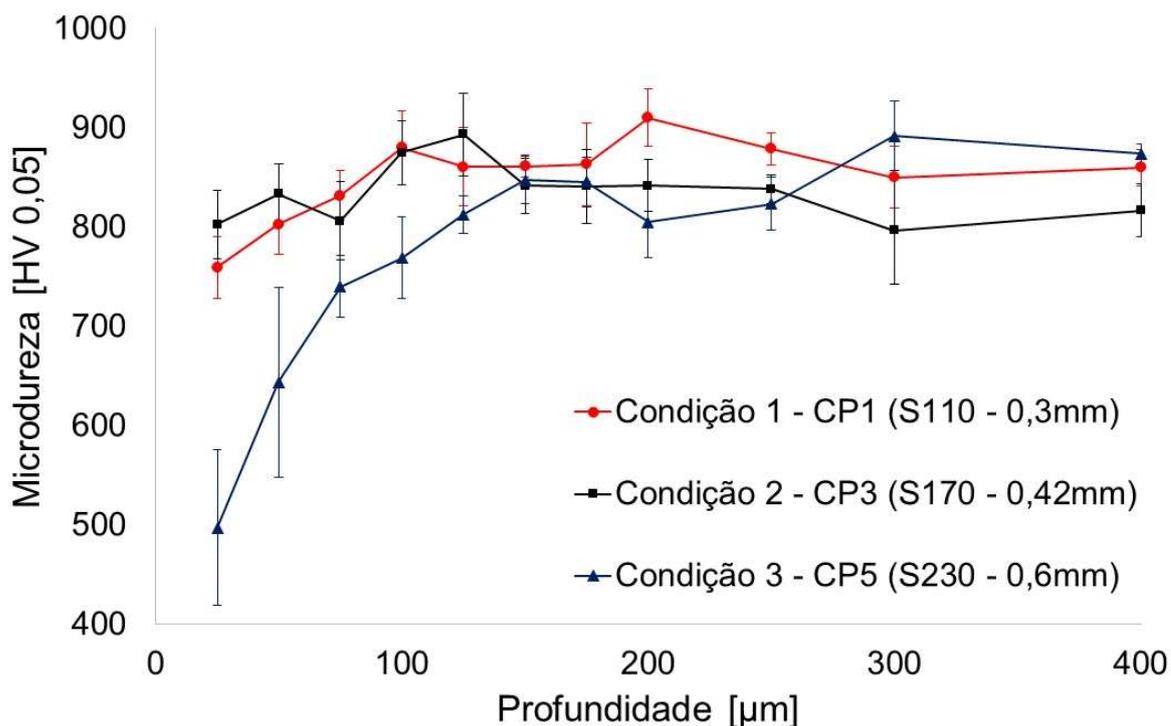


Figura 43- Perfis de microdureza para os CP's 1,3 e 5 após *shot peening* com desvio padrão da média.

A partir da Figura 43, é possível observar que após o *shot peening*, conforme esperava-se (OLIVEIRA, 2011), houve um aumento na microdureza para as condições 1 e 2 de aproximadamente 30%. Um aumento nos valores de microdureza só foi observado para a condição 3 numa profundidade a partir de 150 μm, uma vez que até essa profundidade o material sofreu descarbonetação em toda sua superfície analisada. Observa-se que para essa condição, logo abaixo da superfície, há um grande desvio padrão nos valores médios de microdureza, caracterizando uma região não uniforme quanto a dureza. A microdureza nas regiões descarbonetadas, conforme representado na Figura 44 e na Figura 45, é de aproximadamente 300 HV.

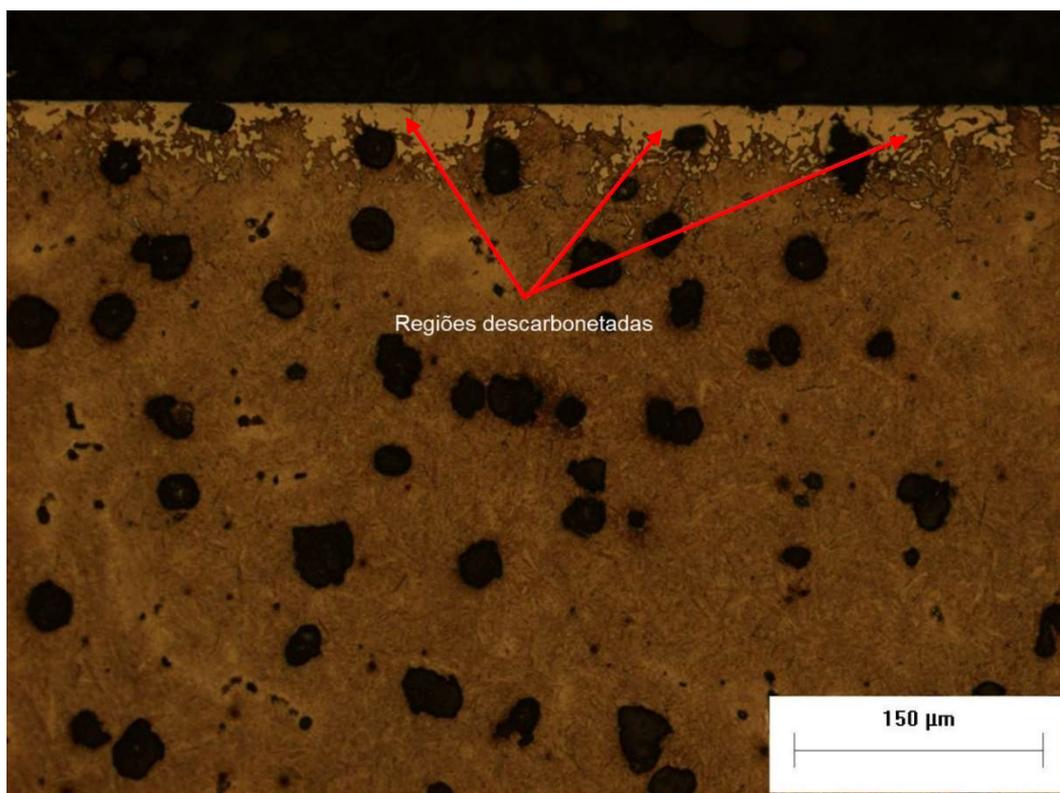


Figura 44- Regiões com descarbonetação no CP5.

