



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA - PPGEM

Dissertação de Mestrado

**EFEITO DO PROCESSO DE SHOT PEENING COM DIFERENTES
CONDIÇÕES DE DEFLEXÃO DE ALMEN NOS PERFIS DE TENSÃO
RESIDUAL E MICRODUREZA E RUGOSIDADE EM UM AÇO
CEMENTADO TEMPERADO/REVENIDO UTILIZADO NA FABRICAÇÃO
DE ENGRENAGENS AUTOMOTIVAS**

JARDEL JACKSON DE OLIVEIRA SILVA

Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva

Recife

JAN/2016



JARDEL JACKSON DE OLIVEIRA SILVA

**EFEITO DO PROCESSO DE SHOT PEENING COM DIFERENTES
CONDIÇÕES DE DEFLEXÃO DE ALMEN NOS PERFIS DE TENSÃO
RESIDUAL E MICRODUREZA E RUGOSIDADE EM UM AÇO
CEMENTADO TEMPERADO/REVENIDO UTILIZADO NA FABRICAÇÃO
DE ENGRENAGENS AUTOMOTIVAS**

Dissertação apresentada para
obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Mecânica na Área de
Materiais e Fabricação do
Departamento de Engenharia
Mecânica da UFPE.

**Orientador: Prof. Dr. Flávio José da
Silva**

Recife

JAN/2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicea Alves Silva, CRB-4 / 1260

- S586e Silva, Jardel Jackson de Oliveira.
- Efeito do processo de shot peening com diferentes condições de deflexão de almen nos perfis de tensão residual e microdureza e rugosidade em um aço cementado temperado/revenido utilizado na fabricação de engrenagens automotivas / Jardel Jackson de Oliveira Silva - 2016.
- 100 folhas, Il., Abre. e Tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.
- Inclui Referências e anexos.
1. Engenharia Mecânica. 2. Jateamento com granalhas,. 3. Microdureza. 4. Tensão residual. 5. Difração de raios-x. I. Silva, Flávio José da. (Orientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2016 – 124

22 de Janeiro de 2016

“EFEITO DO PROCESSO DE SHOT PEENING COM DIFERENTES CONDIÇÕES DE DEFLEXÃO DE ALMEN NOS PERFIS DE TENSÃO RESIDUAL E MICRODUREZA E RUGOSIDADE EM UM AÇO CEMENTADO TEMPERADO/REVENIDO UTILIZADO NA FABRICAÇÃO DE ENGRENAGENS AUTOMOTIVAS”

JARDEL JACKSON DE OLIVEIRA SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE MATERIAIS E FABRICAÇÃO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. FLÁVIO JOSÉ DA SILVA
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. FLÁVIO JOSÉ DA SILVA (UFPE)

Prof. Dr. OSCAR OLÍMPIO DE ARAÚJO FILHO (UFPE)

Prof. Dr. ANÍBAL VERAS DE SIQUEIRA FILHO (ITEP)

- *Dedico este trabalho a meus pais pela total dedicação e esforço para que isso fosse possível;*
- *A minha esposa Carla pela paciência durante os vários dias; que tive que dedicar ao mesmo;*
- *Por ultimo ao meu orientador Prof. Dr. Flávio José, sem ele esse trabalho não seria concluído.*

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a minha querida e amada esposa por todos os momentos de paciência e abdicação ao meu lado. Agradeço a todos que sempre contribuíram para que a realização deste trabalho fosse possível. Gostaria de agradecer a todos os professores da graduação pela base formada e a todos os professores do PPGEM pela continua troca de conhecimento e experiência. A todos os amigos da Musashi do Brasil Ltda pelo apoio e esforço desempenhado na execução deste trabalho principalmente ao operador do equipamento Renan pela paciência e sugestões dadas no decorrer dos testes. Agradecer aos meus pais que nunca mediram esforços para me darem uma educação de qualidade e a toda minha família pelo incentivo dado no decorrer de toda minha vida. A Musashi do Brasil Ltda pela disponibilização dos equipamentos e material utilizados. E ao meu orientador Prof. Dr. Flávio José pela total dedicação, paciência, atenção e tempo dedicados, o seu apoio e orientação foram essenciais para que a conclusão deste trabalho fosse possível.

EFEITO DO PROCESSO DE SHOT PEENING COM DIFERENTES CONDIÇÕES DE ALMEN NOS PERFIS DE TENSÃO RESIDUAL E MICRODUREZA E RUGOSIDADE EM UM AÇO CEMENTADO TEMPERADO/REVENIDO UTILIZADO NA FABRICAÇÃO DE ENGRENAGENS AUTOMOTIVAS

Jardel Jackson de Oliveira Silva

RESUMO

O processo de shot peening faz parte da família de processos de jateamento usado amplamente para tratamento superficial de peças e estruturas no ramo industrial, é uma das técnicas mais eficazes quando o assunto é aumento de resistência à fadiga. O processo de shot peening é uma das principais etapas no processo de produção de componentes sujeitos a esforços cíclicos, e, conseqüentemente, falha por fadiga. Desta forma este trabalho tem como objetivo geral estudar os efeitos induzidos pelo processo de shot peening na microdureza, tensão residual e rugosidade no aço JIS SCM 420 HV2, e como objetivos específicos definir os parâmetros adequados para cobertura conforme norma SAE J442, definir pressão de jateamento para obter diferentes alturas de Almen, avaliar perfil de microdureza e tensão residual variando altura de Almen, avaliar a correlação entre a microdureza e tensão residual e avaliar a rugosidade para diferentes alturas de Almen. Foi observado que o shot peening provoca um aumento da microdureza até uma profundidade de 0,06mm, assim como os picos de tensão residual compressiva foram obtidos a uma distancia de 0,03mm, assim como para a rugosidade o que tem maior influencia é a dureza superficial da peça a ser submetida ao shot peening.

Palavras Chave: jateamento com granalhas, microdureza, tensão residual, difração de raios-x

EFFECT OF PROCESS OF SHOT PEENING WITH DIFFERENT CONDITIONS OF ALMEN IN THE PROFILES THE RESIDUAL STRESS, HARDNESS AND ROUGHNESS IN A STEEL CARBURIZED, HARDENED AND TEMPERED USED IN GEARS OF MANUFACTURING AUTOMOTIVE

Jardel Jackson de Oliveira Silva

ABSTRACT

The process of shot peening is part of the family of blasting processes widely used for surface treatment of parts and structures in the industrial sector, it is one of the most effective techniques when it comes to increased resistance to fatigue. The process of shot peening is one of the key steps in the production process of components subject to cyclic stresses and thus fatigue failure. Thus this work has as main objective to study the effects induced by shot peening process in hardness, residual stress and surface roughness in the steel JIS SCM 420 HV2, and as specific objectives set appropriate parameters for coverage as SAE J442, set blasting pressure for different heights of Almen evaluate hardness and residual stress profile of varying height Almen to evaluate the correlation between the hardness and residual stress, and evaluate the surface roughness for different heights of Almen. It was observed that the shot peening causes an increase in microhardness to a depth of 0.06 mm, and the compressive residual stress peaks were obtained at a distance of 0.03 mm, as well as the roughness has the greatest influence is the hardness surface of the part to be submitted to shot peening.

Keywords: shot peening, microhardness, residual stress, x-rays diffraction.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS.....	2
2.1. Justificativa.....	2
2.2. Objetivos Gerais	2
2.3. Objetivos Específicos	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
3.1. Cementação	3
3.1.1. Cementação em meio sólido	4
3.1.2. Cementação em meio gasoso.....	4
3.1.3. Cementação em meio líquido	5
3.2. Shot Peening	7
3.3. Tensões Residuais	20
3.3.1. Determinação de Tensões Residuais	24
3.4. Raios-X.....	26
3.5. Rugosidade	29
4. METODOLOGIA	32
4.1. Material do Corpo de Prova.....	33
4.2. Tratamento Termoquímico das Amostras	35
4.3. Processo de Shot Peening	37
4.3.1. Definição dos parâmetros de shot peening.....	40
4.4. Seleção das Amostras Cementadas para o Processo de Shot Peening	45
4.5. Caracterização das Amostras	46
4.5.1. Corte e preparação metalográfica	46
4.5.2. Medição de dureza e microdureza.....	48
4.5.3. Análise do Perfil de Tensão Residual	49
4.6. Rugosidade	53
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1. Caracterização do Material de Base.....	55
5.2. Caracterização das Amostras Cementadas	56
5.2.1. Seleção das amostras	56
5.2.1.2. Perfil de microdureza das amostras cementadas	57

5.2.1.3. Caracterização metalográfica das amostras cementadas	58
5.2.1.4. Perfil de tensão residual das amostras cementadas	59
5.3. Caracterização das Amostras com Shot Peening	60
5.3.1. Dureza das amostras com shot peening	60
5.3.2. Perfis de microdureza das amostras com shot peening	60
5.3.3. Microestrutura das amostras com shot peening.....	65
5.3.4. Perfis de tensão residual das amostras com shot peening	68
5.3.5. Rugosidade.....	73
6. CONCLUSÕES.....	77
7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	79
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
9. ANEXOS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de uma engrenagem sendo jateada. (http://www.tmfshotpeening.com)	8
Figura 2 - Artigos publicados nos últimos 10 anos listados pelo site www.sciencedirect.com utilizando o tema shot peening como filtro de busca. (AUTOR)	10
Figura 3 – Distribuição das tensões após Shot Peening. (MIC, 2006)	11
Figura 4 – Pareto com filtros de pesquisa para demonstrar em que temas estão concentrados os temas de pesquisadas relacionados ao shot peening retirado do www.sciencedirect.com (AUTOR).	14
Figura 5 – Representação esquemática das deformações plásticas e elásticas causadas por uma esfera contra a superfície de um material, mostradas esquematicamente (KOBAYASHI, 1998).	17
Figura 6 – Sistema de medição da intensidade Almen (PROGRESSIVE TECHNOLOGIES, 2008)	18
Figura 7 – Superfície com diferentes percentuais de cobertura. (SILVA, 2008)	19
Figura 8 - Ilustração do processo de shot peening e perfil de tensão residual característica.	21
Figura 9 – Principais propriedades do perfil de tensões residuais em uma placa submetida ao processo de shot peening. (HOESCH, 1987)	22
Figura 10 – Esquema da interação mecânica / térmica / metalúrgica da origem das tensões residuais. (CALLE, 2004)	23
Figura 11 – Sobreposição de tensões geradas pelo processo de shot peening (A) e tensões elásticas produzidas por uma flexão simples (B). (DALY, 1990)	24
Figura 12 – Espalhamento descrito pela Lei de Bragg	27
Figura 13 – Variação do ângulo Ψ para medição de diferentes orientações cristalinas. (SCURACCHIO, 2012)	28
Figura 14 – Perfil de várias geometrias com mesmo valor de rugosidade R_a .	30
Figura 15 – Fluxograma para ilustrar as etapas desenvolvidas no projeto	33
Figura 16 – Microestrutura do forjado conforme fornecido.	34
Figura 17 – Corpo de prova após o processo final de acabamento com operação de shot peening. (AUTOR)	35
Figura 18 – Etapas do processo de cementação e têmpera das amostras	36
Figura 19 – Etapa 6 revenimento em forno batch.	36
Figura 20 – Esquema do bico de máquinas do tipo Air Blast Shot Peening	37
Figura 21 – Máquina Sinto ABT3 onde foram processadas as peças. (AUTOR)	38
Figura 22 – Lâmina pintada de vermelho sem processamento por shot peening.	39
Figura 23 – (A) Almen Gage #2 Eletronics Inc. (B) Disp. de fixação lâmina.	40
Figura 24 – Medição do comprimento de 10 esferas de granalhas alinhadas. (AUTOR)	41
Figura 25 – Detalhes da metodologia de calibração da vazão. (A) Saco de teste amarrado na saída do bico de jateamento. (B) Pesagem do saco após 30 segundos de jateamento.	42
Figura 26 – Lâmina após 2 segundos de shot peening com 94% de cobertura.	43
Figura 27 – Lâmina após 4 segundos de shot peening com 97% de cobertura.	43
Figura 28 – Lâmina após 6 segundos de shot peening com 99% de cobertura.	44
Figura 29 – Sentido da rotação e distância entre o bico de jateamento e o corpo de prova.	45

Figura 30 – Primeiro corte para preparação da amostra para caracterização de microestrutura e microdureza antes do processo de shot peening.....	46
Figura 31 - Prensa para embutimento da marca struers modelo CitoPress-1.	47
Figura 32 – Politriz automática da marca Struers modelo Tegraforce 6.	47
Figura 33 – <i>Desenho esquemático das medições de dureza de núcleo.</i>	48
Figura 34 – Desenho esquemático de impressões para medição de perfil de microdureza.	48
Figura 35 - (A) durômetro; (B) Microdurômetro utilizados nas medições de dureza.	49
Figura 36 - Retirada do segundo corpo de prova para tensão após shot peening.....	50
Figura 37 – (A) Detalhe do ponto de medição da tensão residual, (B) Detalhe da amostra para difração de Raio-X e (C) detalhe do campo concentrador de tensões.....	50
Figura 38 – Medidor de contorno mitutoyo.....	51
Figura 39 - Difratorômetro de Raio-X Rigaku RINT 200 pertencente ao IPEN/CNEN-SP.....	52
Figura 40 – Dispositivo utilizado por Oliveira, 2011 para medição de tensão residual similar ao utilizado para medição das amostras neste trabalho.....	52
Figura 41 – Sentido das medições axial e radial da rugosidade.	53
Figura 42 – Engrenagem com demonstração do lado funcional (Right Flank – Drive).....	53
Figura 43 – Medidor de rugosidade Mitutoyo.	54
Figura 44 – Microestrutura ferrítica e perlítica da pré-forma forjado após o processo de normalização.....	56
Figura 45 – Gráfico do perfil médio de microdureza das amostras cementadas.....	58
Figura 46 – Descrição das características do corpo de prova confeccionado para análise de microestrutura.	59
Figura 47 – Perfil médio da tensão residual das amostras cementadas.....	60
Figura 48 – Perfil médio de microdureza das amostras tratadas com shot peening na condição 1 (0,3mmA).....	61
Figura 49 – Perfil médio de microdureza das amostras tratadas com shot peening na condição 2 (0,4mmA / 12 segundos).....	62
Figura 50 – Perfil médio de microdureza das amostras tratadas com shot peening na condição 3 (0,4mmA / 24 segundos).....	63
Figura 51 – Perfil médio de microdureza das amostras tratadas com shot peening na condição 4 (0,5mmA / 12 segundos).....	64
Figura 52 – Comparativo das diferentes condições de shot peening com as amostras apenas cementadas.....	65
Figura 53 – Microestrutura após o shot peening com altura de arco de 0,3mmA não houve alterações significativas, mantendo a matriz martensítica.	66
Figura 54 – Microestrutura após o shot peening para condição 2, camada microencruada e mais escura na superfície.	67
Figura 55 – Microestrutura após o shot peening para condição 3, camada microencruada e mais escura na superfície.	67
Figura 56 – Microestrutura após o shot peening para condição 4, camada microencruada e mais escura na superfície.	68
Figura 57 – Perfil de tensão residual compressiva para amostra com shot peening na condição 1 (0,3mmA / 12segundos).....	69
Figura 58 – Perfil de tensão residual compressiva para amostra com shot peening na condição 2 (0,4mmA / 12segundos).....	70

Figura 59 – Perfil de tensão residual compressiva para amostra com shot peening na condição 3 (0,4mmA / 24 segundos).....	71
Figura 60 – Perfil de tensão residual compressiva para amostra com shot peening na condição 3 (0,5mmA / 12 segundos).....	72
Figura 61 – Comparativo das diferentes condições de shot peening com as amostras apenas cementadas.....	72
Figura 62 – Perfis de tensão residual obtidos por Llaneza e Belzunce para uma amostra temperada e revenida a 200°C	73
Figura 63 – Comparativo da rugosidade superficial R _{máx} nos flancos dos dentes esquerdo e direito em diferentes condições de Almen.	74
Figura 64 – Comparativo da rugosidade superficial R _a nos flancos dos dentes esquerdo e direito em diferentes condições de Almen.	76
Figura 65 – Valores obtidos para rugosidade R _a e R _{máx} . (LLANEZA e BELZUNCE, 2015)76	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição de banho de sal para cementação líquida. (CHIAVERINI, 1979)	6
Tabela 2. Incremento típico da vida útil pela aplicação do shot peening.....	12
Tabela 3 - Composição química do aço JIS SCM 420 HV2 (SAE 4130).....	34
Tabela 4 – Tabela de especificação de granalha. (TOYO SEIKO).....	38
Tabela 5 – Parâmetros de testes.	45
Tabela 6 – Parâmetros de medição da rugosidade.....	54
Tabela 7 – Composição química das amostras por espectrometria computadorizada do laboratório SIMISA.	55
Tabela 8 – Dureza de núcleo e superficial das amostras selecionadas.	57

1. INTRODUÇÃO

O processo de shot peening faz parte da família de processos de jateamento usado amplamente para tratamento superficial de peças e estruturas. No ramo industrial, é uma das técnicas mais eficazes quando o assunto é aumento de resistência à fadiga. O processo de shot peening é uma das principais etapas no processo de produção de componentes sujeitos a esforços cíclicos, e, conseqüentemente, falha por fadiga. A utilização do termo shot peening é universalmente aceito e decorre da intenção de caracterizar que não se trata de um simples jateamento, mas de uma ferramenta de precisão, que depende de uma série de fatores, o que o torna rigorosamente controlável e repetível. É um processo de trabalho a frio que consiste no jateamento repetitivo com esferas de aço, cerâmica ou vidro, na superfície das peças. O processo de shot peening como um processo especial, onde tensões são induzidas para que haja um incremento da vida em fadiga. Estas tensões são na realidade tensões compressivas e alteram as condições de propagação e nucleação das trincas a partir de um determinado ponto na superfície da peça, região esta sempre sujeita às maiores tensões de trabalhos, incrementando de uma maneira sensível a vida em fadiga das peças (CALLE, 2004 e 2009).

Com o avanço da engenharia e o aumento do nível de exigências do mercado e dos consumidores, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento e melhoramento de componentes e conjuntos montados que são embarcados nos automóveis, aviões, embarcações, implantes biomédicos e etc. Com isso várias pesquisas em novos materiais, processos e técnicas para aumento de resistência à fadiga de componentes críticos (engrenagens, eixos, suportes de fixação, itens de chassis, implantes, etc.) tem se tornado cada vez mais necessária. Tensões residuais compressivas alteram mecanicamente a microestrutura do material promovendo melhoras nas propriedades mecânicas dos componentes tratados, estendendo, desta maneira, a sua vida útil.

2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

2.1. Justificativa

Embora seja um processo relativamente antigo, não existem muitos dados científicos a respeito. Maior parte do conhecimento a respeito do Shot Peening foi obtida de forma empírica por grandes empresas dos setores automotivo, naval e aeroespacial. Porém nos últimos anos podemos observar uma tendência de crescimento nas pesquisas científicas a respeito, inclusive na área de saúde para fabricação de próteses e implantes ósseos. Este trabalho neste contexto vem a agregar maior conhecimento a respeito do processo de shot peening e de seus parâmetros nas tensões residuais e conseqüentemente na vida a fadiga, no aumento da microdureza e no acabamento superficial, condições que podem levar melhorias significativas na resistência ao desgaste.

2.2. Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo geral estudar os efeitos induzidos pelo processo de shot peening na microdureza, tensão residual e rugosidade no aço JIS SCM 420 HV2.

2.3. Objetivos Específicos

E como objetivos específicos definir os parâmetros adequados para cobertura conforme norma SAE J442, definir pressão de jateamento para obter diferentes alturas de Almen, avaliar perfil de microdureza e tensão residual variando altura de Almen, avaliar a correlação entre a microdureza e tensão residual e avaliar a rugosidade para diferentes alturas de Almen. Na sequência serão apresentados no capítulo 2 os assuntos pertinentes ao tema desenvolvido nesse trabalho, capítulo 3 a metodologia aplicada, capítulo 4 resultados e discussões e finalmente no capítulo 5 as conclusões do trabalho.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Cementação

A cementação é um tratamento termoquímico aplicado em peças/componentes em aço de baixo carbono. Consiste basicamente de enriquecimento superficial de carbono através de processos difusivos, seguido de têmpera para a obtenção de superfícies significativamente duras e núcleos tenazes, conferindo às peças elevada dureza superficial, resistência mecânica, resistência à fadiga e resistência ao desgaste entre outros aspectos. Aços cementados apresentam esta combinação de propriedades preferenciais na confecção de componentes mecânicos sujeitos às elevadas tensões e solicitações cíclicas, tais como, eixos, mancais e engrenagens (dentes cementados), matrizes para estampagem, pinos móveis e eixos.

O processo de cementação é constituído basicamente de duas etapas, sendo a primeira de difusão de carbono na superfície e a segunda de têmpera da peça. A difusão resulta num gradiente de concentração de carbono na camada cementada, de cerca de 1,0% na superfície até o teor de carbono original do aço, geralmente 0,2% (GROSCH, 1993). A têmpera posterior tem como resultados um gradiente de dureza e um perfil de tensões residuais compressivas na camada cementada. O teor de carbono superficial é controlado pela concentração de carbono na atmosfera cementante. A profundidade da camada é controlada de acordo com a temperatura e o tempo de exposição à atmosfera cementante, sendo que essa temperatura normalmente varia de 850°C a 1050°C, desde que essa temperatura esteja dentro do campo austenítico, tendo limitação da temperatura pela possibilidade de crescimento do tamanho de grão, consequentemente reduzindo assim sua resistência mecânica.