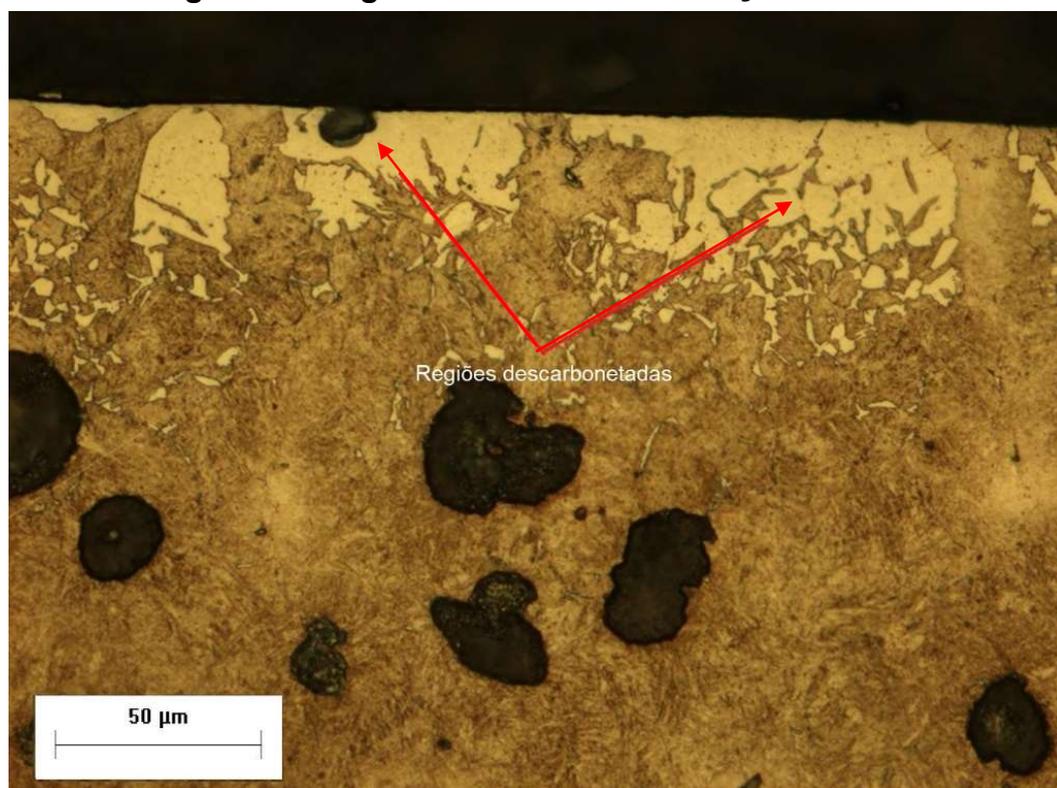


Figura 45- Regiões com descarbonetação no CP5, similares à figura anterior, mas em maior detalhe.

A presença dessas regiões foi, muito provavelmente, devido a retifica insuficiente de camadas descarbonetadas decorrentes dos tratamentos térmicos.

Os CP's 1 e 3 também apresentaram descarbonetação. No entanto, como foram em regiões pontuais, conforme apresentado na Figura 46 e na Figura 47, não influenciaram significativamente nos valores de microdureza logo abaixo da superfície, como ocorreu com o CP5.

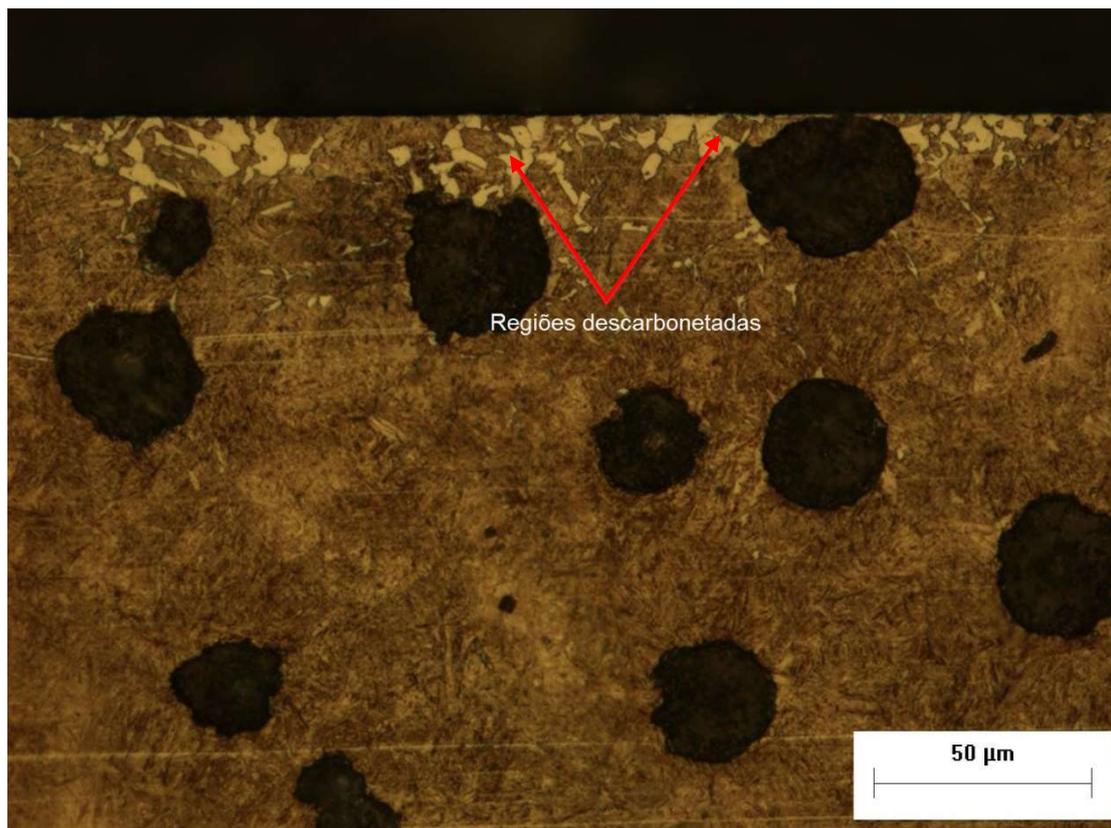


Figura 46- Região descarbonetada CP1.



Figura 47- Região descarbonetada CP3.

Diferenças no teor superficial de carbono podem afetar o valor superficial da tensão residual induzida pelo *shot peening* (BIRNFELD et al., 2009), no entanto, o efeito combinado entre *shot peening* e descarbonetação está fora do escopo desse trabalho.

A Figura 48, apresenta a topografia 3D obtida por meio de interferometria óptica, no CP sem *shot peening*.

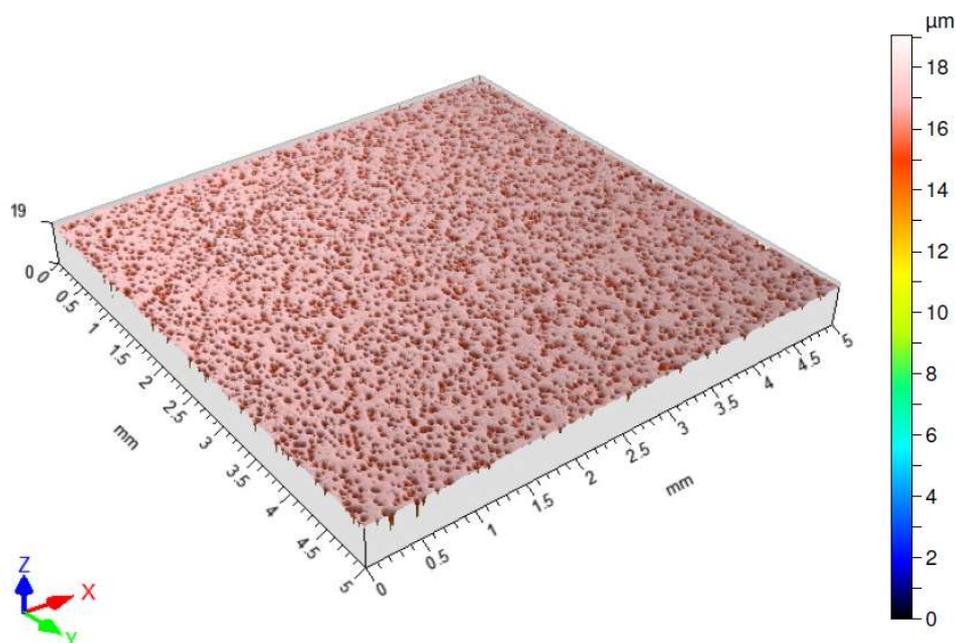


Figura 48- Topografia da superfície sem *shot peening*

Na imagem acima é possível observar a matriz do FFN com as grafitas (pontos vermelhos).

A Figura 49, Figura 50 e Figura 51, por sua vez, apresentam a topografia 3D nas condições de processamento 1, 2 e 3, respectivamente.

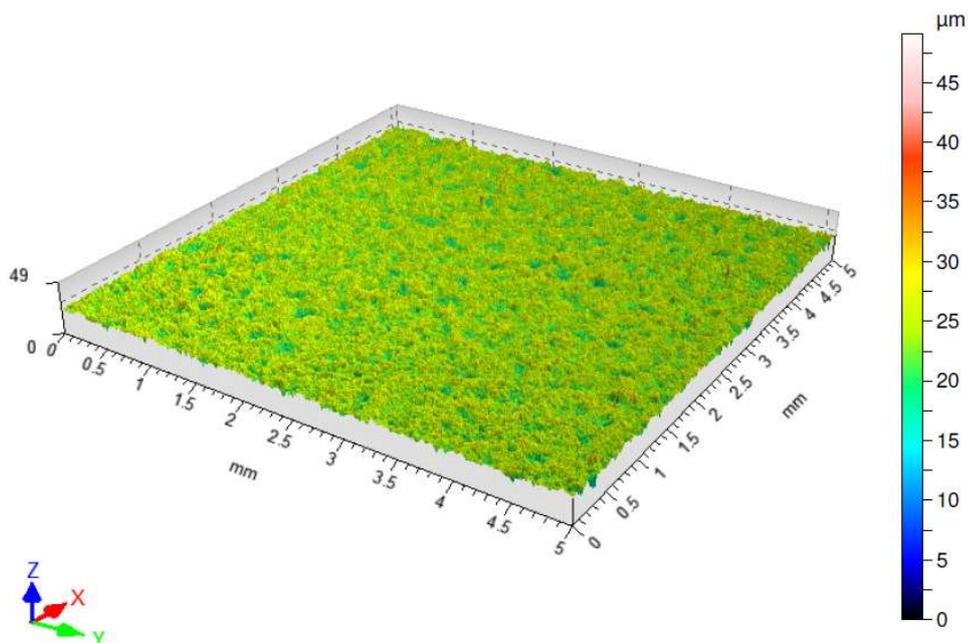


Figura 49- Topografia do CP na condição 1 (CP2)

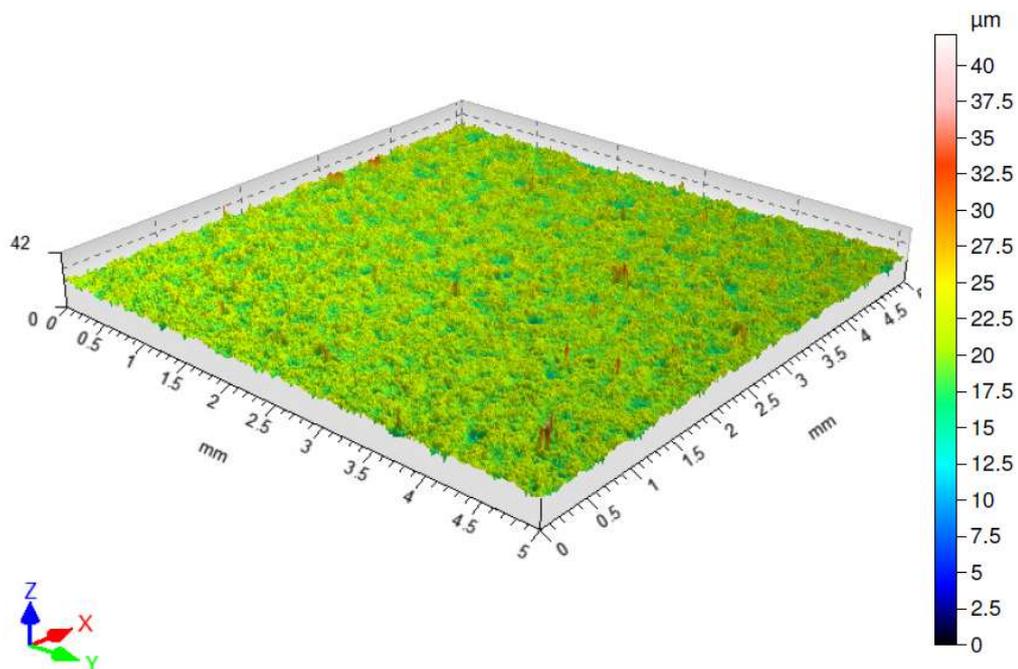


Figura 50- Topografia do CP na condição 2 (CP4)