A escolha do aço a ser cementado deve levar em conta dois fatores principais: o meio de resfriamento ao qual o aço será submetido após a cementação e os níveis e os tipos de tensões que a peça estará sujeito (CHIAVERINI, 1979). Para que ocorra a têmpera após o tratamento de cementação os meios utilizados para o resfriamento das peças são as soluções aquosas e o óleo. As soluções aquosas são os meios mais drásticos de resfriamento e assim os mais efetivos.

Porém esse tipo de resfriamento não é aconselhável para peças com pequenas espessuras e quando há a possibilidade de empenamento. Quando é necessária uma dureza substancial na peça, sem que haja distorções ou trincas, normalmente em caso de peças com seções finas ou com probabilidade de empeno, usa-se um meio mais brando de resfriamento, e assim devem ser utilizados aços com alguns elementos de liga, que confirmam maior temperabilidade à liga. (CHIAVERINI, 1979)

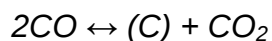
Dependendo do tipo de meio utilizado para gerar a atmosfera na cementação classificam-se diferentes tipos de cementação para os aços, tais como cementação em caixa ou sólida, líquida, gasosa, a vácuo e a plasma.

3.1.1. Cementação em meio sólido

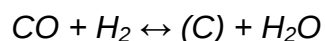
A cementação em meio sólido ou em caixa, é feita colocando-se a peça dentro de uma caixa metálica feita de aço liga resistente ao calor e dentro são colocadas às chamadas misturas carbonetantes, que são compostas basicamente por carvão vegetal e ativadores que podem ser carbonatos alcalinos ou alcalino-terrosos. Essa caixa é posta em um forno a temperaturas em torno de 900°C e, nessa temperatura, o oxigênio presente no ar se combina com o carbono do carvão vegetal gerando dióxido de carbono (CO_2). O Dióxido de carbono se combina com o carbono do carvão incandescente gerando monóxido de carbono (CO) que, por sua vez, irá se combinar com o ferro contido no aço dando origem a cementita (Fe_3C) mais dióxido de carbono. Os ativadores irão ajudar a aumentar a velocidade de reação e enquanto houver carbono para que reaja com o dióxido de carbono a cementação continuará sendo processada. (BARRA, 2013)

3.1.2. Cementação em meio gasoso

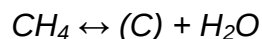
A cementação gasosa tem a mesma finalidade que a cementação sólida, porém o meio em que é feito o tratamento é uma atmosfera rica em gases carbonetantes. Os gases ricos em substâncias carbonáceas podem provir tanto de óxidos de carbono (CO) como de hidrocarbonetos (gás natural, propano, etano, metano e etc). Esses gases, ao serem decompostos, liberarão carbono (C) que atuará na cementação do aço. (CHIAVERINI, 1979). As reações básicas que ocorrem neste tipo de cementação são apresentadas nas equações de 1 a 5.



Equação 1



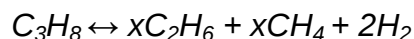
Equação 2



Equação 3



Equação 4



Equação 5

Estas reações mostram que os hidrocarbonetos e o monóxido de carbono, durante a cementação, podem se decompor quase que completamente em carbono e hidrogênio, possibilitando a geração de pontos moles na superfície do aço devido à deposição de carbono livre na mesma. Para evitar esse problema utilizam-se gases do tipo Hidrogênio e Nitrogênio para diluir hidrocarbonetos. O Hidrogênio, mesmo atuando na descarbonetação, também favorece a cementação, pois ajuda a regenerar e formar monóxido de carbono acelerando, assim, o processo. Além desse fator, os gases diluidores atuam garantindo a movimentação dos gases no interior do forno e principalmente gerando pressões positivas em todos os pontos, não havendo a necessidade de adicionar mais gases contendo hidrocarbonetos.

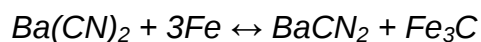
Esse processo tem propriedades superiores ao do tratamento de cementação em meio sólido. Na cementação gasosa não há perda de eficiência do agente carburizante com o tempo, é mais limpo, tendo um melhor controle do processo, crescimento mais rápido da camada, diminuindo o tempo de cementação e menor deformação na peça. Como pontos negativos tem-se um aumento da complexidade do processo, instalações mais caras e necessidade de uma mão de obra mais qualificada para proceder a cementação. (CHIAVERINI, 1979)

3.1.3. Cementação em meio líquido

Existem dois processos de tratamento de cementação distintos: um que acontece a baixas temperaturas, entre 840°C e 900°C, e o outro a altas temperaturas, entre 900°C e 955°C. As composições químicas dos dois banhos também são diferentes como pode ser observado na tabela 1.

O processo que utiliza baixas temperaturas visa produzir menores tamanhos de camada, entre 0,13 a 0,25mm. Por conter maiores teores de cianeto ocorre

também o enriquecimento de nitrogênio na superfície da peça. O processo de cementação (em altas temperaturas) em meio líquido consiste em aquecer a peça acima de Ac_1 (Um pouco acima de A_1) imersa em um sal fundido com substâncias, as quais irão promover o enriquecimento do teor de carbono na superfície da peça. Nesse tipo de tratamento o objetivo é obter camadas que variam de 0,5 até 3,0mm. A principal reação que ocorre nesse tipo de banho na presença de ferro é:



Equação 6

Tabela 1 – Composição de banho de sal para cementação líquida. (CHIAVERINI, 1979)

Constituinte	Composição do Banho, %	
	Camada de Pequena Espessura Baixa Temperatura (840° a 900°C)	Camada de Grande Espessura Alta temperatura (900° a 955°C)
Cianeto de Sódio	10 a 23	6 a 16
Cloreto de Bário	0 a 40	30 a 55
Outros sais alcalinos	0 a 10	0 a 10
Cloreto de Potássio	0 a 25	0 a 20
Cloreto de Sódio	20 a 40	0 a 20
Cabonato de Sódio	30 máx.	30 máx.
Aceleradores outros que compostos de metais alcalinos ferrosos *	0 a 5	0 a 2
Cianato de Sódio	1,0 máx.	0,5 máx.
* Dentre esses aceleradores, incluem-se dióxido de manganês, óxido de ferro, óxido de boro, fluoreto de sódio e carboneto de silício.		

A difusão pode ser seguida de têmpera direta ou seguida de reaustenitização e têmpera. No caso de têmpera direta, ela pode ser feita a partir da temperatura de

difusão ou uma temperatura um pouco menor, aproximadamente 840°C, porém dentro do campo austenítico. A têmpera feita a partir desta temperatura reduz a possibilidade da ocorrência de distorções na peça. A reaustenitização tem como vantagens o melhor controle sobre o tamanho e distribuição de carbonetos na camada cementada, refinamento de grãos e difusão adicional de carbono (HYDE, 1994). Os dois métodos de têmpera são seguidos de revenimento, geralmente em temperaturas que variam de 150° a 180°C. (FERREIRA, 1997)

3.2. Shot Peening

O processo de shot peening é uma etapa fundamental no processo de produção de peças metálicas sujeitos a esforços cíclicos e, por conseguinte, falha por fadiga, como por exemplo, engrenagens (Figura 1). Considerada como uma técnica especial de tratamento superfícies diferencia-se do jateamento convencional por não ter como objetivo principal à limpeza mecânica das peças. Trata-se de uma ferramenta de precisão, decorrente de uma série de fatores controláveis para se induzir tensões compressivas para um aumento da vida em fadiga. Essas tensões de compressão mudam as condições de nucleação e propagação de trincas superficiais das peças, região essa, que sempre estará sujeita às maiores tensões de trabalhos, aumentando de uma maneira sensível à vida em fadiga das peças (CALLE, 2004 e 2009).

Em um breve histórico sobre processo de shot peening, pode-se dizer que o uso de processos de deformação a frio com o intuito de aumentar a resistência mecânica dos metais é bem antigo. Na antiga cidade de Ur, da Mesopotâmia, em 2700 a.C., tem-se informações de martelamento executado manualmente em ouro. Durante as cruzadas de 1100 a 1400, as lâminas das espadas de Damasco e Toledo eram trabalhadas a frio, também manualmente, para dar flexibilidade e resistência ao aço (et al/ TECGAL, 2009).

O processo de martelamento foi usado no forjamento antes da idade do bronze, para aumentar a resistência de armaduras, espadas e ferramentas.

Na guerra civil americana, canos de espingardas foram tratados para aumentar a dureza do aço. E ainda, nos primeiros carros de corrida dos europeus nos anos 20, os raios de concordância das bielas foram manualmente tratados com martelos especiais.

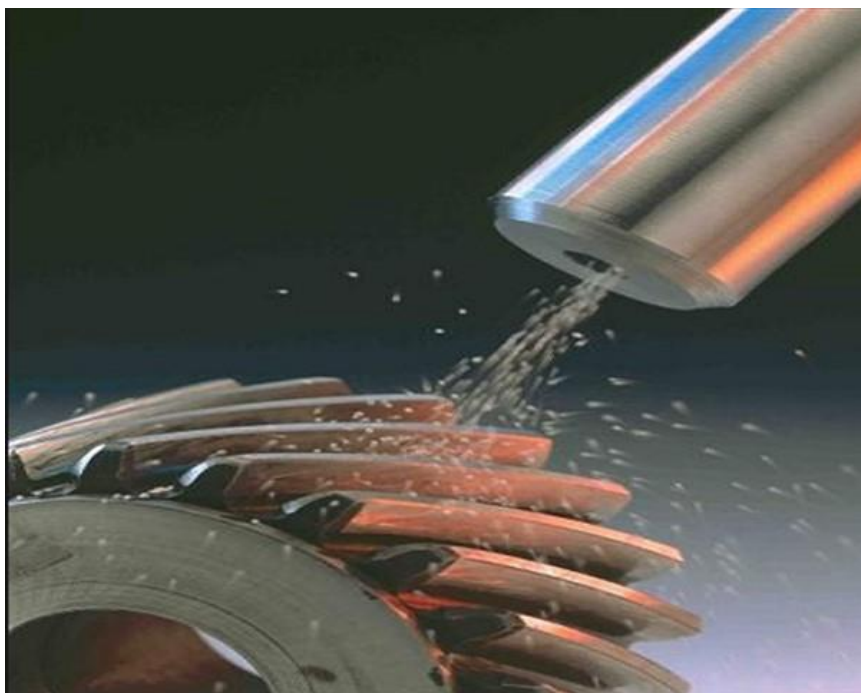


Figura 1 - Ilustração de uma engrenagem sendo jateada. (<http://www.tmfshotpeening.com>)

Porém, na atualidade esses efeitos são conseguidos não mais manualmente, estas peças são trabalhadas com vários recursos e equipamentos de diversas tecnologias. Essas tecnologias surgiram e vem sendo aprimoradas desde o século XX, contudo, podemos considerar que de maneira geral, a sua essência permanece a mesma, ou seja, jatear o material com esferas muito pequenas a alta velocidade, que funcionam de forma similar a um martelar no material, da mesma maneira como era realizada na idade média, uma derivação de um forjamento localizado.

Durante a metade do século XIX, os engenheiros descobriram nos processos de endurecimento superficial um grande potencial e então começou a utilizá-lo de maneira mais frequente, uma das primeiras aplicações industriais que se tem registro foi por volta do ano de 1848 em eixos de suspensão e transmissão ferroviários. (Calle, 2009). Apenas em 1872, nos Estados Unidos, foi patenteado o tratamento do eixo por endurecimento superficial que aumentava em 250% a resistência à flexão (Calle, 2009). Dessa forma, ficou registrado o século XIX como ponto de partida inicial de uma acelerada atividade e busca por conhecimento no campo do endurecimento mecânico, caracterizado também pela maior procura acadêmica do campo de vista de pesquisas mais sérias sobre este fenômeno.

Com a primeira guerra mundial e em seguida a segunda guerra, maior era o desafio em otimizar o desempenho dos aços aumentando assim sua resistência e confiabilidade para que se pudesse ter componentes cada vez mais duráveis. Foi então que, por volta de 1920, o aumento das pesquisas acadêmicas fez surgir os primeiros fundamentos científicos dos processos de endurecimento. Foi por acidente que se observou que peças mecânicas submetidas à limpeza com jato de areia mostravam um rendimento superior e com um incremento na resistência a fadiga. A partir dessa observação passou-se a utilizar o processo de shot peening de forma rudimentar e empírica nas mais variadas aplicações industriais como molas, parafusos, engrenagens, eixos, mancais, rolamentos e etc. Nesta época não existia um conhecimento científico do que acontecia de fato aos componentes de forma que se pudesse padronizar e aumentar a eficiência e eficácia do processo. Esta falta de conhecimento gerou um aumento significativo de pesquisadores interessados pelo fenômeno. Tendo em vista o grande interesse pelo tema o seu desenvolvimento foi relativamente rápido.

Os trabalhos experimentais sobre o shot peening foram bem sucedidos. Por volta de 1936, o cientista sueco Johan August Brinell anunciou a primeira máquina de ensaio de dureza, essa máquina foi utilizada para a implementação do primeiro sistema de produção empregando o endurecimento superficial sob condições controladas. A máquina para testar dureza Brinell ainda é usada na prática industrial.

No entanto, em 1943, a contribuição de J. O. Almen foi de particular importância nos procedimentos de shot peening quando introduziu o medidor de intensidade de shot peening (medidor de Almen), que se tornou o mais efetivo instrumento para controle em produção industrial do shot peening. Assim o shot peening começou a ser empregado de forma padronizada e massiva. (CALLE, 2009)

Naquela época, a ocorrência de falhas dos componentes mecânicos se devia mais às solicitações cíclicas do que ao carregamento estático. Isto levou como consequência, a dar mais atenção ao estudo do comportamento da resistência à fadiga dos materiais, já iniciado por Wölher em 1867. Foi assim que se descobriu a importância do efeito dos processos de endurecimento superficial a frio na vida à fadiga dos componentes mecânicos, entre outros benefícios.

Embora seja um processo relativamente antigo, não existem muitos dados científicos disponíveis a respeito do processo de shot peening. A Maior parte desse conhecimento foi obtida de forma empírica por grandes empresas, que mantêm muitas dessas descobertas e conhecimento “guardados” como *know-how* sem estar compartilhado, o que dificulta o acesso e limita a literatura existente. Porém o interesse de pesquisadores e cientistas tem facilitado a disseminação do conteúdo sobre esse tema. Podemos observar nos últimos 10 anos uma tendência de crescimento nas pesquisas científicas com foco no tratamento superficial de shot peening, com um aumento de aproximadamente 65% na quantidade de artigos publicados em jornais e revistas internacionais (figura 2).

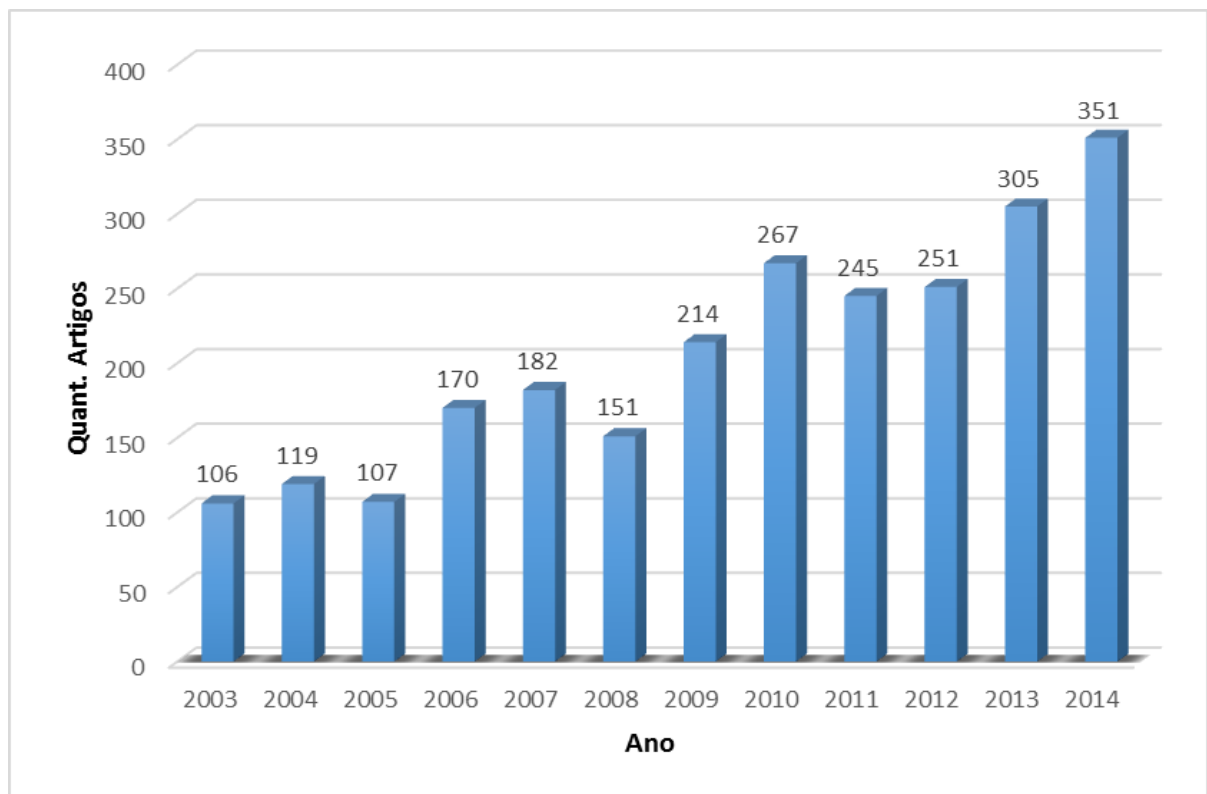


Figura 2 - Artigos publicados nos últimos 10 anos listados pelo site www.sciencedirect.com utilizando o tema shot peening como filtro de busca. (AUTOR)

Atualmente o principal mecanismo aumento da resistência à fadiga é a inclusão de tensões residuais de compressão no material. Os impactos repetitivos das esferas produzem uma distribuição de tensões que variam com a profundidade da peça. O material é deformado plasticamente na região superficial, tendendo a alongar-se (Figura 3). Esta tendência ao alongamento é impedida pela parte inferior,

que se deforma apenas elasticamente, gerando tensões de compressão nas camadas afetadas plasticamente. (DIEPART, 1994). Durante o bombardeio das esferas contra a superfície do material ocorrem deformações plásticas nos grãos superficiais, as quais são produzidas pelas tensões longitudinais, transversais e de compressão. A profundidade da área deformada praticamente é proporcional ao diâmetro da impressão e se estende radialmente do centro até uma distância superior ao diâmetro referido.

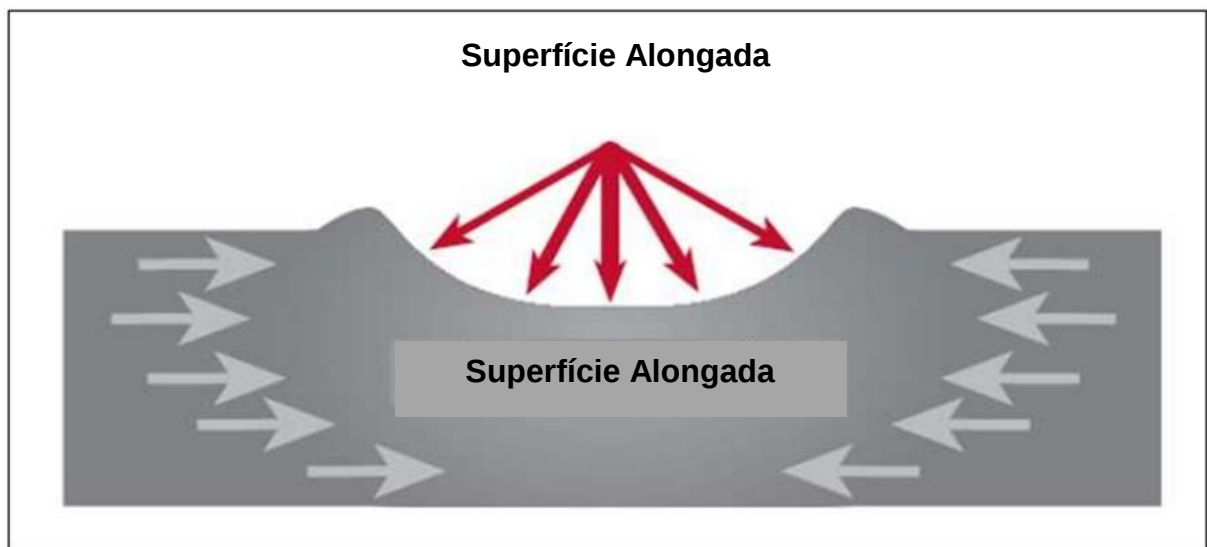


Figura 3 – Distribuição das tensões após Shot Peening. (MIC, 2006)

As tensões residuais de compressão alteram mecanicamente a microestrutura do material promovendo melhoras nas propriedades mecânicas dos componentes tratados, estendendo, desta maneira, a sua vida útil. Porém a melhor condição de características mecânicas para o shot peening depende da combinação de diversos fatores durante o processamento do componente, as variáveis mais comuns que podem ser consideradas para o aumento das propriedades mecânicas após o processo de shot peening são: tensões residuais compressivas induzidas durante o processo, condições de superfície criadas pelo shot peening e a possibilidade desses campos de tensões residuais compressivas criadas para deslocarem a nucleação de trincas para baixo da superfície.

Além disso, o impacto a altas velocidades produz indentações na superfície do material, resultando no aumento da rugosidade superficial, o que proporciona à redução da resistência a fadiga dos componentes tratados (Sharp et al, 1994). As

modificações na superfície induzidas pelo processo de shot peening são a superfície rugosa; o aumento da dureza nas camadas superficiais e o perfil característico de tensão residual. Considerando os danos para a fadiga, a superfície rugosa acelera a nucleação e a propagação das trincas; porém, acontece um retardo no crescimento devido ao aumento da dureza e do perfil de tensão residual, que provoca uma tensão de fechamento da trinca (CURTIS, 2003). O desempenho do material após o shot peening depende do compromisso entre os efeitos benéficos da tensão residual compressiva com os efeitos deletérios da rugosidade superficial.