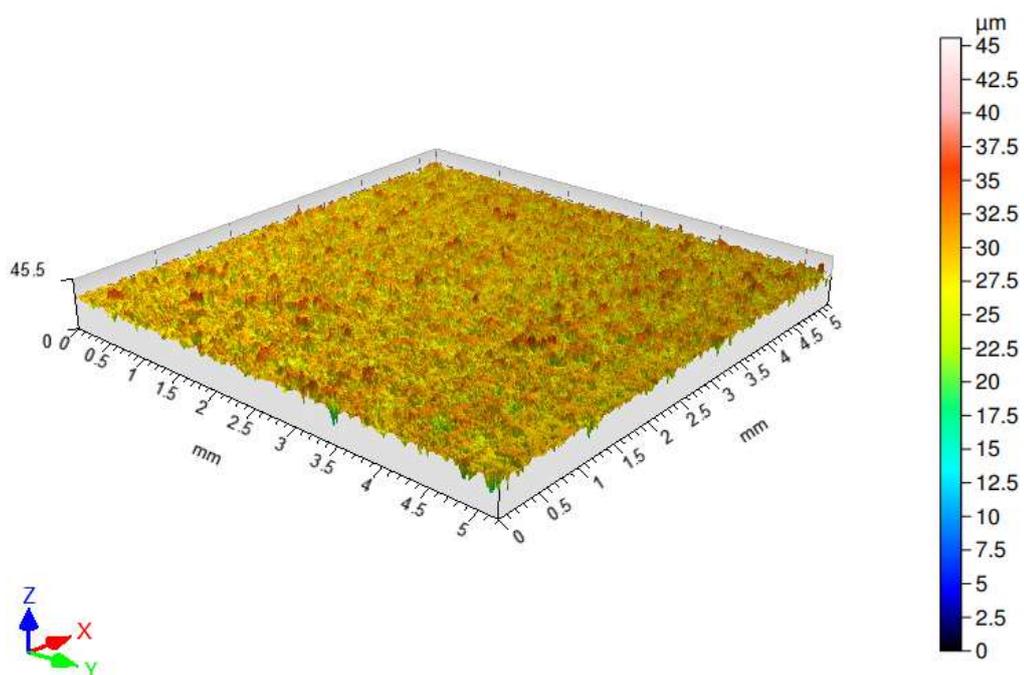


Figura 51-Topografia do CP na condição 3 (CP6)

Nas imagens acima, é possível observar que após o *shot peening*, com a deformação da superfície, já não é mais perceptível a matriz nodular tão claramente como na Figura 48. A partir da Figura 51, é possível observar que, mesmo com uma

pressão menor, as maiores alterações na superfície ocorreram para a condição 3, devido ao maior tamanho de granalha. A variação de cores de uma figura para a outra, ilustra essa mudança na rugosidade superficial decorrente das alterações nas variáveis do *shot peening*. A topografia do CP6, é mais amarelada, o que representa uma superfície mais rugosa comparada as superfícies dos CP's 2 e 4, que são esverdeadas.

Paralelamente a essa análise qualitativa, é possível fazer uma análise quantitativa da superfície por meio dos parâmetros de rugosidade 3D e 2D, apresentados na Tabela 7 e na Tabela 8, respectivamente.

Tabela 7- Parâmetros de Rugosidade 3D

Condição	CP	Ssk	Sku	Str	Sds [1/mm ²]
-	0	-4,16 ± 0,3	36,2±10,1	0,85±0,03	3700± 700
1	2	-1,17 ± 0,3	9,3± 0,4	0,93±0,02	9500±2000
2	4	-0,95 ±0,2	11,4± 2,6	0,89±0,01	11000± 3000
3	6	-1,02± 0,5	7,6± 0,1	0,93±0,02	7800±1500

Discutido no item 2.4 da Fundamentação Teórica, o parâmetro *Str* representa o comportamento isotrópico da superfície, quanto mais próximo de 1, mais isotrópica é a superfície analisada. Conforme esperado, os valores de *Str* estão bem próximos desse valor, uma vez que o *shot peening* produz topografias com essa característica (BHUSHAN, 2001).

O parâmetro *Sku* indica a presença de altos picos ou vales excessivamente profundos ($Sku > 3$) ou a falta deles ($Sku < 3$). Observa-se que para o CP sem *shot peening*, o parâmetro *Sku* apresentou um valor relativamente alto. Esse valor pode ser entendido como resultado da medição da região onde se encontravam os nódulos de grafitas, que podem ter sido arrancados durante o processo de preparação (lixamento e polimento). Observa-se que com o aumento do diâmetro, ou seja, com o maior impacto das granalhas na superfície, esse valor vai diminuindo. Muito provavelmente, devido a “uniformização” da superfície devido as deformações ocorridas.

O *Ssk* é o parâmetro 3D que representa o grau de simetria das alturas da superfície sobre um plano médio. A predominância de picos é representada por $Ssk > 0$

e por vales, $Ssk < 0$. Observa-se que todos os valores são negativos, o que representa uma superfície predominantemente com vales.

O Sds representa o número de cumes por área. Observa-se que para a condição 2 são encontrados os maiores valores. Esse alto valor pode ser benéfico, uma vez que, ajuda distribuir melhor as cargas aplicadas. Valores muito baixos de Sds podem resultar em tensões de contato localizadas (MICHIGAN METROLOGY, 2017).