O processo de shot peening é largamente empregado com uma série de objetivos: aumento da resistência à fadiga, uniformização de tensões nas camadas superficiais, compactação da estrutura cristalina para aumentar a resistência à oxidação, ao atrito e eliminar porosidades, obtenção de rugosidades controladas para reter lubrificação, fixar desmoldantes, etc. (TORRES, 2002; GUAGLIANO; VERGANI, 2004; WANG; WANG, 1998).

Na prática o shot peening se mostra como uma maneira eficiente para conseguir resultados no incremento de vida útil de componentes, como pode ser observado na tabela 2.

Tabela 2. Incremento típico da vida útil pela aplicação do shot peening.

Tipos de componente	Aumento de vida (%)
Molas planas	600*
Molas helicoidais	1370*
Eixo de manivelas	900*
Braço de balancins	1400*
Bielas	1000*
Engrenagens	1500*
Juntas soldadas	400***
Barras de torção	140 - 600**

Virabrequins	3000**
Brocas	25 - 30**
Estampos de corte	100 - 150**
Matrizes forjadas	400 - 800**

Referências: * Sinto Brasil (2007), **Zirtec (2007) e ***Metal Improvement Company (2005)

Segundo Calle *et al* o aspecto mais estudado sobre o shot peening, tanto agora como no século passado, é o aumento da vida à fadiga de diversos componentes mecânicos. Porém, também é estudada a sua utilidade para outras finalidades como, por exemplo, o aumento de dureza em brocas de perfuradoras para mineração, o aumento de resistência à corrosão em aços para conformação de tanques de armazenamento de produtos químicos e de usinas nucleares etc.

Os temas de pesquisas atuais sobre shot peening também procuram caracterizar as distribuições das tensões residuais de compressão com intuito de melhorar o desempenho de diversos componentes mecânicos (OLIVEIRA, 2011). Outra linha de estudo ainda pouco abordada e que é o foco desse trabalho é abordar a relação entre tensões residuais de compressão e a mudança nos perfis de microdureza superficial.

O shot peening é um tema que tem atraído à atenção dos pesquisadores, principalmente quando se trata em aumento da vida útil de componentes. Esse interesse tem aumentado cada vez mais devido a infinita gama de aplicação em diversos campos da engenharia (Figura 4). Atualmente o shot peening pode ser aplicado desde componentes automotivos, aeroespaciais, submarinos, navios, até na área médica em pinos, placas e articulações para implantes médicos.

Quando se cria filtro de busca no sitio eletrônico de hospedagem de material científico “*Science direct*” pode-se verificar a diversidade de temas em que o termo shot peening está relacionado (Figura 4).

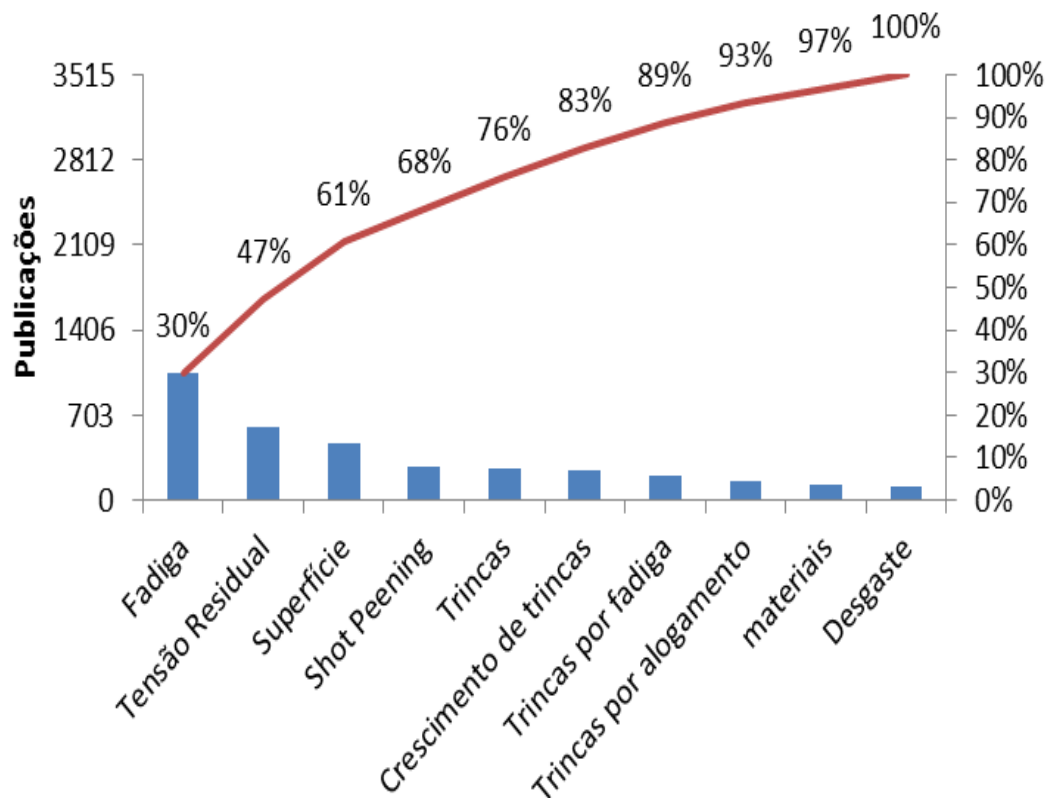


Figura 4 – Pareto com filtros de pesquisa para demonstrar em que temas estão concentrados os temas de pesquisadas relacionados ao shot peening retirado do www.sciencedirect.com (AUTOR).

Embora exista uma diversidade nos temas das pesquisas o que pode ser observado é que em sua maioria a intensão dos pesquisadores é estudar o efeito do shot peening no comportamento de fadiga dos materiais com intuito de aumentar a resistência dos materiais e componentes tornando-os mais confiáveis.

Pode-se afirmar que hoje o maior desafio para pesquisadores que trabalham com o shot peening é descrever um modelo matemático que defina o shot peening. Atualmente maior parte dos modelos existentes baseia-se em modelos estáticos, considerando a indentação formada por apenas uma esfera em um único local de contato, a partir do instante que vários choques são adicionados o cálculo passa a ficar muito complexo.

Llaneza, Belzunce (2015) avaliaram diferentes amostras do aço AISI 4340 foram criadas seis amostras com diferentes características e propriedades mecânicas, então foi estudado o comportamento da rugosidade, tamanho da marca de impacto causada pela esfera, tensão residual compressiva e o encruamento

causado a partir da variação da deflexão de Almen. Primeiramente o aço foi submetido à austenitização a 850°C por 45 minutos e temperado em água (Q) logo em seguida submetido ao tratamento de revenimento, onde, cada amostra foi revenida a uma determinada temperatura que variou de 200°C a 680°C durante um tempo de 150 minutos. Gerando as amostras conforme a tabela 4. Em seguida as amostras foram submetidas a diferentes condições de shot peening, onde foi variada a deflexão de Almen com objetivo de se obter variadas condições de superfície, para que isso seja possível foram variados basicamente dois parâmetros: a pressão de jateamento, o diâmetro da esfera, que consequentemente interfere diretamente na velocidade da esfera, permanecendo fixo o ângulo de impacto, a distância entre o bico e as amostras e o diâmetro do bico de jateamento.

- VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SHOT PEENING

Os parâmetros que influenciam na eficiência do processo de shot peening podem ser divididos em três diferentes classes, cada uma delas associada às condições experimentais específicas:

- Parâmetros do material da peça: geometria e propriedades mecânicas;
- Parâmetros de contato: coeficiente de atrito entre a esfera e o material e o coeficiente de restituição, que dependem da razão entre a dureza do material tratado e da esfera utilizada.
- Parâmetros de fluxo: propriedades da esfera (tipo, tamanho, material, massa específica, dureza, etc.), velocidade, ângulo de impacto, duração e distância do jateamento ao material tratado;

Com relação ao tipo de material das esferas utilizadas no processo de shot peening, basicamente se dividem em 3 tipos: esferas de ferro fundido, esferas de aço e esferas de cerâmica/vidro. As esferas de ferro fundido são quebradiças e possuem dureza que varia de 58 HRC a 68 HRC; As esferas de aço são mais dúcteis e menos quebradiças tem dureza que variam entre 40 HRC a 50 HRC; As de cerâmica e vidro são normalmente utilizadas para materiais que podem ser contaminados pelo jateamento, sua dureza pode variar 58 HRC a 63 HRC para

cerâmicas e 46 HRC a 50 HRC para vidros e podem ser utilizadas tanto em processos úmidos como em processos a seco. As variações na dureza da esfera utilizada não afetam a intensidade do shot peening, desde que sejam mais duras do que o elemento que receba o tratamento. Por outro lado, se a dureza do material a ser tratado for maior do que a da esfera, então pode haver uma diminuição na intensidade (CAO; FATHALLAH; CASTEX, 1995).

Atualmente existe uma diversidade muito grande nos diâmetros e tamanhos das esferas, as que podem ser encontradas comercialmente variam de 0,18 mm a 2,4 mm de diâmetro. Dependendo dos parâmetros de jateamento, como o diâmetro das esferas e do componente, a profundidade de jateamento, esferas e do componente, a profundidade de deformação plástica pode ser de alguns micrometros a valores tão elevados quanto 1,6mm para alguns materiais (WANG, 1998). Conforme se pode observar na figura 5, pode-se ver a dimensão da zona deformada plasticamente (hp) em função do impacto de cada esfera, que podem ser correlacionadas pela equação 9 (KOBAYASHI, 1998).

$$\frac{hp}{R} = k * \sqrt{\left(\frac{z}{R}\right)}$$

Equação 7

Onde:

k é uma constante do material

z é a profundidade de impressão e

R é o raio da esfera.

Os parâmetros de fluxo de velocidade e angulo de impacto das esferas estão diretamente ligados à energia de impacto para as deformações responsáveis pelas tensões residuais.

O aumento da velocidade das esferas faz com que aumente a intensidade do shot peening. Porém, uma velocidade muito alta resulta na necessidade de um bom controle no desgaste e/ou na quebra das esferas utilizadas no processo (TORRES, 2002).

Ângulo de Impacto, por definição, é de 90° ou menor entre a superfície da peça tratada e a direção da rajada. Quanto menor for o ângulo de impacto, menor será a intensidade de peening. Se o formato da peça não permitir um ângulo adequado de impacto, este deverá ser compensado, para a obtenção da intensidade de peening desejada, através da variação de outros fatores, como o tamanho da esfera ou sua velocidade. Além disso, a distância entre o bico ejetor e a superfície da peça também exerce influência na intensidade do shot peening. Quanto maior for à distância, menor serão a intensidade e a cobertura obtidas (TORRES, 2002).

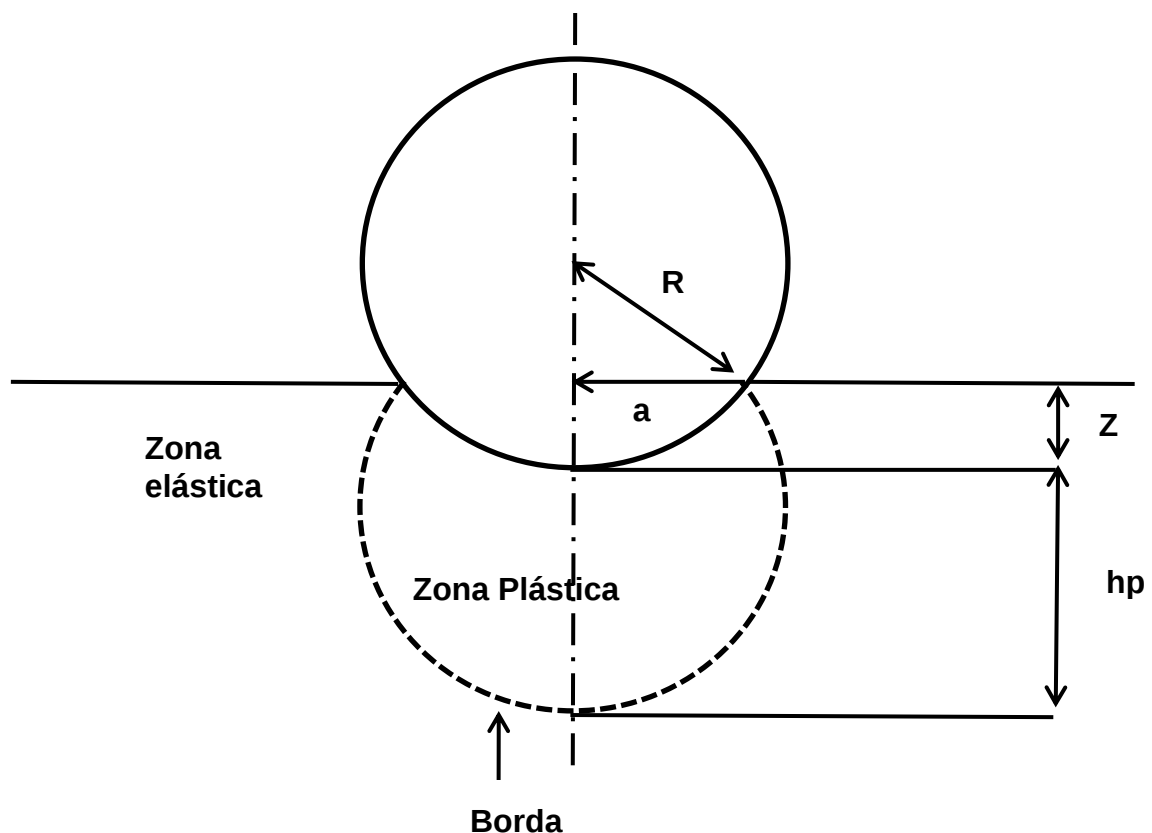


Figura 5 – Representação esquemática das deformações plásticas e elásticas causadas por uma esfera contra a superfície de um material, mostradas esquematicamente (KOBAYASHI, 1998).

Para máquinas do tipo “*air blast*” a pressão é um fator fundamental no processo de shot peening, pois o ar é o responsável pelo deslocamento e aceleração das esferas de aço, pode ser considerado como o parâmetro mais importante para esse tipo de equipamento, pois interfere diretamente na curvatura

do almen e na superfície de cobertura. Atualmente, estes dois parâmetros são os mais importantes o controle do processo de shot peening (BALAN, 2007).

A intensidade de Almen pode ser descrita como: à diferença entre a medida da altura do arco da lâmina de teste Almen antes e após de ser submetida ao processo de shot peening, em um único lado da lâmina. Esta técnica é utilizada para estimar a intensidade do processo de shot peening para determinados parâmetros de operação. O teste de Almen é o sistema industrial de medição de maior utilização devido a sua praticidade e seus custos, quando comparados com a medição de tensão residual por raio-x, a deflexão de Almen podem ser considerados como um padrão de controle da intensidade do processo de shot peening.

Conforme pode ser observado na figura 6, existem três padrões de placa Almen no uso corrente: “N”, “A” e “C”. A diferença de cada uma está na sua espessura.

A definição por qual tipo de lâmina de almen utilizar para controle do processo de shot peening estará ligada a intensidade da tensão residual compressiva desejada para o componente a ser jateado.

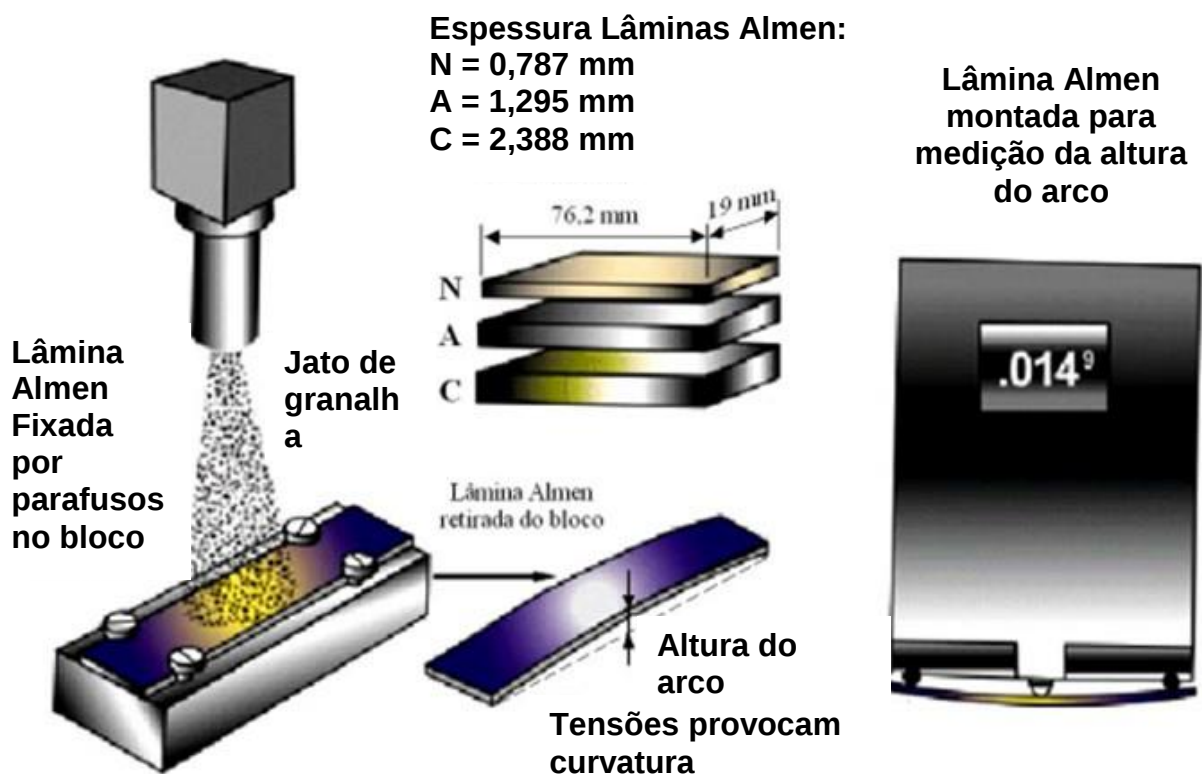


Figura 6 – Sistema de medição da intensidade Almen (PROGRESSIVE TECHNOLOGIES, 2008)

- SUPERFÍCIE DE COBERTURA

É o percentual de uma determinada área atingida pelas esferas (equação 8). Segundo Calle, 2009 a cobertura é considerada como uma força de uma determinada magnitude na qual pode estimar o quão completa será uma área, submetida ao shot peening. Esse tipo de mensuração indica o quanto de área foi coberta pelas indentações criadas pelos impactos das granalhas, e pode ser descrito como a relação entre cobertura e o número de ciclos de exposição, expresso pela equação 8.

$$C_n = 1 - (1 - C_1)^n$$

Equação 8

Onde,

C_n , É o percentual de cobertura (decimal) após o “n” ciclos;

C_1 , É o percentual de cobertura após o 1º ciclo;

N , é o número de ciclos.

Para a aplicação do shot peening foi convencionado que é necessário atingir 100% de cobertura, de outra maneira não seria possível melhorar as propriedades mecânicas do elemento submetido ao tratamento. Na prática, considera-se como ideal uma medição de cobertura de 98%, visto que, para se conseguir uma cobertura de considerada como de 100% seria necessário um tempo muito longo de exposição, no entanto não se teria grandes acréscimos de tensão residual.

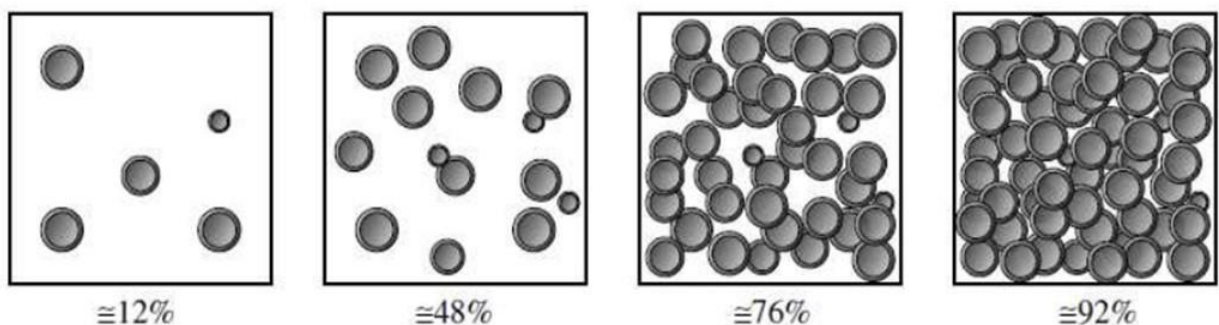


Figura 7 – Superfície com diferentes percentuais de cobertura. (SILVA, 2008)

. Operações de shot peening executadas em tempos menores que o de saturação não é comum. Isto se deve ao fato que as pequenas áreas não atingidas pelas indentações poderiam atuar como pontos de iniciação de falhas, de modo que terminam prejudicando as propriedades mecânicas. Por este motivo, a cobertura é expressa em porcentagem e como múltiplo do tempo de exposição requerido para a saturação. Sendo assim é comum valores de cobertura maiores que 100%. Por exemplo, uma especificação de 200% de cobertura significa uma exposição, ao processo de shot peening, do dobro do tempo necessário para atingir a saturação. (CALLE, 2009)

3.3. Tensões Residuais

As tensões residuais podem ser definidas como as tensões que continuam em um componente na ausência de influências externas como forças, deslocamentos ou gradientes de temperatura. Todas as tensões residuais têm origem em deformações plásticas distribuídas de forma irregular, e estas podem ser geradas de forma mecânica, térmica ou metalúrgica (CALLE, 2004).

Por definição, tensões residuais são tensões auto-balanceadas que existem em um material sob condições uniformes de temperatura e sem que nele sejam aplicadas forças externas. As tensões residuais sendo auto-balanceadas fazem com que o momento resultante e a força resultante produzidos por elas tendam a zero (CARVALHO, 2004; PYZALLA, 2000).

Por convenção, a tensão de tração recebe o sinal positivo ($+\sigma$) e a compressiva o sinal negativo ($-\sigma$). O shot peening é um processo que cria uma camada, deformada plasticamente, de proteção de tensão residual de compressão devido ao impacto de esferas conforme pode ser visto na figura 8. (CARDOZO, 2008)

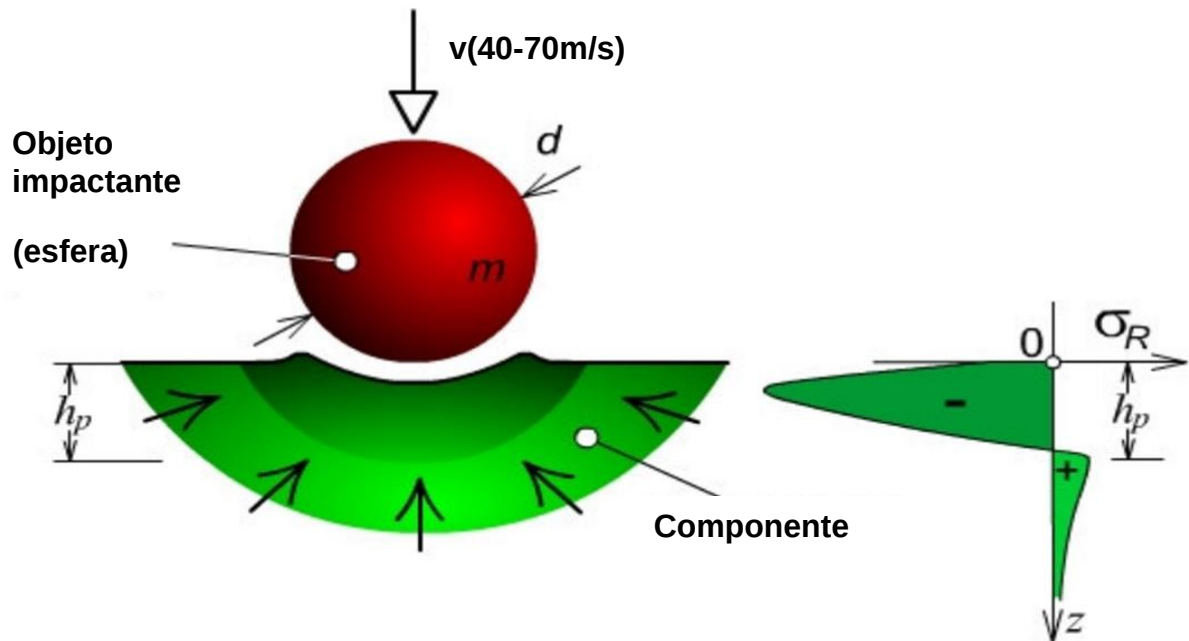


Figura 8 - Ilustração do processo de shot peening e perfil de tensão residual característica.

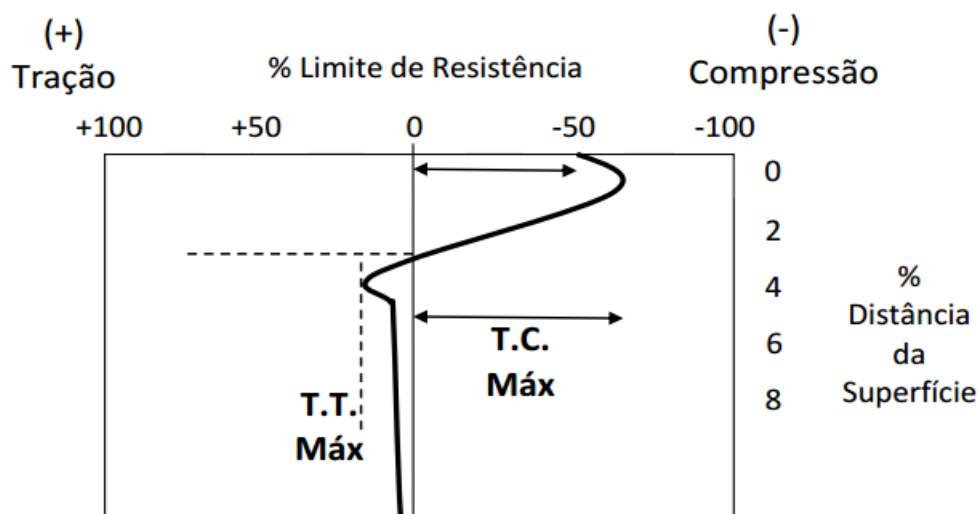
O sistema de tensões residuais pode ser descrito em três escalas de magnitude (TORRES, 2002; MACHERAUCH; KLOOS, 1987; FONSECA, 2000):

- **Macroscópica:** contempla toda a seção de uma peça, sendo praticamente constante em grandes extensões de áreas e é caracterizada pelo equilíbrio dentro de todo o corpo; se áreas próximas à superfície estão em compressão residual, às áreas no centro devem estar em tração residual para balancear os sistemas de forças.
- **Macroestrutural:** é usada quando se consideram as tensões sobre um grão individual, ou grupos de grãos. Os grãos são afetados pelo campo de macrotensões, através de interfaces, entre partículas e matriz. As tensões residuais ocorrem pela heterogeneidade e anisotropia de cada cristal ou grão de material policristalino.
- **Microlocalizada:** cada grão é composto de uma estrutura cristalina tridimensional de átomos. As tensões são distribuídas por volumes submicroscópicos em distâncias interatômicas dentro de um grão e equilibram-se em pequenas partes deles. A magnitude dessas tensões ocorre em função de defeitos cristalinos, tais como discordâncias, inclusões e contorno de grãos.

Como pode ser analisado na figura 9 um campo de tensões característico gerado pelo efeito da técnica de shot peening e suas alterações ao longo da

profundidade do material. Observa-se que as tensões residuais de compressão mostram-se limitadas em uma pequena camada superficial e que as tensões residuais são equilibradas pelo fato de existirem tensões residuais trativas que equilibram as tensões residuais compressivas. As tensões residuais trativas são de menor magnitude, porém a existência de um forte gradiente de tensões existente na transição entre as regiões compressiva e trativa.

Os perfis de tensões residuais gerados pelo shot peening também podem variar de acordo com o material que está sendo jateado, porém é muito difícil encontrar materiais que não reproduzam esse perfil característico. Pode-se descrever que na superfície tem um valor de tensão sensivelmente menor, quando vai aprofundando em direção ao núcleo esse valor de tensão residual tende a aumentar até chegar a seu valor máximo de tensão residual compressiva e então volta diminuir até chegar ao ponto onde passa a ser tensão residual trativa entra em equilíbrio.



T.S. (Tensão superficial) - Tensão residual medida exatamente na superfície do material;

T.C. Máx. (Tensão compressiva máxima) - Máximo valor da tensão residual compressiva, situada pouco abaixo da superfície;

P (Profundidade) - Profundidade da camada compressiva determinada pelo ponto em que a tensão residual passa pelo ponto 0;

T.T. Máx. (Tensão trativa máxima) - Máximo valor de tensão residual de tração.

Figura 9 – Principais propriedades do perfil de tensões residuais em uma placa submetida ao processo de shot peening. (HOESCH, 1987)

As tensões residuais geradas de forma mecânica são produzidas por deformações plásticas não uniformes provocados por processos de manufatura mecânica. As geradas de forma térmica são consequência do aquecimento ou resfriamento não homogêneo do material provocado por tratamentos térmicos ou processos que envolvem altos gradientes de temperatura. Finalmente, as geradas de forma metalúrgica estão associadas com reações químicas, precipitações e transformações de fase não uniformes produzidas por tratamentos térmicos e a exposição com produtos químicos na superfície do material.

Os processos de manufatura mecânica, dependendo da quantidade de deformação plástica induzida em determinado intervalo de tempo, podem produzir um aumento de temperatura significativo que produz a dilatação térmica do material deformado. Da mesma maneira, alguns tratamentos térmicos promovem uma transformação de fase do material tratado a qual origina tensões residuais. Portanto, estas três fontes podem interagir entre si, de maneira que as tensões residuais podem ser consequência de mais de mais de uma delas, como podemos observar na figura 9 (CALLE, 2009).

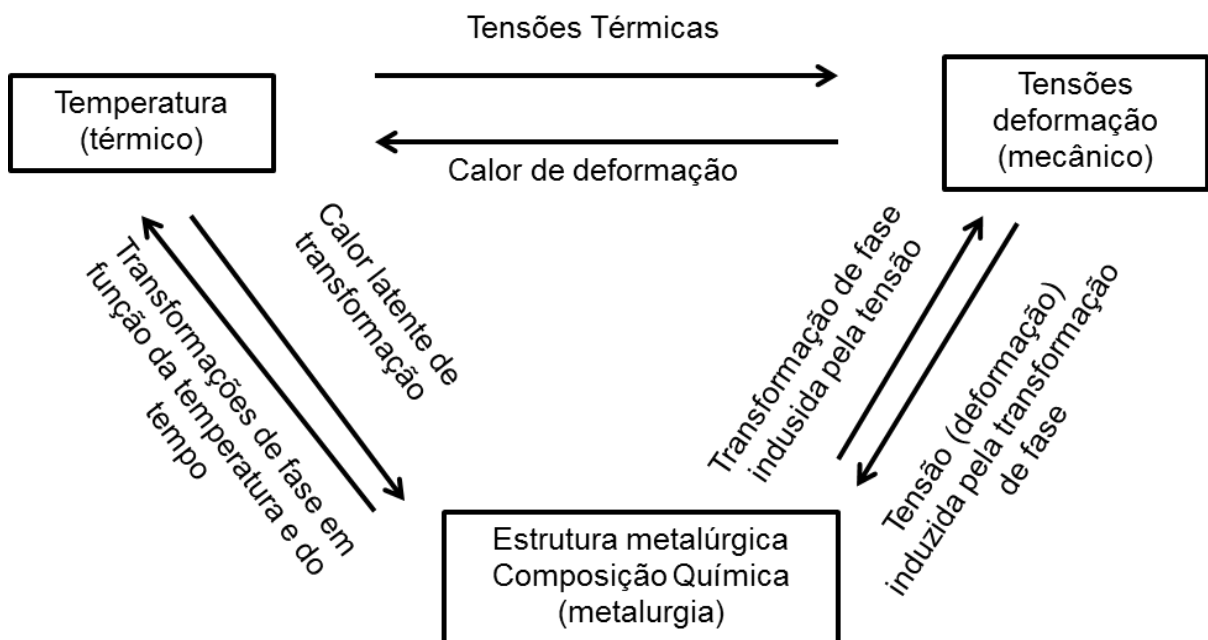


Figura 10 – Esquema da interação mecânica / térmica / metalúrgica da origem das tensões residuais. (CALLE, 2004)

A Figura 11 apresenta, qualitativamente, a superposição dos campos de tensão residual de compressão induzida pela técnica de shot peening, e de tensões

trativas aplicadas em um componente durante o seu uso, na parte “A” demonstra um perfil de tensões residuais para uma barra que foi submetida ao processo de shot peening em ambas as superfícies. A parte “B” apresenta a distribuição de tensões na mesma barra submetida ao shot peening, seguida de uma aplicação de força de flexão ou dobramento, que gera uma tensão trativa em uma das superfícies. Logo após o carregamento, esta tensão de tração é reduzida pela tensão de compressão residual pré-existente, de forma que esta nova condição reduz a tendência não só da iniciação de uma trinca, mas como a sua propagação.

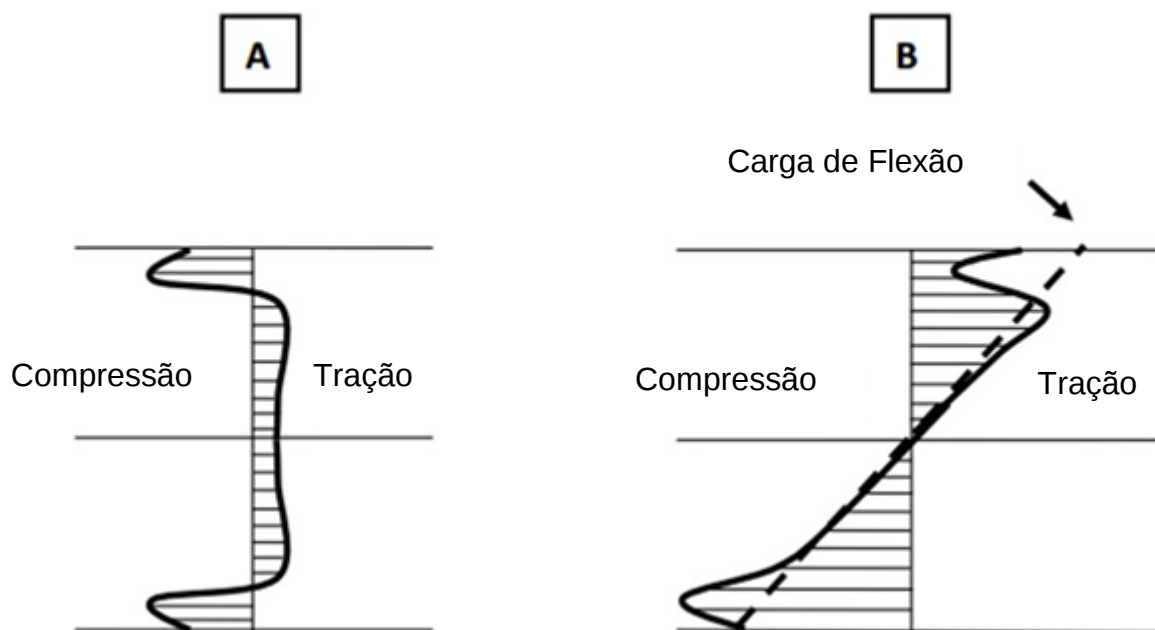


Figura 11 – Sobreposição de tensões geradas pelo processo de shot peening (A) e tensões elásticas produzidas por uma flexão simples (B). (DALY, 1990)

3.3.1. Determinação de Tensões Residuais

Para um melhor aproveitamento e otimização dos componentes mecânicos é fundamental que se tenha o conhecimento da natureza, magnitude e perfis de tensões residuais, tendo em vista que esses fatores influenciam diretamente na integridade e propriedades mecânicas, que consequentemente está diretamente ligado com o desempenho, durabilidade, resistência e integridade dos componentes.

Podem-se dividir os métodos de medida de tensões residuais em dois grupos: destrutivos e não destrutivos. Em alguns casos os métodos de mensuração

aproveitam o fato que toda tensão aplicada induz uma deformação proporcional às tensões aplicadas. No fim todos os métodos têm como objetivo final realizar análises qualitativas e quantitativas e correlacioná-las com as tensões pré-existentes.

Segundo Scuracchio os principais métodos destrutivos incluem medidas que se fundamentam na supressão do estado de equilíbrio das tensões residuais macroscópicas, no ponto ou região de medida, através de remoção por ataque químico ou corte da amostra a ser analisada, levando a um relaxamento da estrutura cristalina local. Este tipo de técnica envolve inicialmente a colocação criteriosa de extensômetros padrão no componente em que se deseja mensurar as tensões residuais. É então medida a deformação macroscópica provocada pela remoção, por ataque químico ou corte, da amostra tensionada.

Para os métodos não destrutivos, podem-se medir tensões diretas, sem que haja a necessidade de fazer relaxamento ou qualquer técnica de ataque químico, remoção ou corte, tendo então valores muito mais precisos, quando comparados com outros métodos, os métodos não destrutivos podem passar uma maior segurança em relação aos valores apresentados.

Porém no meio industrial, os métodos mecânicos são bem mais utilizados devido a sua praticidade, facilidade em aquisição de equipamentos, portabilidade de equipamentos, maior disponibilidade de conhecimentos relacionados, custo e aplicação em casos práticos, no entanto, também se utiliza o método não destrutivo de difração de raio-x. (SCURACCHIO, 2012)

Pode-se então separar as técnicas conforme itens descritos abaixo.

- Técnicas baseadas em distorções

- Curvatura ou Teste de Almen
- Técnica do Furo Passante
- Técnica do Furo Incremental
- Fotoelasticidade

- Técnicas de Difração

- Raios-X
- Synchrotron
- Nêutrons

- Elétrons
- Outras Técnicas
 - Magnéticas
 - Ultra-son
 - Termo-elástico

3.4. Raios-X

Segundo JOHNS, 1983, para este tipo de abordagem, também se pode verificar que o espectro de Bremsstrahlung é composto em maior parte por fótons de baixa energia e este número é reduzido à medida que a energia aumenta, até a energia máxima, que corresponde à energia dos elétrons acelerados. Este espectro apresenta, dependendo da energia inicial dos elétrons, picos superpostos de radiação característica.

- Técnicas de Difração de Raios-X

Pode-se medir através desta técnica a alteração interplanar “d” geradas pela deformação elástica associada às tensões residuais. Quando se conhece o comprimento de onda incidente na amostra λ , e o ângulo de difração 2θ , pode-se aplicar a lei de Bragg.

$$\lambda = 2d * \sin\theta$$

Equação 10

Para descobrir a variação na distância “d”, antes e depois do carregamento de tensões terem sido aplicados.

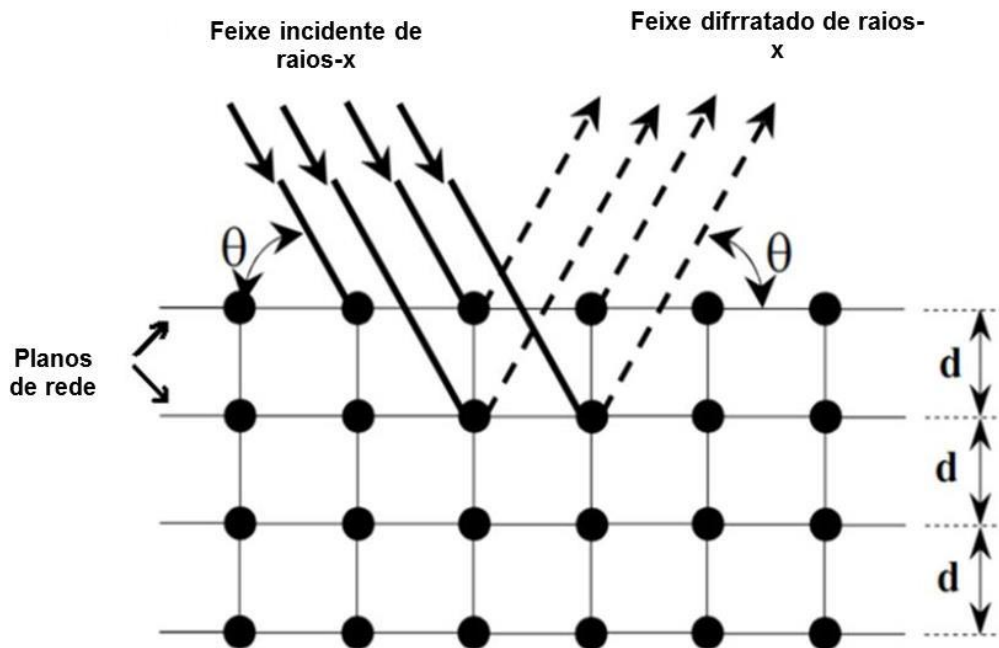


Figura 12 – Espalhamento descrito pela Lei de Bragg.

Segundo Scuracchio a medida de tensão, a rede cristalina pode ser considerada como um pequeno extensômetro, uma vez que as alterações no parâmetro de rede representam a deformação elástica induzida por um carregamento externo. Assim, considerando “d” o parâmetro de rede sem o carregamento, e “d₁” o parâmetro de rede após a deformação elástica na rede (ε) pode ser definida como:

$$\varepsilon = \frac{d_1 - d}{d} = \frac{\Delta d}{d}$$

Equação 11

Alguns métodos podem ser utilizados para o cálculo das tensões por difração de raios-x. Dentre eles um dos métodos é o método de varredura de 2Θ, onde se considera o comprimento de onda fixo e a difração do ângulo de 2Θ é medido. A equação que relaciona a deformação na rede (ε) à mudança de ângulo (ΔΘ) é determinada diferenciando a Equação de Bragg:

$$\Delta \lambda = 2 \sin \Theta \Delta d + 2d \cos \Theta \Delta \Theta$$

Equação 12

Sendo o comprimento da onda constante,

$$0 = 2\sin\theta \Delta d + 2d \cos\theta \Delta\theta$$

Equação 13

$$\sin\theta \Delta d = -d \cos\theta \Delta\theta$$

Equação 14

$$\Delta d = -d \cot\theta \Delta\theta$$

Equação 15

Substituindo a equação 15 na equação 11, teremos:

$$\varepsilon = -\cot\theta \Delta\theta$$

Equação 16

Sendo $\Delta\theta$ a variação angular do pico de difração em relação à situação sem deformação.

Além desse método outro muito importante e utilizado é o método $\sin^2\Psi$, onde as medições são realizadas para vários ângulos Ψ . A variação do ângulo Ψ é importante, pois como os grãos do material possuem diferentes orientações cristalinas, é necessária uma série de medições para que uma média seja calculada.