A Tabela 8 apresenta os valores médios dos parâmetros 2D de rugosidade Rq , Ra e Rt . Considerando o desvio padrão das medições, as condições 1 e 2 possuem aproximadamente os mesmos valores de rugosidade. Para a condição 3, observou-se que com o aumento do diâmetro da granalha, os valores de Rq , Ra e Rt também aumentaram.

Tabela 8- Parâmetros de Rugosidade 2D

Condição	CP	Rq	Ra	Rt
-	0	$0,88 \pm 0,13$	$0,52 \pm 0,07$	10 ± 1
1	2	$1,64 \pm 0,06$	$1,25 \pm 0,01$	13 ± 1
2	4	$1,4 \pm 0,3$	$1,1 \pm 0,2$	12 ± 1
3	6	$2,5 \pm 0,3$	$1,9 \pm 0,3$	19 ± 4

Além disso, como esse trabalho vem para complementar uma série de outros trabalhos que abordam a fadiga de contato e um fator importante que determina o modelo de lubrificação é a camada de filme lubrificante, os valores de Rq obtidos no presente trabalho podem ser utilizados como referência em trabalhos futuros.

Complementando as análises anteriores a Figura 52, Figura 53 e a Figura 54, apresentam a microscopia eletrônica de topo dos CP's 2, 4 e 6, respectivamente.

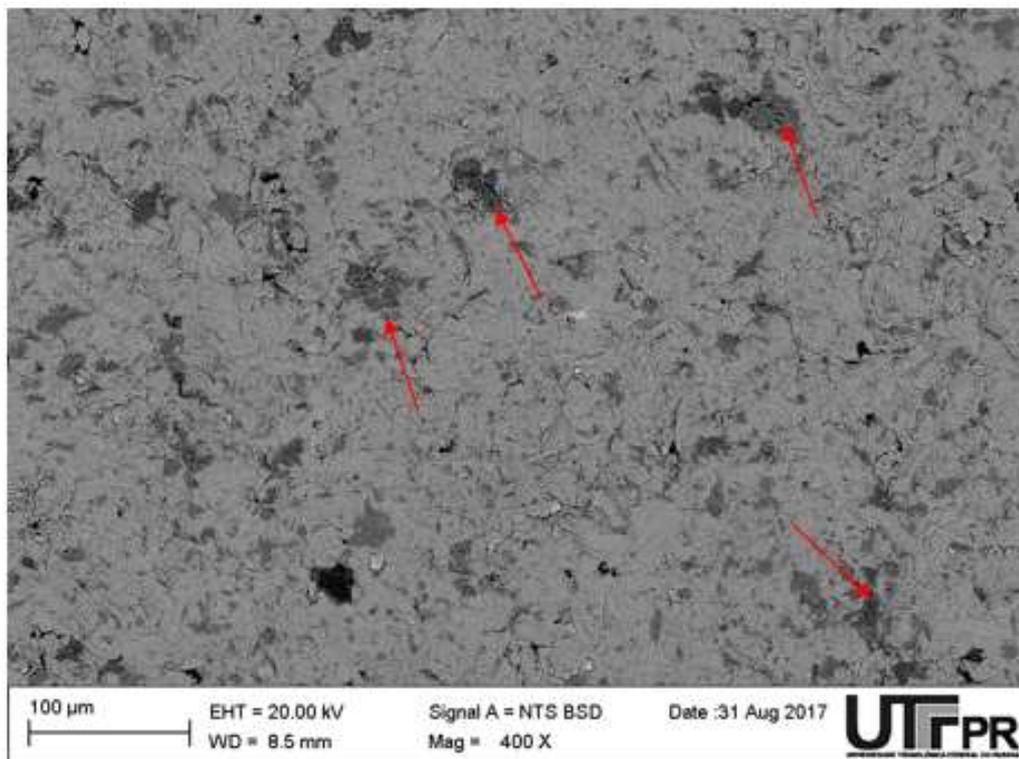


Figura 52- Microscopia eletrônica de varredura da superfície do CP2. Imagem de elétrons retroespalhados.

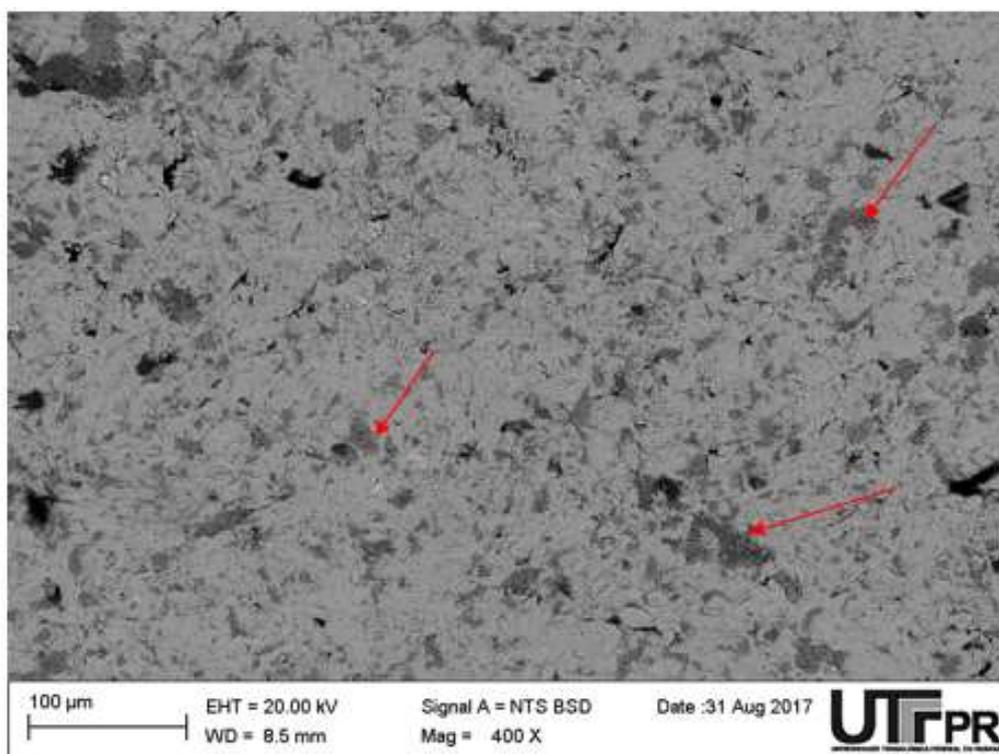


Figura 53- Microscopia eletrônica de varredura da superfície do CP4. Imagem de elétrons retroespalhados.