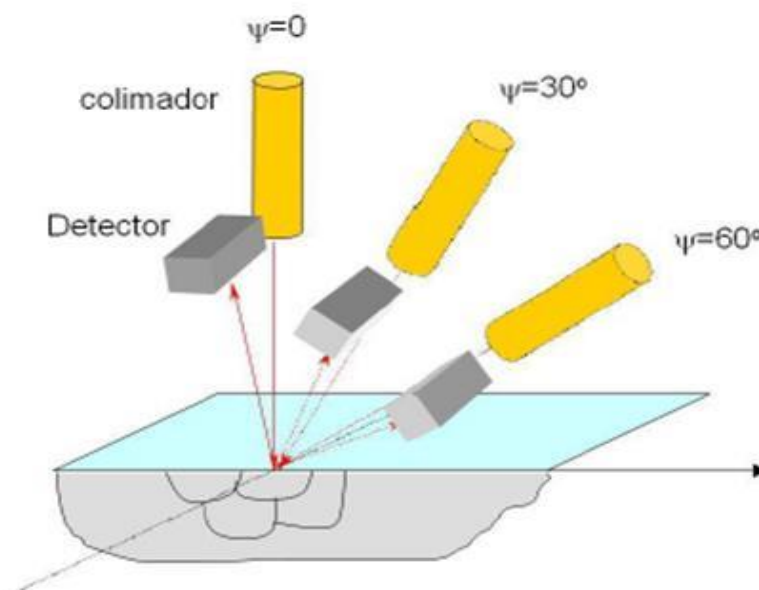


Figura 13 – Variação do ângulo Ψ para medição de diferentes orientações cristalinas. (SCURACCHIO, 2012)

O método $\sin^2\Psi$ baseia-se na equação da teoria da elasticidade para deformação $\varepsilon_{\phi,\psi}$ que se movimenta em direção arbitrária. Portanto, para estabelecer qualquer componente de tensão ao longo da profundidade é necessário medir os ângulos de difração correspondentes às reflexões dos planos cristalinos com normais caracterizadas por ângulos Ψ . Para toda e qualquer variação de ângulo Ψ faz-se com a inclinação da superfície da amostra em relação ao feixe de raios-x incidente.

Quando se utiliza o método de $\sin^2\Psi$, para medir tensão residual, por exemplo, em filmes finos, é necessário utilizar uma variação conhecida como ângulo de incidência rasante, em que o feixe de raios-x atinge a superfície da amostra em ângulos rasos, fazendo com que a penetração dos raios-x seja menos profunda e a maior parte do feixe incidente seja refletido na superfície.

3.5. Rugosidade

Segundo Camargo (2002) uma superfície ideal livre de erros de formas ou de textura secundárias como erros macrogeométricos ou de acabamento e marcas de fabricação como erros microgeométricos na realidade não existem, e serão sempre utilizadas como referência. Logo após processos de remoção de material, obtém-se uma superfície em que se pode medir e avaliar em relação a uma superfície ideal. Traçando um plano perpendicular à superfície efetiva, pode-se ter o perfil efetivo da peça confeccionada, sendo este perfil efetivo após ser mensurado e filtrado tirando os erros macrogeométricos, obtém-se o perfil de rugosidade. Segundo a norma DIN 4761 podemos considerar a rugosidade como um desvio de conformação de 3º ordem, que podem ser desvios cíclicos ou não, onde a relação entre a distância entre o pico e o vale é da ordem de 100:1 a 5:1; e/ou como desvios de 4º ordem, que são estrias ou escamas originadas a partir de fenômenos específicos durante o processo de formação do cavaco. Geralmente ocorre a sobreposição de um ou mais tipos de desvios na formação do perfil.

Uma superfície usinada pode ter sua rugosidade avaliada por vários parâmetros, onde podem ser considerados uma ou mais características da superfície, como o comprimento da rugosidade, o comprimento da ondulação, amplitude da ondulação amplitude dos picos e orientação da ondulação. Existem diversos parâmetros para se medir características da superfície, porém os mais

utilizados são os que medem a amplitude da rugosidade. De acordo com Camargo (2002) o parâmetro mais utilizado e aceito é o parâmetro Ra (Root Mean Square) por ser aplicável a maior parte dos processos existentes, o parâmetro Ra consegue filtrar grandes variações que podem alterar de maneira considerável o valor medido.

Segundo Çolac (2005), o parâmetro de rugosidade Ra é uma altura da área entre o perfil de rugosidade e uma linha média, ou também a integral dos valores absolutos de altura do perfil no comprimento da medição (l_m) (Equação 9).

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} f(x) dx \quad \text{Equação 9}$$

Embora seja o mais utilizado o parâmetro Ra tem um problema, é que vários perfis de rugosidade podem ter o mesmo valor de rugosidade Ra (Figura 14).

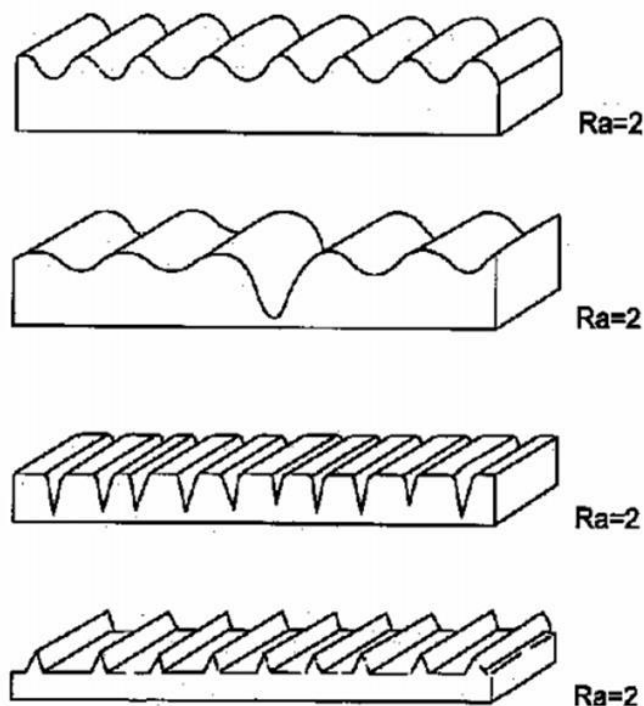


Figura 14 – Perfil de várias geometrias com mesmo valor de rugosidade Ra.

Outros parâmetros para medir a rugosidade também são utilizados e fornecem valores reais de altura entre os vales e os picos do perfil de rugosidade, como por exemplo, os parâmetros de $R_{\text{máx}}$, R_z e R_t . O parâmetro $R_{\text{máx}}$ é o valor da maior altura entre o pico e o vale dentro de cinco valores medidos dentro do cut-off, R_z é a média aritmética de 5 valores de maiores picos e maiores vales em um

comprimento amostral (l_e) e R_t é a rugosidade total ou a medida entre o maior e o menor ponto dentro do comprimento de medição (CAMARGO, 2002).

Para este trabalho foram utilizados os parâmetros de R_a e $R_{máx}$ por serem os mais utilizados no meio industrial.

4. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido dentro da Musashi do Brasil uma empresa multinacional japonesa de grande porte que se localiza na região metropolitana do Recife. E partiu da necessidade de desenvolver banco de dados para conhecimento interno a respeito do shot peening, tendo em vista a literatura escassa e limitada. Foi utilizado como base a norma SAE J442, que trata especificamente de shot peening e o conhecimento empírico já desenvolvido em outras unidades do grupo Musashi para determinar as condições de processo iniciais. Nessa etapa inicial buscou-se estabelecer uma tolerância de variação no qual se fosse possível desenvolver um processo em que se conhecessem as condições mínimas, intermediária e máxima atendendo as exigências estabelecidas na norma SAE J442.

Sendo esses parâmetros estabelecidos, foram estudadas as variáveis que mais influenciam no processo. Como a máquina utilizada para realização dos testes é uma máquina de grande porte e precisa ser abastecida com 2000Kg de granalhas ficaria inviável realizar testes com tipos de granalha diferentes, portanto todos os testes foram realizados com o mesmo tipo de granalha com controles estabelecidos na norma SAE J442. A referência para o ajuste de processo será a deflexão do Almen, devido à linearidade obtida em relação às características desejadas no processo de Shot Peening. Para determinar as condições ótimas de processo foram estudados e definidos os tempos para que o parâmetro de cobertura seja superior que 98%, os parâmetros de deflexão do Almen que serão de 0,3mmA, 0,4mmA e 0,5mmA e também por existir um fenômeno conhecido por over peening foram realizados testes com amostras jateadas duas vezes. Em seguida foi estudada a influência do processo de shot peening na rugosidade de acordo com a variação da deflexão do Almen, os perfis de microdureza de acordo com a variação de deflexão do Almen, perfis de tensões residuais de acordo com a variação de deflexão do Almen, e a correlação entre os perfis de microdureza e tensões residuais. Foi elaborado um fluxograma para ilustrar como os testes foram desenvolvidos e pode ser observado abaixo na figura 15.

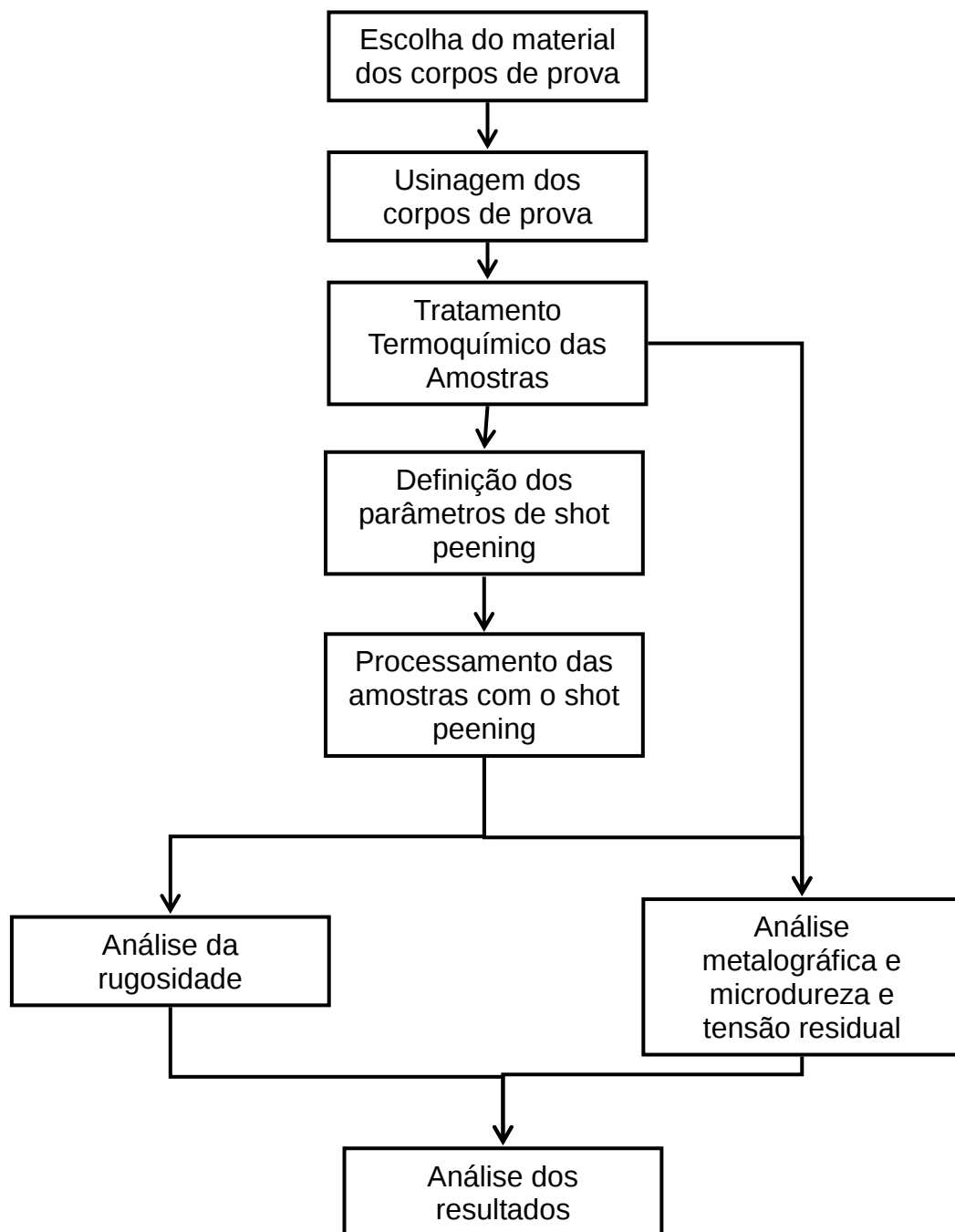


Figura 15 – Fluxograma para ilustrar as etapas desenvolvidas no projeto.

4.1. Material do Corpo de Prova

Para este trabalho foram utilizadas engrenagens confeccionadas em aço de nome comercial JIS SCM 420 HV2 equivalente ao aço SAE 4130, conforme composição química determinada em norma (tabela 3).

Tabela 3 - Composição química do aço JIS SCM 420 HV2 (SAE 4130).

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	Al (%)	Cu (%)
0,18 ~ 0,23	≤ 0,2	0,7 ~ 0,9	≤0,025	0,02 ~ 0,04	0,7 ~ 0,9	0,25 ~ 0,35	1,5 ~ 1,7	0,015 ~ 0,05	≤ 0,25

O aço foi obtido com uma pré-forma forjada com algumas medidas geométricas aproximadas ao da engrenagem final, submetido a um tratamento térmico de normalização com uma dureza aproximada de 255HB e microestrutura ferrítica-perlítica, conforme observado na figura 16.

**Figura 16** – Microestrutura do forjado conforme fornecido.

O forjado passa por várias etapas de usinagem que abrangem: torneamento, fresamento, rebarbação e shaving, para a fabricação do corpo de prova na forma de engrenagem (Figura 17), para em seguida ser submetido ao tratamento termoquímico de cementação, têmpera em óleo e revenimento. Após essas etapas as amostras passam pelo processo de shot peening.



Figura 17 – Corpo de prova após o processo final de acabamento com operação de shot peening. (AUTOR)

4.2. Tratamento Termoquímico das Amostras

O processo termoquímico foi cementação a gás, utilizando atmosfera endotérmica obtida a partir de gás natural em um forno contínuo composto por três câmaras de tratamento, conforme descrito nas seguintes etapas (Figura 18):

Etapa 1 – A carga entra no forno a temperatura ambiente;

Etapa 2 – Preparação da superfície com pré-aquecimento a 890°C e atmosfera com um percentual de Carbono na atmosfera de 0,55% em massa por um tempo de 50 minutos;

Etapa 3 – Cementação a 920°C (temperatura de austenitização), com um percentual de Carbono de 1,2% e um tempo de 240 minutos;

Etapa 4 – Redução da temperatura na terceira câmara de escalonamento, para 850°C por um tempo de 45 minutos, para evitar distorções dimensionais na etapa seguinte de têmpera;

Etapa 5 – Têmpera em óleo com a temperatura de 120°C sob agitação constante;

Etapa 6 – Revenimento a 180°C durante 120 minutos.

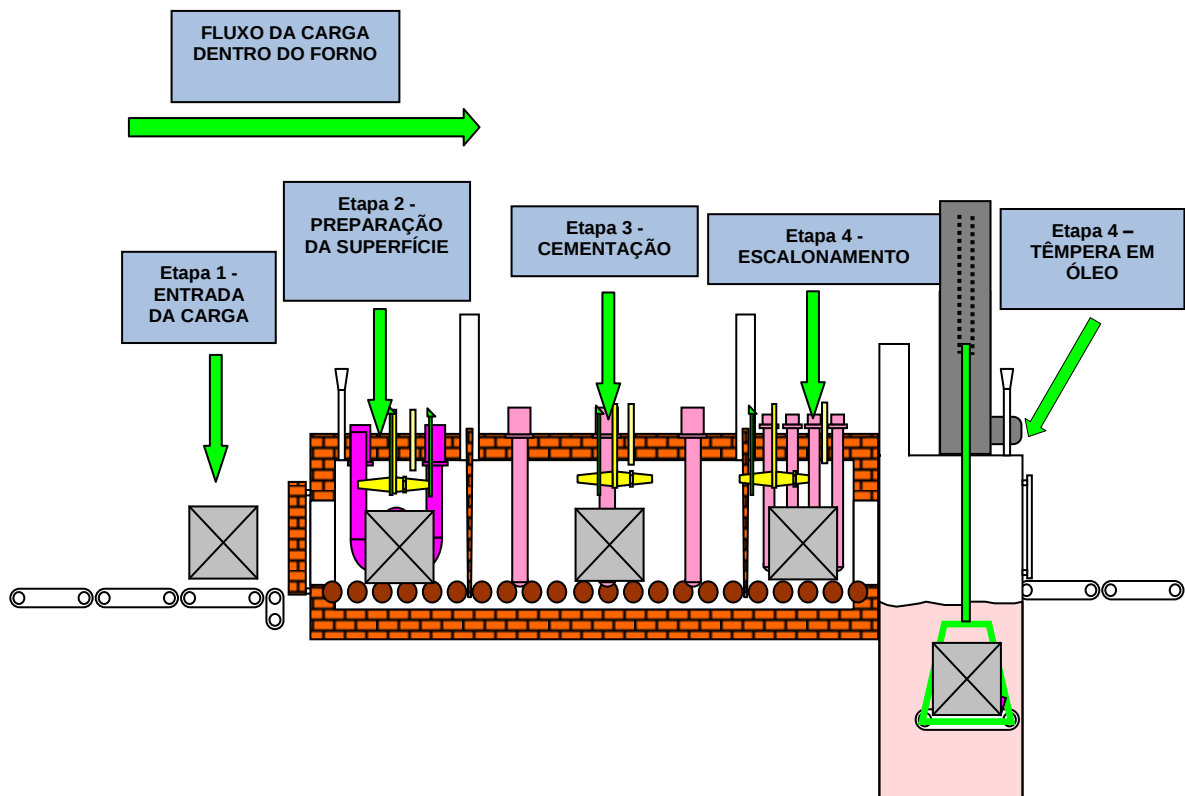


Figura 18 – Etapas do processo de cementação e têmpera das amostras.

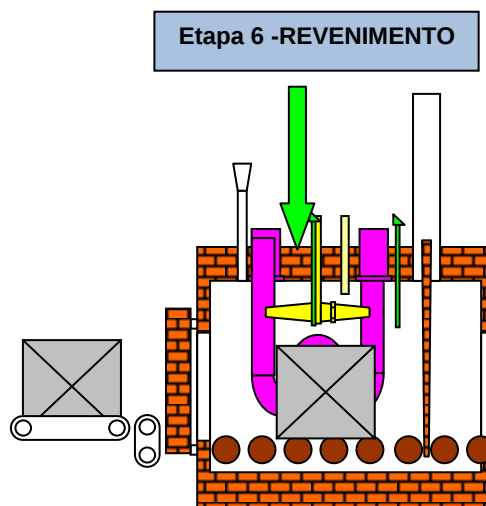


Figura 19 – Etapa 6 revenimento em forno batch.

4.3. Processo de Shot Peening

O processo de Shot Peening utilizado nesse trabalho foi o “*Air Blast*” que pode ser descrito como a aceleração das esferas por um jato de ar em um bico específico, no qual é possível controlar a velocidade e ângulo de impacto das esferas sob o corpo de prova. (Figura 20)

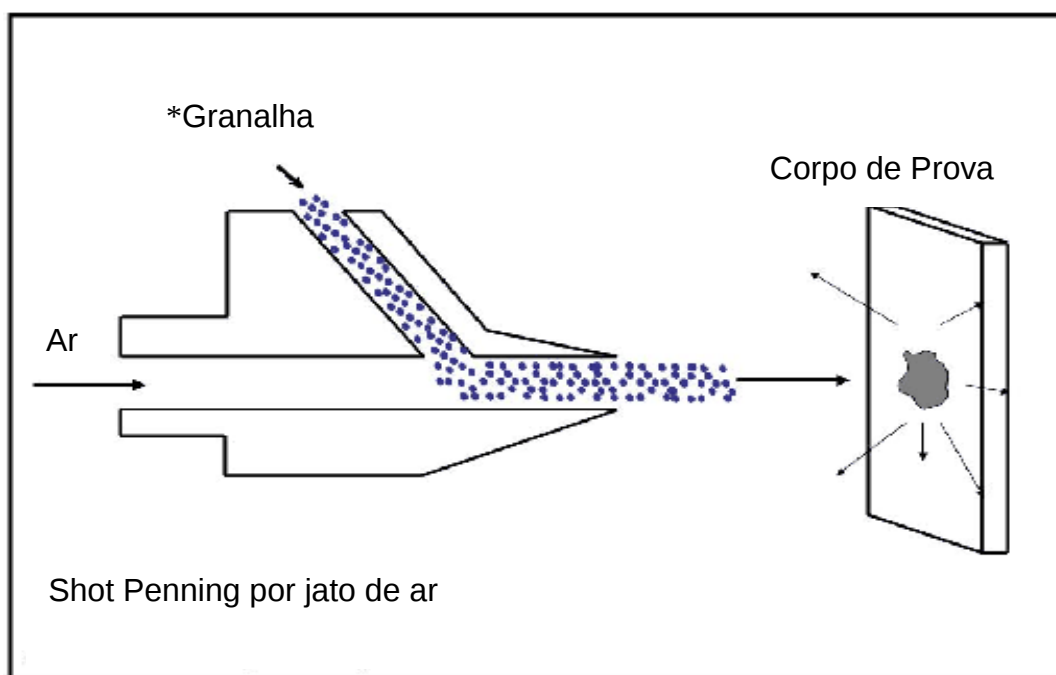


Figura 20 – Esquema do bico de máquinas do tipo Air Blast Shot Peening.