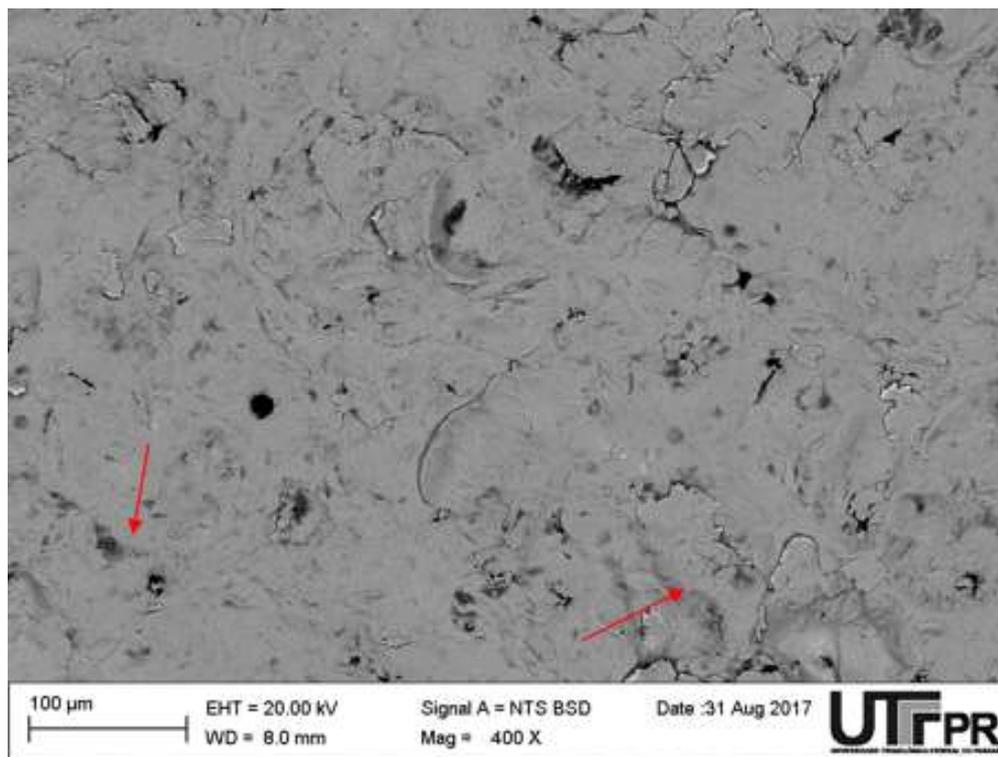


Figura 54- Microscopia eletrônica de varredura da superfície do CP6. Imagem de elétrons retroespalhados.

Como pode ser observado na Figura 54, a superfície do CP5 foi bastante deformada comparada com as superfícies dos CP's 1 e 3. Além disso, nas três figuras acima é possível visualizar o aparecimento de incrustações na superfície jateada (regiões cinza mais escuras, como indicado pelas setas vermelhas). No trabalho de Melo e Nunes (2013), já haviam sido observadas incrustações e no presente trabalho, nas três condições analisadas, esse comportamento foi identificado. O aparecimento das incrustações nas três condições só confirma que as incrustações decorrentes do impacto da granalha com a superfície do material são intrínsecas ao processo de *shot peening* do ferro fundido nodular, dada a baixíssima dureza da grafita (MELO e NUNES, 2013). Para aplicações posteriores ao *shot peening*, como no caso de ensaios de fadiga de contato, essas incrustações devem ser removidas, como no trabalho de Melo e Nunes (2013), implicando em mais uma etapa de fabricação.

Com base nos resultados obtidos, para as condições 1 e 2, observa-se que para uma mesma intensidade Almen, há um aumento no módulo e na profundidade das tensões residuais compressivas com o aumento do diâmetro da granalha e,

consequentemente, diminuição da pressão de jateamento. Nestas condições, a microdureza e a rugosidade também sofrem um ligeiro incremento. No entanto, para a condição 3, observa-se que a ocorrência da descarbonetação compromete um estabelecimento claro entre os parâmetros de processo e o perfil de tensões residuais. Muito provavelmente, a diminuição da microdureza para esta condição, pode ter influenciado os resultados obtidos. Desse modo, para compreender melhor a relação entre o diâmetro da granalha e da pressão de jateamento no perfil de tensões residuais para a condição 3, sugere-se que em trabalhos futuros novos CP's sem descarbonetação sejam submetidos ao *shot peening*.

Para as três condições estudadas, tensões residuais compressivas foram introduzidas na profundidade de máxima tensão cisalhante (108 μm). No entanto, o pico da máxima tensão residual compressiva ainda se encontra em profundidades menores. Mesmo o módulo da tensão residual compressiva na profundidade de 108 μm não sendo o máximo, os resultados obtidos no presente trabalho se mostram significativos, uma vez que, em trabalhos anteriores, o campo de tensões compressivas não ultrapassou a profundidade de 75 μm . Para verificar se as tensões obtidas nas condições 1, 2 e 3, são suficientes para aumentar a vida em fadiga de contato de rolamento do ferro fundido nodular temperado e revenido, existe a necessidade de ensaios de fadiga, que fogem ao escopo deste trabalho.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados encontrados neste estudo conclui-se que:

- Nas três condições de processamento foi possível obter tensões compressivas residuais na profundidade correspondente a máxima tensão cisalhante (108 μm) de trabalhos prévios do GrMaTS, embora o pico de tensão residual compressiva máxima não coincida com a profundidade de máxima tensão cisalhante;
- A condição 2 de processamento (granalha S170 e pressão de 6,20 bar) foi mais efetiva para se obter a máxima tensão residual compressiva mais profundamente;
- A relação entre descarbonetação e *shot peening* foge ao escopo do trabalho, desse modo, para se avaliar melhor a condição de processamento 3 existe a

necessidade de continuidade do trabalho com corpos de prova sem descarbonetação;

- A dureza do material aumentou com o *shot peening*;
- A rugosidade superficial aumentou com o aumento do diâmetro da granalha;

Para a continuação dos estudos acerca das variáveis do processo de *shot peening*, sugere-se estudar mais profundamente a influência do tempo de jateamento (cobertura) na profundidade da máxima tensão de cisalhamento, uma vez que, a comparação dos resultados obtidos com a literatura indica que o aumento do tempo de jateamento pode levar a profundidades da máxima tensão de cisalhamento mais próximas àquelas estudadas em trabalhos prévios do GrMaTS.