Neste trabalho a granalha selecionada para o processo de shot peening foi de arame cortado e com arestas arredondadas para obtenção do formato esférico com tamanho médio 0,6mm e dureza na faixa de 550HV a 650 HV, tipo PH, conforme especificação do fabricante na tabela 4. A granalha utilizada foi caracterizada por microscopia ótica e dureza Vickers para verificar se estava dentro do especificado pelo fabricante. A norma SAE J442 diz que para medição do tamanho da granalha deve-se alinhar 10 esferas e então realizar a medição do comprimento total, a soma das dez esferas deve ter um comprimento entre 5,81mm e 6,13mm (Figura 22).

Tabela 4 – Tabela de especificação de granalha. (TOYO SEIKO)

Tamanho médio (mm)	Faixa de Dureza (HV)					
	100-200	200-300	450-550	550-650	650-750	780-850
0.25				●	●	●
0.3			●	●	●	●
0.4			●	●	●	●
0.6	●	●	●	●	●	●
0.7	●	●	●	●	●	●
0.8	●	●	●	●	●	●
1.0	●	●	●	●	●	●
1.2	●	●	●	●		
1.4	●	●	●	●		
TIPO	SL	SH	PM	PH	OS	PU

A máquina utilizada nessa etapa foi uma de origem japonesa fabricada pela SINTO de modelo ABT3 (figura 21), que tem dois bicos de jateamento, com controle de fluxo de vazão, distância do bico para amostra, pressão de ar, tempo de jateamento, posição, rotação e ângulo de impacto da amostra em relação bico, variáveis essas importantes no processo de shot peening.

**Figura 21** – Máquina Sinto ABT3 onde foram processadas as peças. (AUTOR)

Para verificar o grau de cobertura e determinar o tempo necessário para que o mesmo seja de 98%, foi realizado um procedimento empírico onde as lâminas foram pintadas com caneta marcadora de cor vermelha comum (Figura 22). As amostras são submetidas a diferentes ciclos de processo de shot peening (2s, 4s, 6s e 8s) e através de análise de imagem das amostras em cada ciclo o grau de cobertura é avaliado e desta forma determina-se o tempo do ciclo ideal para atingir o grau de cobertura desejado. As análises foram realizadas utilizando um software gratuito chamado de “*ImajeJ*”, para isso foi tirada uma fotografia em um microscópio ótico para melhor ampliação da lâmina, a primeira fotografia foi da lâmina totalmente pintada e com o recurso do software foi construído um histograma das cores que constituíam a fotografia, considerando a tonalidade de vermelho como sendo 100%, seguindo com as amostras seguintes a variação do histograma mostra o percentual de vermelho que foi removido a cada lâmina submetida ao processo de shot peening.

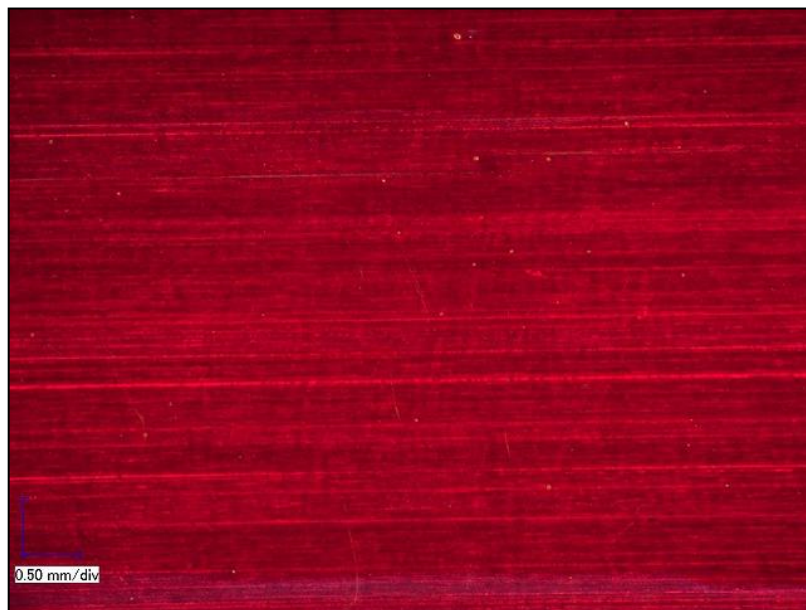


Figura 22 – Lâmina pintada de vermelho sem processamento por shot peening.

Para o ajuste dos parâmetros do processo (pressão, cobertura, vazão) utilizou-se a técnica de medição de altura do arco da lâmina de Almen, para tal foram utilizados um equipamento fabricado pela Eletronics Inc. modelo #2Almen Gage que tem resolução micrométrica de $0,001\mu\text{m}$ e lâminas de aço do tipo A com dimensões de 76,2X19X1,295mm (Figura 23).

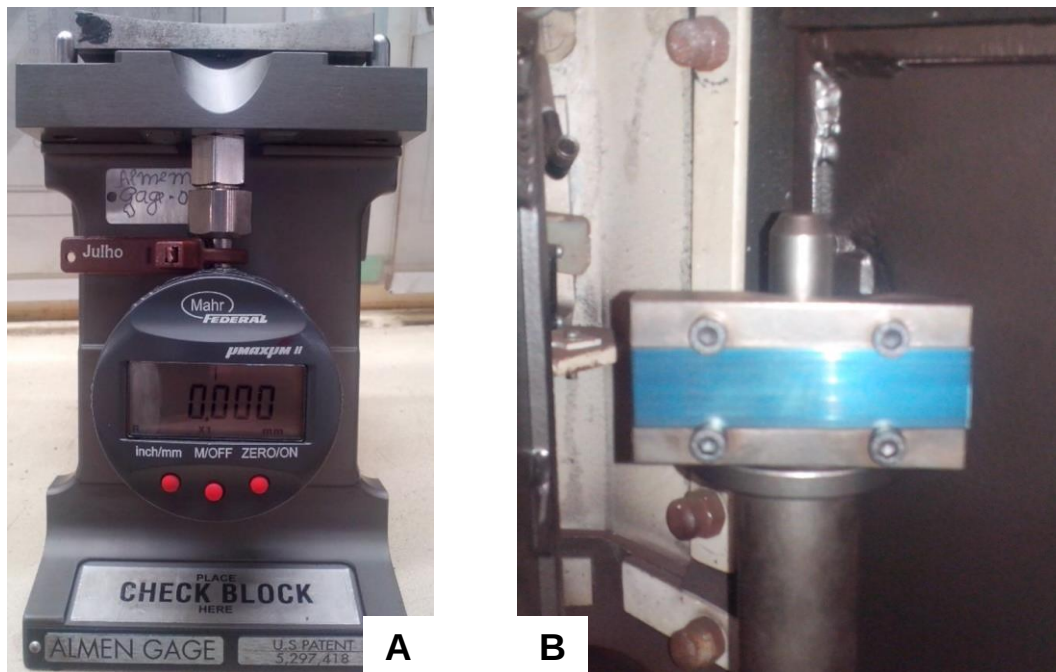


Figura 23 – (A) Almen Gage #2 Eletronics Inc. (B) Disp. de fixação lâmina.

4.3.1. Definição dos parâmetros de shot peening

Tipo e vazão de Granalha

A granalha escolhida para o processo de shot peening foi do tipo PH06, sendo a mesma caracterizada por microscopia ótica conforme norma SAE J442. A figura 24 apresenta o aspecto morfológico e dimensional das granalhas utilizadas, sendo o resultado da medição de 10 granalhas alinhadas foi de 6mm, tendo como tamanho médio de 0,6mm, dentro do especificado para esse tipo de granalha que é de 5,83 ~ 6,13mm.

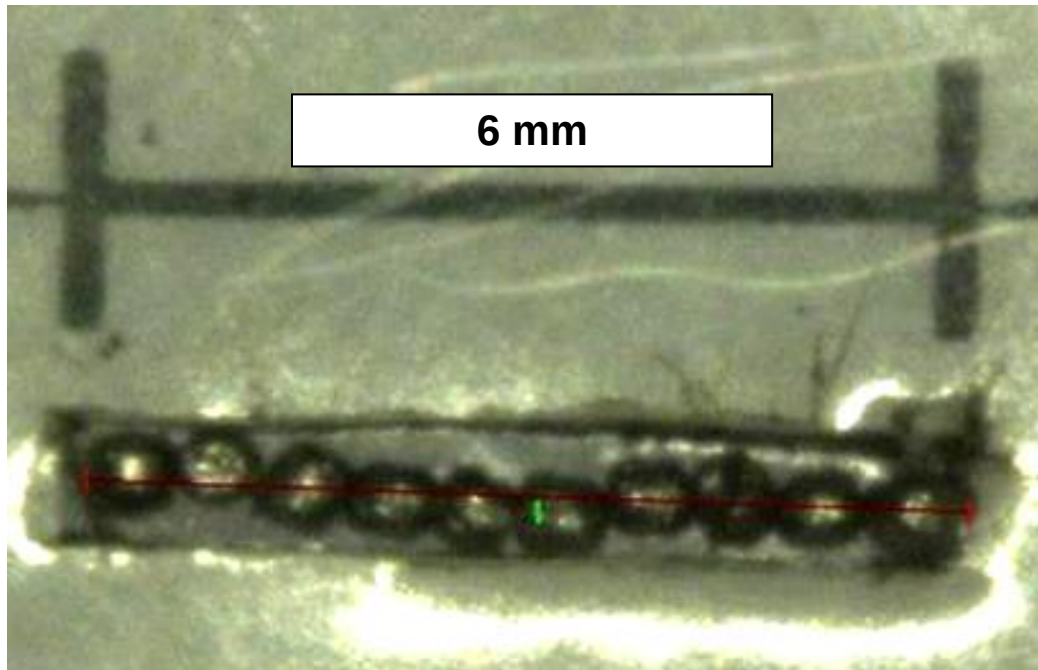


Figura 24 – Medição do comprimento de 10 esferas de granalhas alinhadas. (AUTOR)

A vazão de granalha escolhida para os testes de shot peening foi de 9kg/min, valor típico utilizado pela empresa em aplicações similares. Para calibração e ajuste da máquina, adotou-se a seguinte sequência de procedimento: considerando o valor do recipiente (saco), coleta-se em um determinado período de tempo (30 segundos) e após pesagem da massa recolhida calcula-se a vazão. O valor aceitável de calibração da máquina é de 4,275 ~ 4,725Kg em 30 segundos (Figura 25).

O teste foi repetido por três vezes e os resultados foram 4,320Kg, 4,323Kg e 4,319Kg, respectivamente. Portanto pode ser considerado dentro do especificado com resultados estáveis e com variação média de apenas 0,004Kg, variação essa que pode ser considerado desprezível, visto que, a variação da própria balança tem especificações de $\pm 0,01\text{Kg}$.

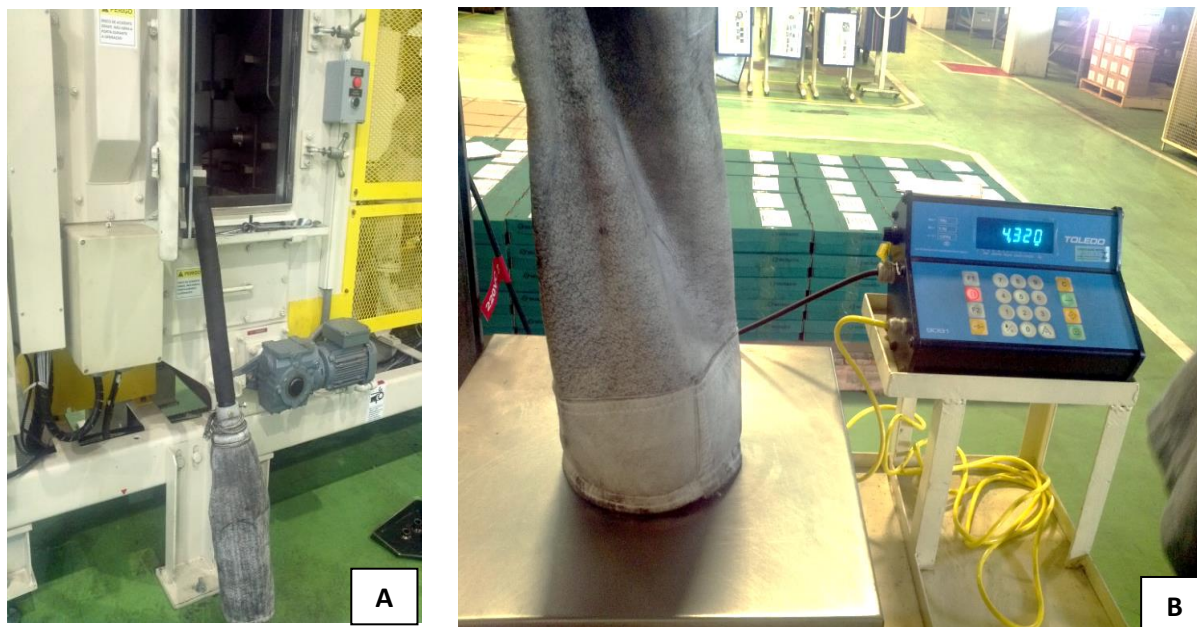


Figura 25 – Detalhes da metodologia de calibração da vazão. (A) Saco de teste amarrado na saída do bico de jateamento. (B) Pesagem do saco após 30 segundos de jateamento.

(A) Grau de Cobertura

Na definição do grau de cobertura, foram avaliados diferentes tempos de jateamento. Os resultados são apresentados nas figuras de 26 a 28. Observa-se que no tempo de 2 segundos conseguiu-se apenas 94% de cobertura, valor insuficiente de acordo com a norma SAE J442 (Figura 26). Na condição de 4 segundos, o resultado da cobertura foi de 97% (Figura 27) ainda insuficiente e para a condição de 6 segundos o valor de cobertura foi de 99% (Figura 28) sendo este valor aceitável, portanto não foram realizados testes com tempos acima deste valor. Como critério para o grau de cobertura adota-se o dobro do tempo encontrado para cobertura de no mínimo de 98%, sendo definido dessa forma o tempo de 12 segundos para o jateamento das amostras deste trabalho.

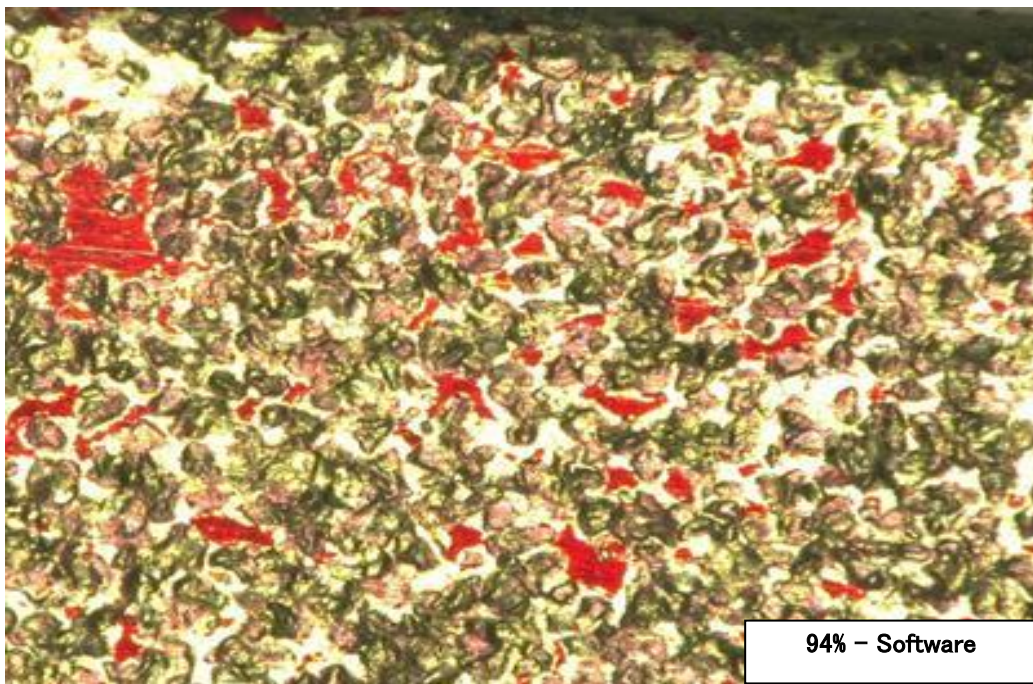


Figura 26 – Lâmina após 2 segundos de shot peening com 94% de cobertura.

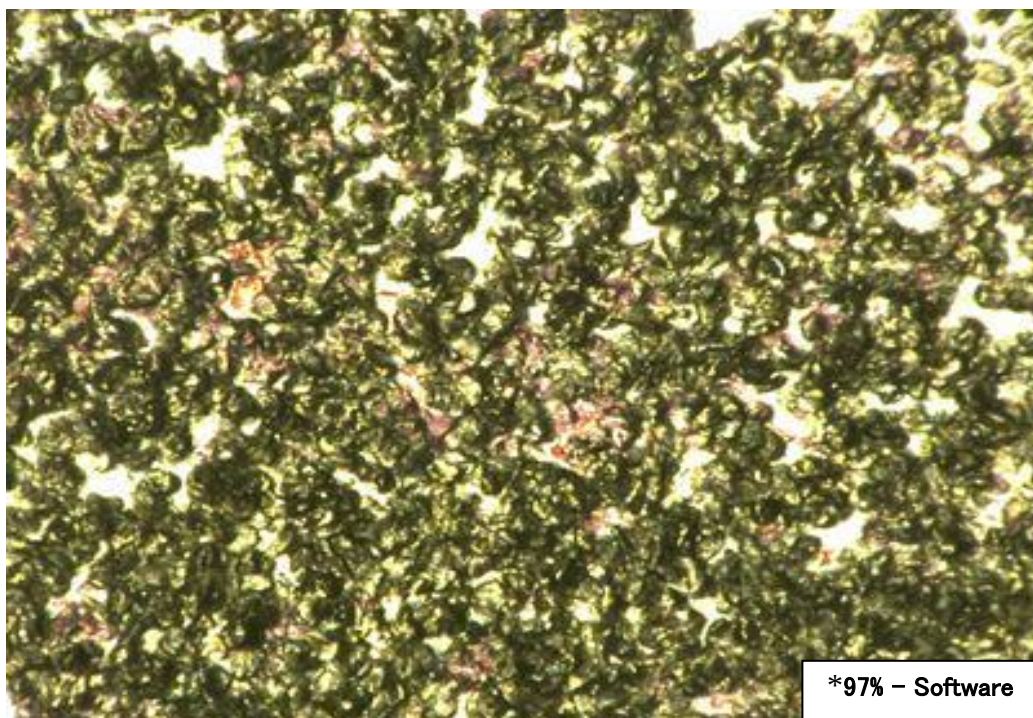


Figura 27 – Lâmina após 4 segundos de shot peening com 97% de cobertura.

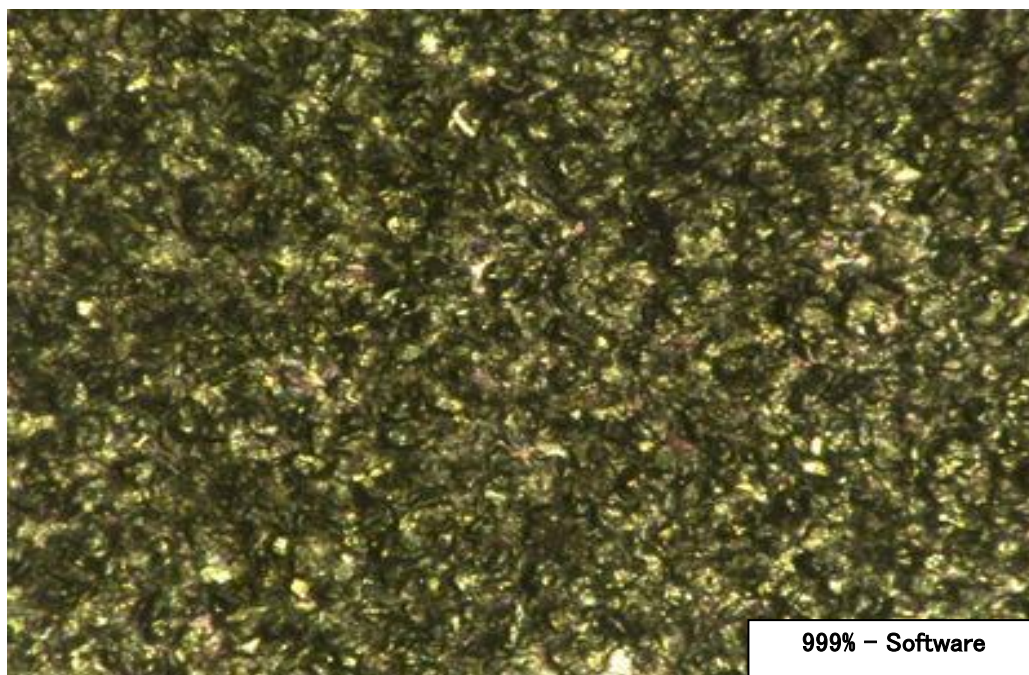


Figura 28 – Lâmina após 6 segundos de shot peening com 99% de cobertura.

De acordo com a norma J442 como seria praticamente impossível ou teria que desprender muito tempo de shot peening para conseguir coberturas de 100%, então se considera que uma cobertura de 98% é o satisfatório, desde que o tempo de jateamento seja dobrado, ou seja, para as amostras realizadas o tempo para conseguir 98% de cobertura foi de 6s, portanto será utilizado um tempo de 12s como padrão para o shot peening das amostras a serem testadas.

Foram estabelecidas 4 condições de testes, as condições foram estabelecidas combinando dois fatores a deflexão do almen e a cobertura, foi definido uma condição mínima do equipamento desde que garantisse que a cobertura fosse sempre no mínimo de 98%. Para que isso fosse possível à distância entre o bico e o diâmetro primitivo da engrenagem foi fixado em 200mm e o sentido de rotação da engrenagem anti-horário (Figura 29). Desta forma o ângulo de impacto foi de 87°, o único parâmetro da máquina que foi variado foi à pressão de ar, conforme descrito na tabela 5.

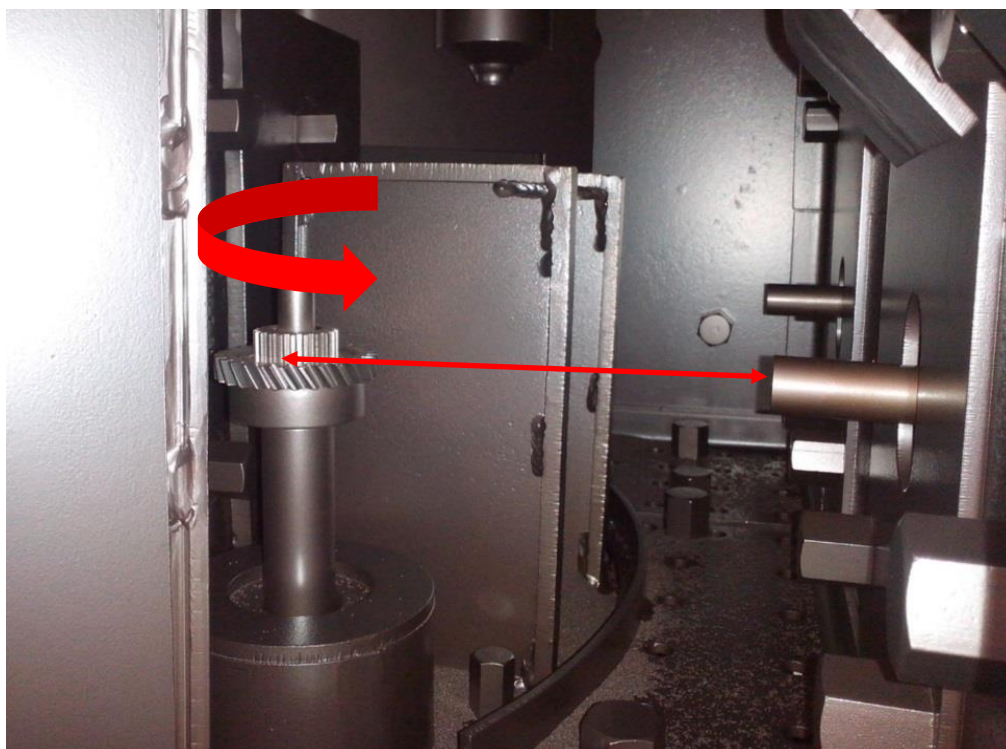


Figura 29 – Sentido da rotação e distância entre o bico de jateamento e o corpo de prova.

Tabela 5 – Parâmetros de testes.

CONDIÇÃO DE TRATAMENTO	ALTURA DO ALMEN (mmA)	PRESSÃO (MPa)	ROTAÇÃO (rpm)	VAZÃO (Kg/min)	TEMPO (s)
1	0,3	0,15	40	9	12
2	0,4	0,22	40	9	12
3	0,4	0,22	40	9	24
4	0,5	0,3	40	9	12

4.4. Seleção das Amostras Cementadas para o Processo de Shot Peening

Foi confeccionado um total de 30 corpos de prova em formato de engrenagens e tratados termoquimicamente em uma única carga, para garantir a mesma condição de cementação. Essas amostras foram caracterizadas através de ensaios de dureza e microdureza, superficial e núcleo. Esta etapa foi necessária para selecionar as

peças com características semelhantes garantindo desta forma que todas as amostras submetidas ao processo de shot peening tivessem a mesma condição inicial e que as variações de dureza dessas amostras após o processo de shot peening fossem decorrentes apenas dos parâmetros deste processo. A seguir serão apresentadas as metodologias utilizadas nesta etapa (Corte, preparação metalográfica, dureza/microdureza e tensão residual) e nas amostras selecionadas submetidas ao processo de shot peening. As análises da microestrutura e tensão residual das amostras foram realizadas para comparação com as amostras submetidas ao processo de shot peening.

4.5. Caracterização das Amostras

4.5.1. Corte e preparação metalográfica

Todas as amostras foram submetidas a um corte onde foram removidos quatro dentes para preparação do corpo de prova das análises (Figura 30).



Figura 30 – Primeiro corte para preparação da amostra para caracterização de microestrutura e microdureza antes do processo de shot peening.

Cada amostra foi cortada transversalmente em relação ao dentado da engrenagem, foi embutida em resina de baquelite, em uma prensa metalográfica da marca Struers modelo CitoPress – 1 (Figura 31), submetidas a um processo de lixamento, passando por uma sequência de lixas de granulometria 220, 320, 400 e 600 mesh, com polimento final com pasta diamantada com granulometria de 1 μ m por um tempo de 9 minutos em uma politriz automática (Figura 32).

Para a análise metalográfica as amostras polidas foram atacadas com reagente Nital 2,5% por 15s.



Figura 31 - Prensa para embutimento da marca struers modelo CitoPress-1.



Figura 32 – Politriz automática da marca Struers modelo Tegraforce 6.

4.5.2. Medição de dureza e microdureza

Para medição de dureza de núcleo foi utilizado uma ponteira prismática para medições em HRC e carga de 150Kg, aplicada sempre na superfície um pouco abaixo da raiz do dente da engrenagem em dois pontos distintos (Figura 33). Para garantir que a dureza nas amostras estava uniforme criou-se como critério que a diferença de dureza entre as duas impressões não poderia ultrapassar 1 HRC, sendo sempre o menor valor entre as duas medições o estabelecido.

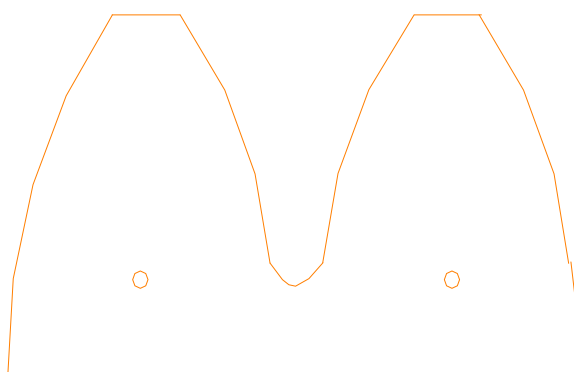


Figura 33 – *Desenho esquemático das medições de dureza de núcleo.*

Para o ensaio de microdureza foi utilizado um microdurometro com ponteira prismática de diamante e com carga de 0,3Kg conforme procedimento descrito na norma ASTM - E 384. Para cada amostra foi gerado um perfil de microdureza construído a partir de dez impressões, partindo de 0,01mm de distância da superfície até 1mm, as impressões foram realizadas em forma de “zig-zag” para evitar que a indentação de uma impressão causasse interferência em outra (Figura 34).

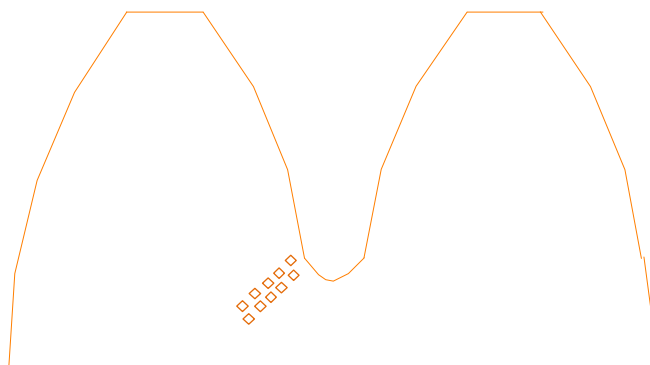


Figura 34 – *Desenho esquemático de impressões para medição de perfil de microdureza.*

O equipamento utilizado para a medição da dureza de núcleo foi um durometro da marca EmcoTest modelo M4R 025 63 (Figura 35a) e para as análises de microdureza um microdurometro automático da marca Shimadzu modelo HMV2 (Figura 35b).

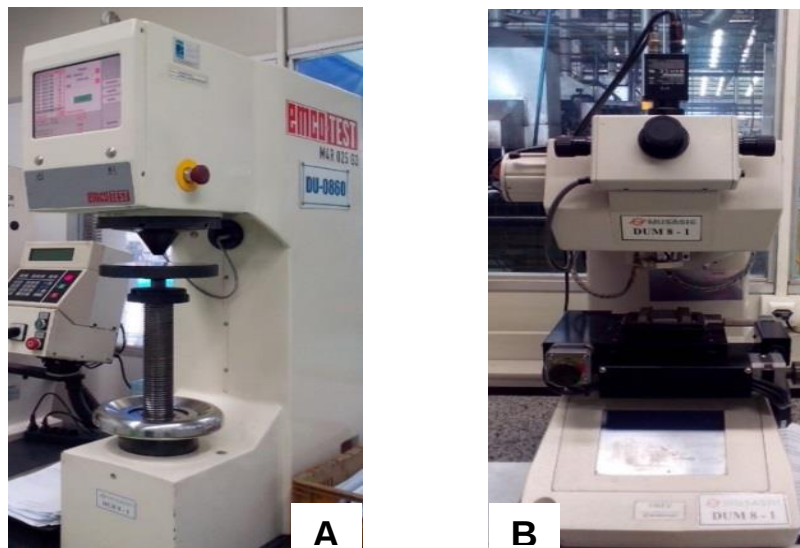


Figura 35 - (A) durômetro; (B) Microdurômetro utilizados nas medições de dureza.

Este procedimento foi realizado para 30 amostras apenas cementadas e em 15 amostras selecionadas cementadas e submetidas ao processo de shot peening, totalizando 45 amostras.

4.5.3. Análise do Perfil de Tensão Residual

Para análise do perfil de tensão residual cada amostra foi cortada (Figura 36), sendo as medidas de perfil realizadas no ponto 11 (conforme figura 37), este ponto foi o escolhido por ser a região da engrenagem que mais sofre tensões quando em funcionamento, maior parte do esforço para o movimento da engrenagem é suportado por essa região, consequentemente essa região é o ponto que mais sofre a influência das tensões trativas, sendo um dos principais objetivos do shot peening a indução de tensões compressivas nessa região, aumentando assim a resistência a fadiga da engrenagem (Figura 37). A determinação do perfil de tensão residual adotou-se uma técnica de remoção ataque químico com ácido nítrico na forma de polimento eletrolítico que por meio da corrosão gera a profundidade necessária sem que haja geração de tensões paralelas no corpo de prova não comprometendo as

medições reais. Foram medidos 5 pontos desde a superfície até uma distância de 0,05mm.



Figura 36 - Retirada do segundo corpo de prova para tensão após shot peening.

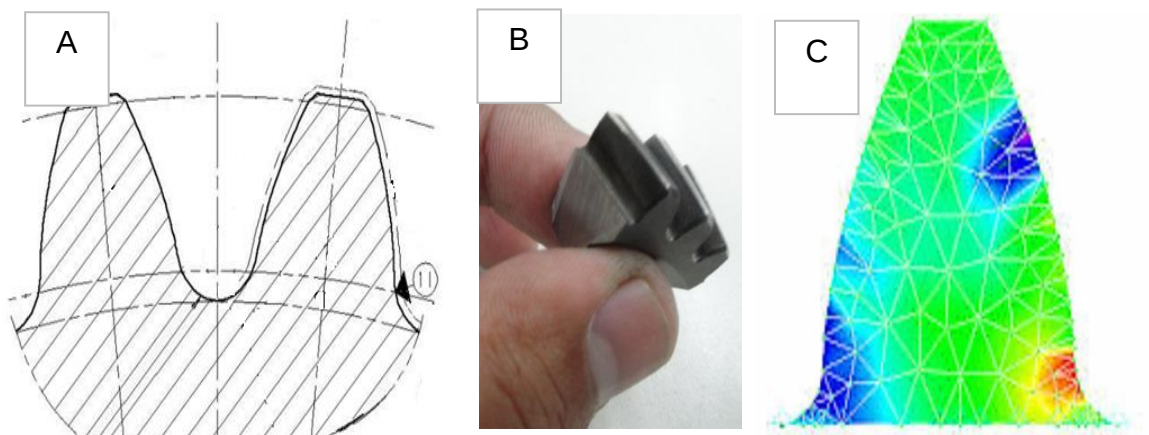


Figura 37 – (A) Detalhe do ponto de medição da tensão residual, (B) Detalhe da amostra para difração de Raio-X e (C) detalhe do campo concentrador de tensões.

A medição da profundidade de cada ataque foi utilizado um medidor de contorno da marca Mitutoyo modelo “Contracer CV-4000” (Figura 38).



Figura 38 – Medidor de contorno mitutoyo.

Essa metodologia foi adotada para medição do perfil médio de tensão residual de 5 amostras cementadas e de 15 amostras cementadas e submetidas ao processo de shot peening, ou seja, 20 amostras no total. Para cada ponto do perfil foi gasto um total de 5 horas. Considerando que em cada amostra foram realizados no mínimo 5 pontos em cada perfil totalizando 25 horas por amostra.

Nas análises de medição de perfil de tensão residual foi utilizado um equipamento da marca Rigaku, modelo RINT 2000, as medições foram realizadas utilizando-se um tubo de Anodo de Cromo, tensão de 40KV e corrente de 20mA. O método de medição foi o $\sin^2\Psi$, onde Ψ variou de -50° a $+50^\circ$, em intervalo de 10° . A varredura em ângulo 2θ foi de $136,5^\circ \sim 141,9^\circ$ em referência ao plano (111) com passo de $0,1^\circ$ e tempo fixo de 6 segundos, totalizando um tempo médio de 5 horas para cada ponto.



Figura 39 - Difratorômetro de Raio-X Rigaku RINT 200 pertencente ao IPEN/CNEN-SP.



Figura 40 – Dispositivo utilizado por Oliveira, 2011 para medição de tensão residual similar ao utilizado para medição das amostras neste trabalho.

4.6. Rugosidade

Para avaliação do efeito dos parâmetros do processo de shot peening na rugosidade, foram selecionados um conjunto de 27 amostras em 3 condições diferentes de shot peening (0,3mmA, 0,4mmA e 0,5mmA). Foram medidos os parâmetros de rugosidade (R_a , $R_{máx}$) em 3 dentes de cada amostra e nas duas faces de cada dente dentes, totalizando 6 medições para cada amostra. As medições foram realizadas no sentido axial e radial (Figura 41).

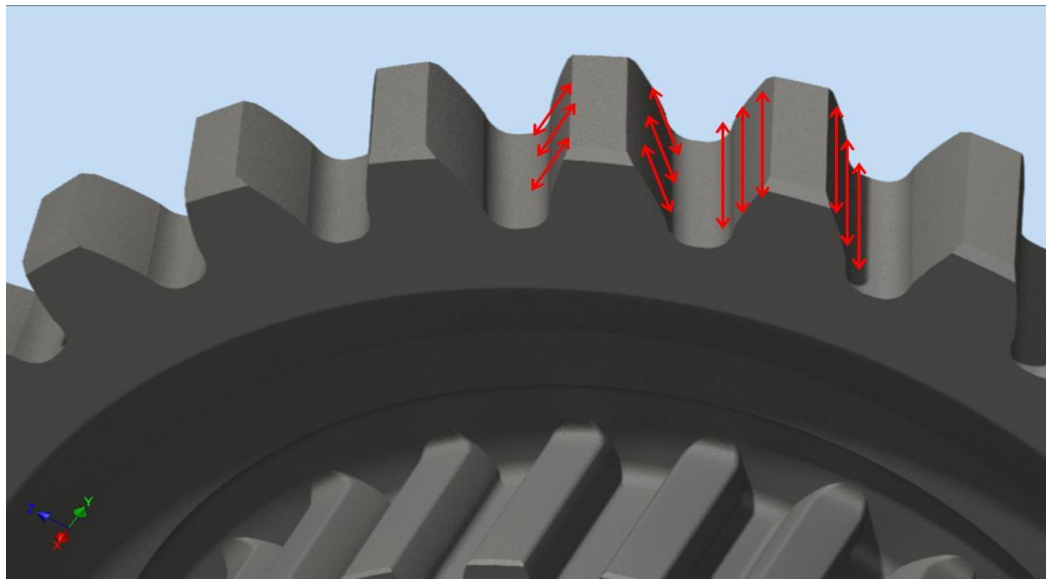


Figura 41 – Sentido das medições axial e radial da rugosidade.

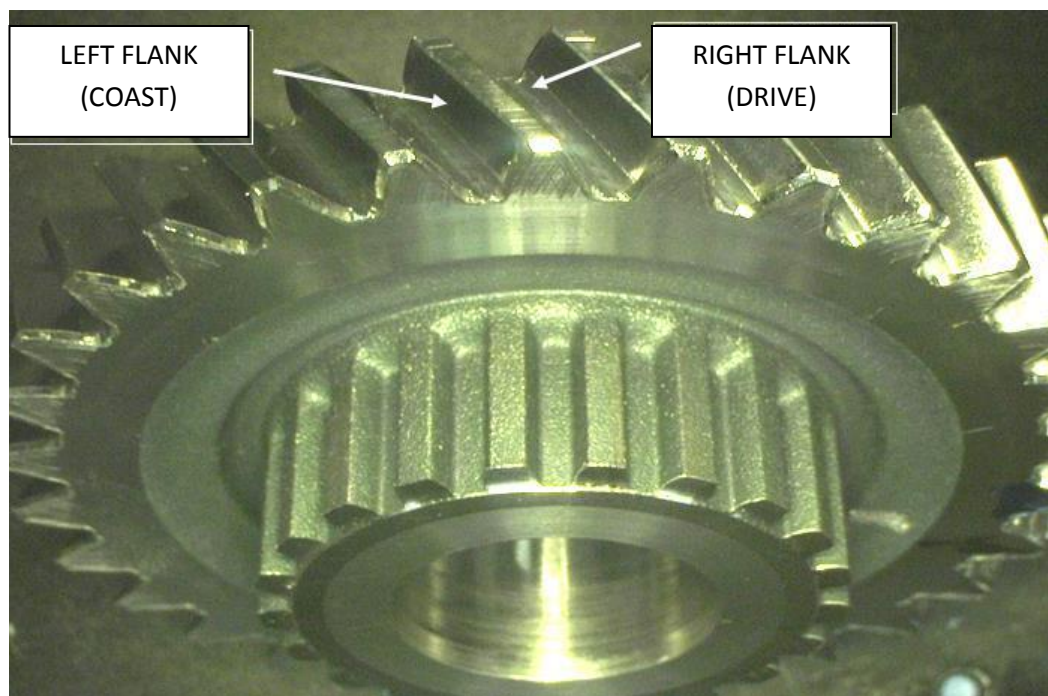


Figura 42 – Engrenagem com demonstração do lado funcional (Right Flank – Drive).

O equipamento utilizado foi um rugosímetro fabricado pela Mitutoyo de modelo SJ-4500-380 com ponta apalpadora de diamante e raio de $5\mu\text{m}$ (Figura 43).



Figura 43 – Medidor de rugosidade Mitutoyo.

Os parâmetros utilizados podem ser observados na tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de medição da rugosidade.

PARÂMETROS	AXIAL	RADIAL
Comprimento de medição - l_m	4mm	0,25mm
Comprimento de corte - l_c (cut-off)	0,8mm	0,05mm
Filtros	- Filtro gaussiano de 0,08 mm (ondulação) - filtro polinomial de 2º grau (erro de forma)	- Filtro gaussiano de 0,08 mm (ondulação) - filtro polinomial de 2º grau (erro de forma)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização do Material de Base

As análises de composição química do material base como recebido são apresentados na tabela 7. As pequenas divergências entre as quatro amostras analisadas estão dentro da especificação e podem ser explicadas pelo fato dos forjados não serem do mesmo lote de fundição, podendo então haver uma pequena variação na composição química. Com relação da variação da composição química das amostras e a especificação podem ser explicadas pela sensibilidade do equipamento. Considerando que as amostras serão beneficiadas termoquimicamente com o processo de cementação e em seguida serão selecionadas em função da dureza superficial, consideramos que não haverá prejuízos aos resultados.

Tabela 7 – Composição química das amostras por espectrometria computadorizada do laboratório SIMISA.

Elemento Químico	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	Al (%)	Cu (%)
Especificação	0,18	0,20	0,9	<0,02	<0,02	0,9	0,3	1,4	0,03	<0,02
Amostra 1	0,19	0,21	0,86	0,009	0,022	0,85	0,27	1,48	0,036	0,02
Amostra 2	0,13	0,19	0,83	0,01	0,02	0,84	0,27	1,47	0,032	0,002
Amostra 3	0,18	0,21	0,89	0,023	0,025	0,83	0,28	1,6	0,027	0,001
Amostra 4	0,16	0,2	0,85	0,011	0,02	0,85	0,27	1,47	0,033	0,001

As peças são fornecidas com uma pré-forma forjadas, e como o forjamento é um processo que produz grandes taxas de deformação, as amostras foram submetidas a um processo de normalização para alívio de tensões e uniformização

da estrutura cristalina. A dureza média das amostras após o processo de normalização foi de 198HB, estando dentro da faixa de especificação (197HB ~ 250HB). A figura 44 apresenta a microestrutura ferrítica / perlítica típica da amostra forjada e normalizada.



Figura 44 – Microestrutura ferrítica e perlítica da pré-forma forjado após o processo de normalização.

5.2. Caracterização das Amostras Cementadas

5.2.1. Seleção das amostras

Nesta etapa foram realizados ensaios de microdureza, dureza, metalografia em 30 amostras, como parâmetros de escolha das amostras para serem submetidas ao processo de shot peening e medição de tensão residual. Os critérios adotados para seleção das amostras foram, a variação de 2 HRC para dureza de núcleo e 5 HV para microdureza.

De acordo com este critério foram selecionadas 15 amostras para análise de tensão residual, sendo os resultados apresentados a seguir.