6. REFERÊNCIAS

ALMEN, J. O.; BLACK, P. **Residual stresses and fatigue in metals**. McGraw-Hill, New York, 1963.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Surface Engineering**. In: **Metals Handbook**, vol. 5. 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Materials characterization**. In: **Metals Handbook**, vol. 10. 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Fatigue and Section**. In: **Metals Handbook**, vol. 19. 1996.

BERTUOL, Kauê. **Análise da influência de parâmetros de Shot Peening na dureza superficial, rugosidade e tensão residual em aço ASTM A743-CA6NM**. 2014. 77 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

BIRNFELD, M. A.; PINTAÚDE, G.; DAS NEVES, J. C.K. **Effect of carburized steel hardness on the surface roughness and residual stresses after manufacturing operations.** 2009.

BHUSHAN, B. **Modern tribology handbook.** CRC Press LLC. Florida, 2001. cap. 2.

CULLITY, B. D. **Elements of X-ray diffraction.** Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Massachusetts, 1978.

DOMMARCO, R. C.; JAUREGUIBERRY, A. J.; SIKORA, J. A. **Rolling contact fatigue resistance of ductile iron with different nodule counts and matrix microstructures.** *Wear*, v. 261, n. 2, p. 172-179, 2006.

DONG, W. P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. **Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography: III - Parameters for characterizing amplitude and some functional properties.** *Wear*, v.178, p. 29-43, 1994.

FARIAS, A. D. **Análise da tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em material endurecido do aço ABNT 8620 cementado.** 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FITZPATRICK, M. E.; et al. **Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction – Issue 2.** Ed. Cown. Teddington, Middlesex, United Kingdom, p23, 2005.
FREUND, L. B.; SURESH, S.; **Thin Film Materials – Stress, Defect Formation and Surface Evolution.** Massachusetts Institute of Technology. p. 186 – 194, 2003.

GRABARSKI, Marina Izabelle; WEIGERT, Nathalia Beatriz. **Aplicação da técnica de remoção química na determinação de perfis de tensão residual em amostras de fadiga de contato submetidas a nitretação e *shot peening*.** 2015. 73 f. Trabalho de

Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Mecânica, Curitiba, 2015.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**, Ed. Butterworth – Heinemann. Oxford, p. 273. 1992.

ISO, NBR. 4287 02. **Especificações geométricas de produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**, 2002.

LITVIN, Franciele et al. **Effect of hardness variation on surface integrity of carburized p20 steel**. 2013

MELO, Guilherme Lasari; NUNES, Guilherme Schmitz. **Efeito do Shot Peening na Resistência à Fadiga de Contato em Ferros Fundidos Nodulares**. 2013. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Mecânica, Curitiba, 2013.

MIC. **Shot peening applications**. Metal Improvement Company. 9ª ed. 62p. 2005. Disponível em: http://www.metalimprovement.com/premium/PDF/greenbook_v9/english/MIC%20Green%20Book%20-%209th%20edition%20-%20Complete%20Book.pdf, acessado em 02.10.2016

MICHIGAN METROLOGY. Disponível em: https://www.michmet.com/texture_parameters_index_by_name.html, acessado em 11.11.2017.

NEVES, J. C. K. **Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de fadiga de contato esfera sobre plano e sua aplicação na caracterização de ferros fundidos com matrizes de elevada dureza**. Tese (doutorado em engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP. p. 167. 2006.

NIKU-LARI, A. **Advances in surface treatments: technology - applications - effects**. Vol. 4: **Residual stress**. Ed. Pergamon. 1ª ed. p.566. 1987

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada** / Robert L. Norton; – 4. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2013.

OSK - Kiefer GmgH - **Shot_peening_effects_advantages_and_applications-**
Disponível em: http://osk-kiefer.de/wp-content/uploads/03-shot_peening_control_and_parameters.pdf. Acessado em 10.11.2016.

ROCHA, C.L.F. **Desempenho em fadiga de arames submetidos ao processo de shot peening**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da UFRGS, 2010.

SCHIJVE, J. **Fatigue of Structures and Materials**. Kluwer Academic Publishers. New York, 2004. p. 71-83.

SCURACCHIO, B. G. **Tensões residuais induzidas por shot-peening e durabilidade de molas em lâmina**/ B.G.Scuracchio. –ed. rev.- São Paulo, 2012. 113p. Tese (doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SOUSA, D. A. **Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por meio de Ensaio de Dureza** / Diogo Antônio de Sousa –São João Del-Rei, MG: [s.n.], 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São João del Rei.

STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. Ed. Butterworth-Heinemann. 2º ed. p. 769. 2001.

STANDARD, A. S. T. M. **Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method**. ASTM E837, 1995.

STANDARD, S. A. E. **Test Strip, Holder and Gage for Shot Peening**. SAE J442, 1968.

STANDARD, S.A.E. **Shot Peening of Metal Parts**. AMS-S-13165, 1998.

STANDARD, S.A.E. **Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction**, SAE J784a, 1971.

STANDARD, S.A.E. **Shot Peening, Automatic**, AMS 2430, 2009.

STEPHENS, R. I. et al. **Metal fatigue in engineering**. Ed. J. Wiley: New York. 2. ed. 318 p. 2001.

STOUT, K.J. et al. **The development of methods for the characterization of roughness on three dimensions**. EUR 15178 EN of the Commission of the European Communities, 1994.

SUCHARSKI, G. B. **Estudo da erosão por cavitação sobre diferentes morfologias de revestimentos de FeMnCrSiB aplicados por asperção térmica chama FS e HVOF com tratamento de Shot Peening**. - Curitiba, 2016. 146 f.

TOTTEN, G. E. **Handbook of Metallurgical Process Design**. Marcel Dekker, Inc, New York, 2004. p. 857-869.

OLIVEIRA, F. A. L. **Análise das Tensões Residuais Induzidas pelos Tratamentos Mecânicos Superficiais na Construção de Navios** - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014. 35 p:

OLIVEIRA, Rene Ramos de. **Avaliação da tensão residual em Alumínio 7050 conformado pelo processo peen forming**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

WOLLMANN, D. **Avaliação da resistência à fadiga de contato de ferro fundido nodular nitretado por plasma**. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 109 p. 2012.

WHEELABRATOR GROUP – **A mecânica do shot peening com granalha**. Disponível em

http://www.wheelabratorgroup.com/pt/sites/wheelabrador/content/about_us/about_wheellabrador/what_is_shot_peening.as. Acessado em 27.10.2016.

ZIRTEC - **Shot Peening**. Disponível em <http://www.zirtec.com.br/peças/shot-peening/>. Acessado em 25.10.2016.

ANEXO A – CERTIFICADOS *SHOT PEENING*

ZIRTEC

Nº 1705470

R. Muniz de Souza, 296, São Paulo, SP, Brasil
 Tel.: +55 11 3388 5044
 Fax: +55 11 3277 8507
 www.zirtec.com.br

CERTIFICADO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL DE SHOT-PEENING SHOT-PEENING CERTIFICATE

Cliente / Customer: Universidade Tecnológica Federal do Paraná **N. ref. / Our Ref.:** OS:9522
Endereço / Address: Av. Sete de Setembro, 3165 - CEP: 80230-901, Curitiba - PR **N.Fiscal / Invoice nr.:** 4151
S. Ref. / Your Ref.:

Peças / Parts: Corpo de prova Ø52x6 (nº1 e nº2)

Superfície(s) tratadas / Shot-peened area: Face polida

Norma / Specification:

Equipamento utilizado / Blast equipment:

ZP-9075Y

Operação / Mode:

Manual

Material utilizado / Blast media:

Tipo / Type:

Granalha de Aço

Granulometria / Blast media size:

S-110

Especificação do tratamento / Shot-peening parameters:

Intensidade Almen / Almen intensity:

0,364 A

Cobertura / Coverage:

100% min.

Pressão do ar / Air pressure:

100 PSIG

Ângulo de jato / Angle of shot stream to surface:

90°

Certificamos que os componentes / superfícies em referência foram submetidos a tratamento superficial de shot-peening nas condições acima especificadas.

We hereby certify that these parts / surfaces were submitted to shot-peening according to specifications above.

São Paulo, 10 de Maio de 2.017.

Eng. Marcelo Murga

ZIRTEC

Nº 1705471

R. Muniz de Souza, 296, São Paulo, SP, Brasil
 Tel.: +55 11 3388 5044
 Fax: +55 11 3277 8507
www.zirtec.com.br

CERTIFICADO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL DE SHOT-PEENING
SHOT-PEENING CERTIFICATE

Cliente / Customer: Universidade Tecnológica Federal do Paraná **N. ref. / Our Ref.:** OS:9522
Endereço / Address: Av. Sete de Setembro, 3165 - CEP: 80230-901, Curitiba - PR **N.Fiscal / Invoice nr.:** 4151
S. Ref. / Your Ref.:

Peças / Parts: Corpo de prova Ø52x6 (nº3 e nº4)

Superfície(s) tratadas / Shot-peened area: Face polida

Norma / Specification:
Equipamento utilizado / Blast equipment: ZP-9075Y
Operação / Mode: Manual

Material utilizado / Blast media:

Tipo / Type: Granalha de Aço
Granulometria / Blast media size: S-170

Especificação do tratamento / Shot-peening parameters:

Intensidade Almen / Almen intensity: 0,364 A
Cobertura / Coverage: 100% min.
Pressão do ar / Air pressure: 90 PSIG
Ângulo de jato / Angle of shot stream to surface: 90°

Certificamos que os componentes / superfícies em referência foram submetidos a tratamento superficial de shot-peening nas condições acima especificadas.

We hereby certify that these parts / surfaces were submitted to shot-peening according to specifications above.

São Paulo, 10 de Maio de 2.017.

Eng. Marcelo Murga

ZIRTEC

Nº 1705472

R. Muniz de Souza, 296, São Paulo, SP, Brasil
 Tel.: +55 11 3388 5044
 Fax: +55 11 3277 8507
 www.zirtec.com.br

CERTIFICADO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL DE SHOT-PEENING
SHOT-PEENING CERTIFICATE

Cliente / Customer: Universidade Tecnológica Federal do Paraná **N. ref. / Our Ref.:** OS:9522
Endereço / Address: Av. Sete de Setembro, 3165 - CEP: **N.Fiscal / Invoice nr.:** 4151
 80230-901, Curitiba - PR
S. Ref. / Your Ref.:

Peças / Parts: Corpo de prova Ø52x6 (nº5 e nº6)

Superfície(s) tratadas / Shot-peened area: Face polida

Norma / Specification:

Equipamento utilizado / Blast equipment: ZP-9075Y
Operação / Mode: Manual

Material utilizado / Blast media:

Tipo / Type: Granalha de Aço
Granulometria / Blast media size: S-230

Especificação do tratamento / Shot-peening parameters:

Intensidade Almen / Almen intensity: 0,364 A
Cobertura / Coverage: 100% min.
Pressão do ar / Air pressure: 80 PSIG
Ângulo de jato / Angle of shot stream to surface: 90°

Certificamos que os componentes / superfícies em referência foram submetidos a tratamento superficial de shot-peening nas condições acima especificadas.

We hereby certify that these parts / surfaces were submitted to shot-peening according to specifications above.

São Paulo, 10 de Maio de 2.017.

Eng. Marcelo Murga

DOCUMENTO EMITIDO ELETRONICAMENTE

ANEXO B- VALORES OBTIDOS NAS MEDIÇÕES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Condição 1		Condição 2		Condição 3	
SP1		SP3		SP5	
Z (μm)	σ (MPa)	Z (μm)	σ (MPa)	Z (μm)	σ (MPa)
0	-390	0	-425	0	-396
12	-436	12	-423	15	-560
21	-597	28	-661	27	-687
32	-709	42	-777	47	-746
48	-643	51	-812	60	-525
62	-486	63	-727	71	-457
76	-245	81	-540	93	-242
95	-92	106	-327	111	-151
111	-28	118	-197	136	-41
126	18	139	-89	159	-8
147	73	159	-2	186	70
		182	69	222	64
		203	43		