5.2.1.1. Dureza das amostras cementadas

Observa-se a uniformidade tanto na dureza de núcleo quanto na microdureza superficial dessas amostras, com valores médios de $36,9 \pm 0,8$ HRC e $701,4 \pm 1,2$ HV, respectivamente. Considerando a resolução do equipamento e a tolerância de variação para as cargas aplicadas, pode ser considerado como uma variação muito pequena. A tabela 8 apresenta as amostras selecionadas com seus respectivos valores.

Tabela 8 – Dureza de núcleo e superficial das amostras selecionadas.

PEÇA	DUREZA DE NÚCLEO (HRC)	DUREZA SUPERFICIAL (HV0,3)
1	36	701
2	36	703
3	38	700
4	37	701
5	36	700
6	37	702
7	37	703
8	37	703
9	38	701
10	37	700
11	36	702
12	37	703
13	36	700
14	38	701
15	38	701
MÉDIA	36,9	701,4
DESVIO PADRÃO	0,8	1,2

5.2.1.2. Perfil de microdureza das amostras cementadas

O perfil de microdureza das amostras selecionadas foi analisado de forma transversal até uma profundidade de 0,1mm. Profundidade suficiente para verificar a

relação entre a microdureza e a tensão residual. Observa-se nos resultados apresentados na figura 45 uma boa uniformidade do perfil de microdureza, e que embora tenha havido uma pequena variação na análise da composição química das amostras, com o processo de cementação seguido de tempera em óleo foram obtidos perfis de microdureza bastante semelhantes nas amostras selecionadas. O valor de desvio padrão máximo dos pontos do perfil foi de $\pm 5\text{HV}$ abaixo do valor especificado pela norma ASTM - E 384 ($\pm 10\text{HV}$). O valor de microdureza máximo obtido após a cementação foi de 712HV a uma profundidade de 0,01mm, permanecendo na faixa dos 700HV até 0,03mm, caindo para até 600HV em 0,08mm e uma redução mais acentuada até 500HV em 0,1mm, todavia ainda maiores que o valor de microdureza do núcleo que é de 354HV.

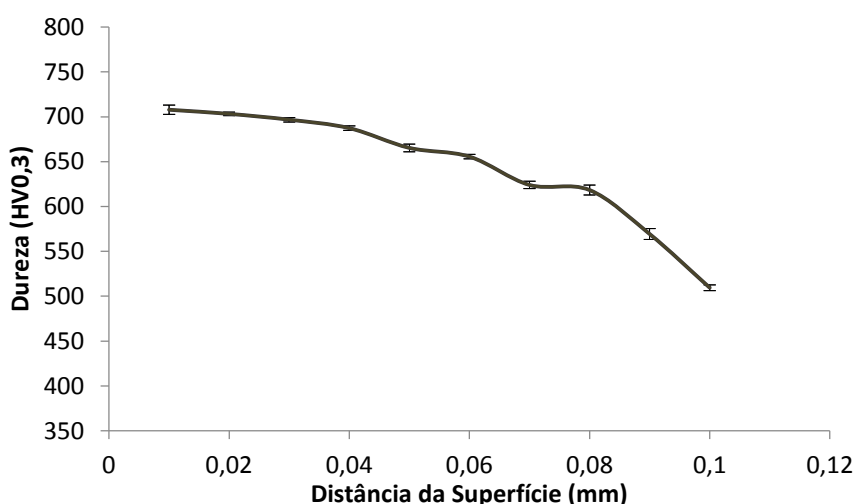


Figura 45 – Gráfico do perfil médio de microdureza das amostras cementadas.

5.2.1.3. Caracterização metalográfica das amostras cementadas

Na figura 46 pode-se verificar que a microestrutura predominantemente é martensita fina, características do tipo de aço utilizado após ser submetido ao processo de têmpera. Espera-se também a presença de austenita retida, devido à taxa de resfriamento ser relativamente lenta para melhor controle dimensional da peça, além do aumento da concentração de carbono na superfície da amostra

devido ao processo de cementação que dificulta, ainda mais, a transformação por inteiro da austenita em martensita.

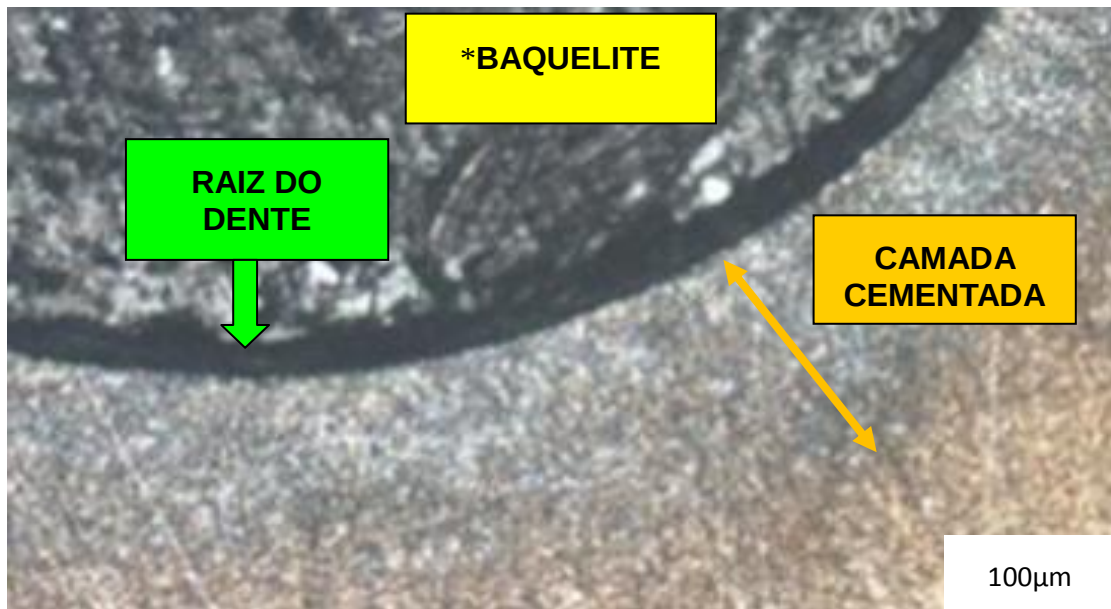


Figura 46 – Descrição das características do corpo de prova confeccionado para análise de microestrutura.

5.2.1.4. Perfil de tensão residual das amostras cementadas

O perfil de tensão residual das amostras cementadas é apresentada na figura 47. Os valores médios de tensão residual apresentam-se constantes dentro da camada cementada medida. O valor médio da tensão residual medido até 0,07mm foi de -356MPa, com desvio padrão de $\pm 10,21$ MPa, condição que pode ser considerada como ótima, devido à homogeneidade da camada cementada e tendo em vista que a resolução do difratômetro de raio-x utilizado é de ± 60 MPa. Já era esperado encontrar tensões compressivas no material em função da operação de cementação, mas esses valores podem variar de acordo com a composição química do material e do histórico de processos em que o material foi submetido antes do processo de cementação (Griffiths, 2001). Dentro da camada cementada a tensão residual medida manteve-se constante.

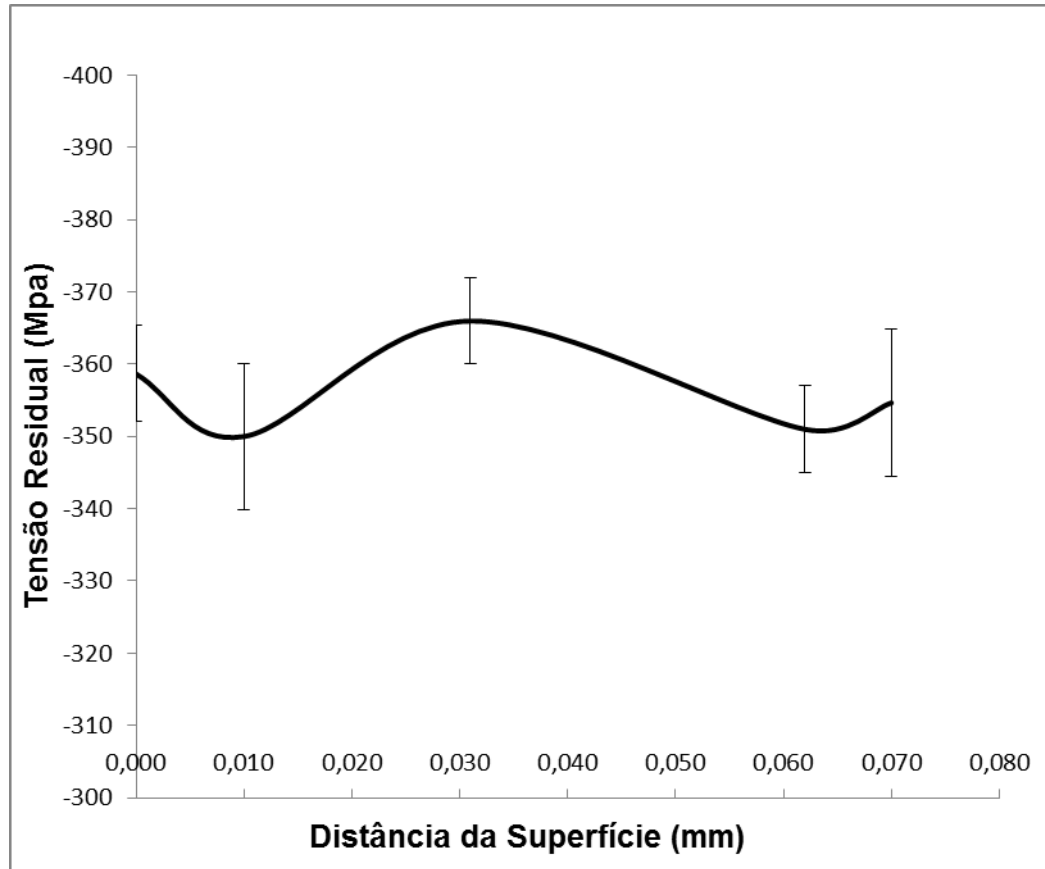


Figura 47 – Perfil médio da tensão residual das amostras cementadas.

5.3. Caracterização das Amostras com Shot Peening

5.3.1. Dureza das amostras com shot peening

O shot peening é considerado um tratamento superficial, todavia a dureza do núcleo se mantém inalterada, portanto a dureza de núcleo não medida nas amostras que foram submetidas ao processo de shot peening.

5.3.2. Perfis de microdureza das amostras com shot peening

Os gráficos das figuras 48 a 51 apresentam os resultados de perfil de microdureza para diferentes condições de shot peening (Tabela 5). Para a condição de shot peening 1 com almen 0,3mmA as amostras apresentaram um sensível aumento no perfil de microdureza, com relação às amostras apenas cementadas, com um aumento médio de 35HV. Este acréscimo de dureza já era esperado devido

ao encruamento gerado na superfície pelo impacto das granalhas. Próximo à superfície entre 0,01 ~ 0,02mm observa-se uma tendência de menores valores de microdureza quando comparados com profundidades maiores. Conforme vai se distanciando da superfície em direção ao núcleo essa microdureza tende a se elevar e se manter estatisticamente constante com valor médio de 750HV até uma distância de 0,06mm, sofrendo um decréscimo até valores de microdureza semelhantes aos das amostras apenas cementadas.

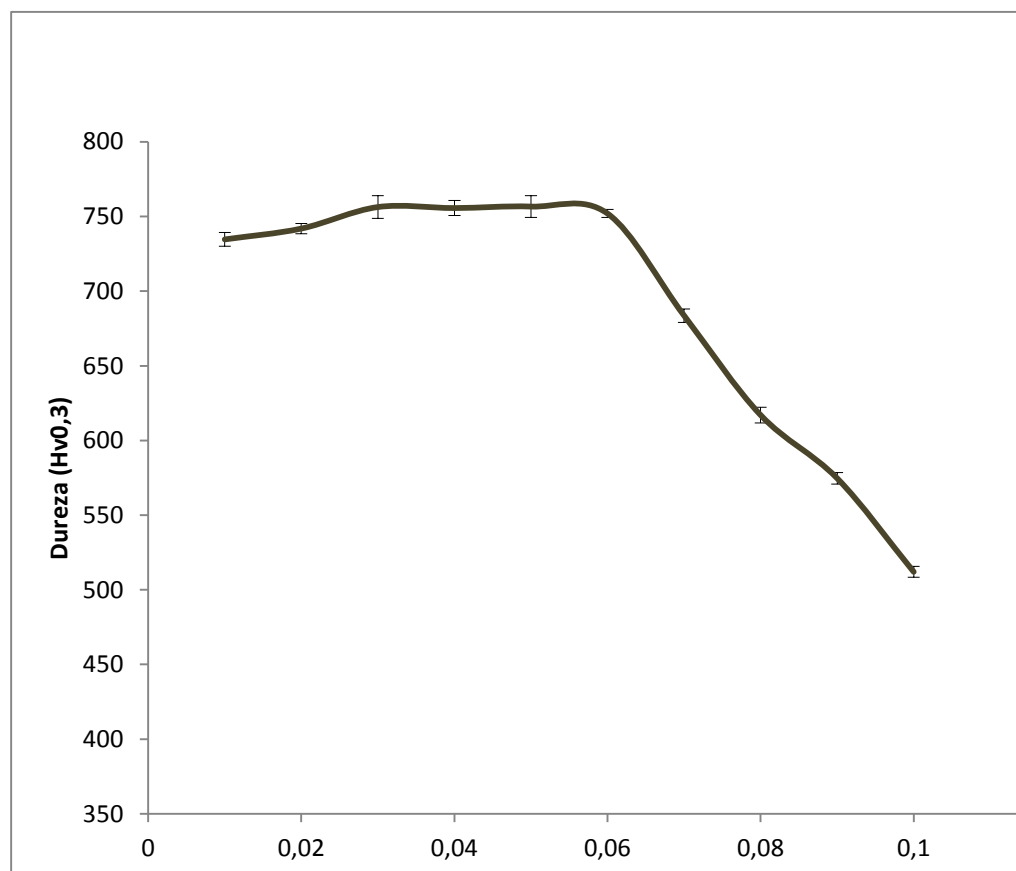


Figura 48 – Perfil médio de microdureza das amostras tratadas com shot peening na condição 1 (0,3mmA).

Para a condição 2 (0,4mmA / 12 segundos) o perfil de microdureza Apresenta-se semelhante ao da condição 1, todavia com valores médios de microdureza maiores. Próximo à superfície entre 0,01 ~ 0,02mm com valores médios de 750HV, e com valores médios de 790HV até uma distância de 0,06mm.

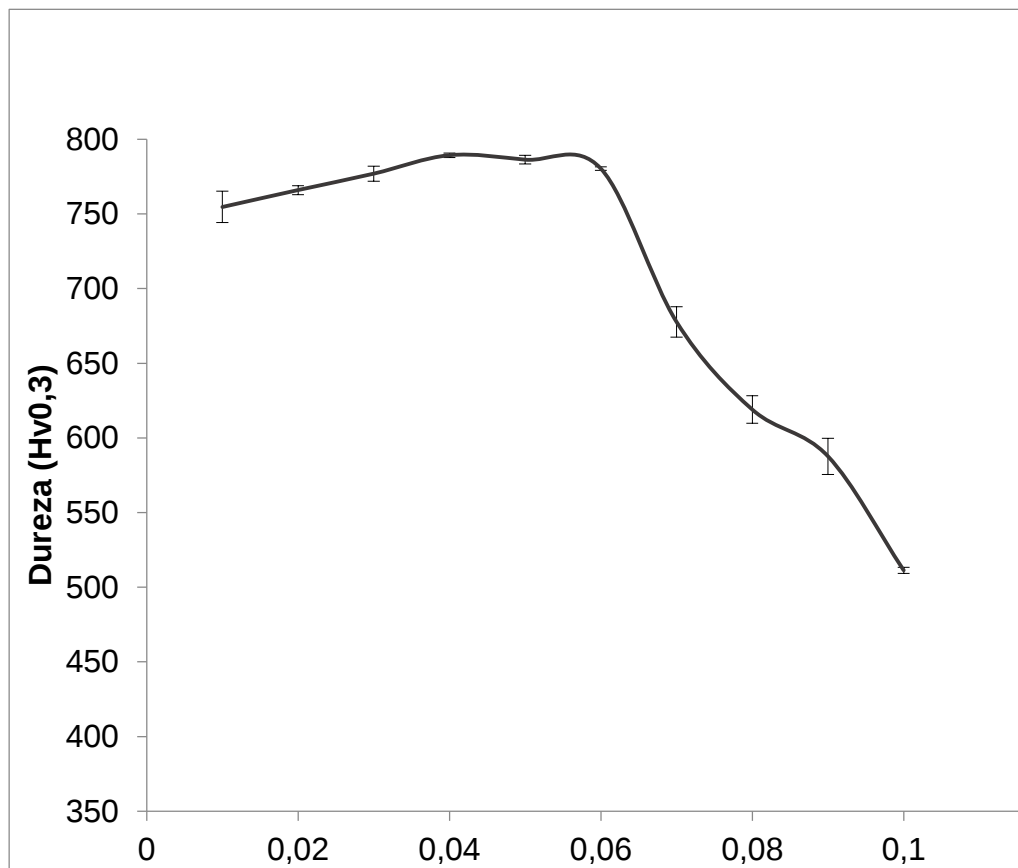


Figura 49 – Perfil médio de microdureza das amostras tratadas com shot peening na condição 2 (0,4mmA / 12 segundos).

A figura 50 apresenta o perfil de dureza para a condição 3 (0,4mmA / 24 segundos). Nesta condição o perfil de microdureza apresenta-se completamente diferente daquele observado na condição 1 (0,3mmA) e condição 2 (0,4mmA / 12 segundos). Observa-se que perfis com o mesmo valor de deflexão de almen, diferem-se quando o tempo de shot peening é longo o suficiente para ocorrer o fenômeno de over peening. O over peening é um fenômeno que ocorre quando componentes são submetidos a longos ciclos de shot peening, onde o tempo é maior que o tempo necessário para saturação do componente. Quando isso ocorre ao invés de proporcionar as características mecânicas desejadas aos componentes se obtém um efeito inverso, ou seja, os componentes acabam ficando frágeis (TANGE e OKADA, 2002). Apesar de ser um fenômeno conhecido, ainda não se sabe exatamente em que momento do shot peening ele acontece, alguns cientistas tem dedicado em algumas pesquisas para tentar criar um modelo matemático que

explique o momento exato em que o shot peening deixa de ser benéfico para o componente.

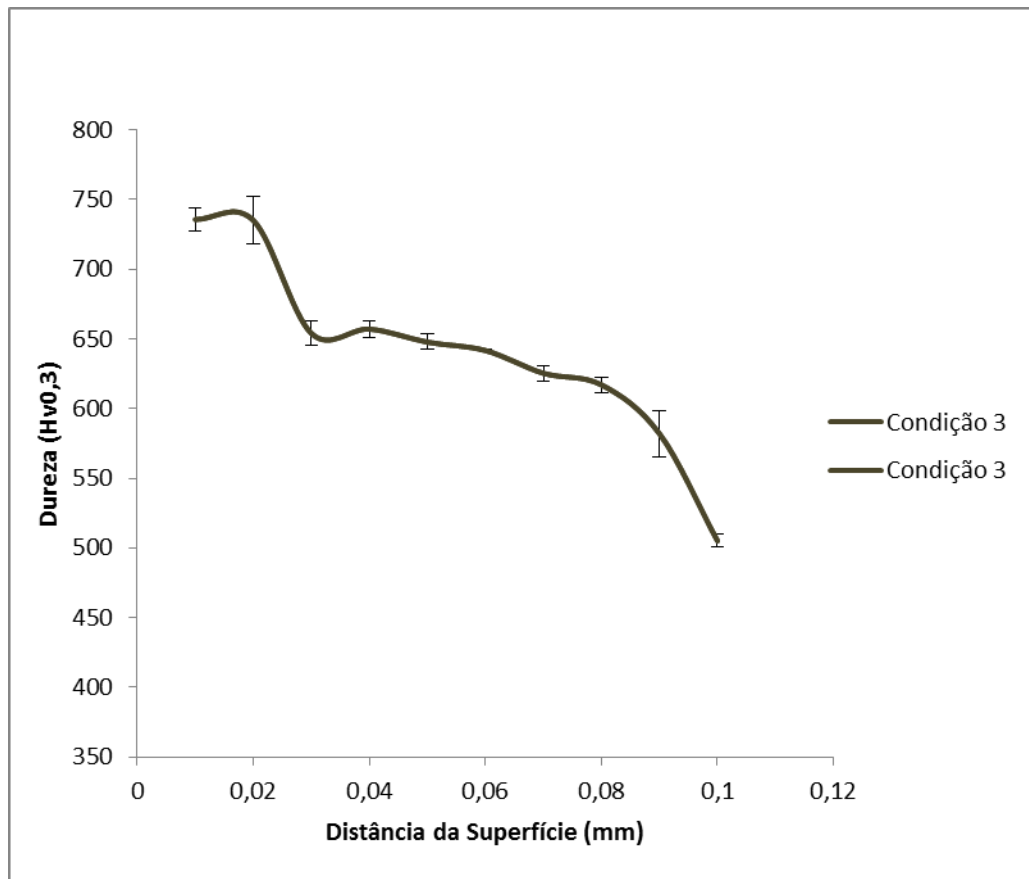


Figura 50 – Perfil médio de microdureza das amostras tratadas com shot peening na condição 3 (0,4mmA / 24 segundos).

A figura 51 apresenta o perfil de microdureza para a condição 4 (0,5mmA / 12 segundos), nesta condição o perfil de microdureza apresenta-se semelhante ao da condição 1 (0,3mmA), todavia com valores médios de perfil de microdureza maiores e perfil praticamente semelhante em valores que a condição 2 (0,4mmA / 12segundos) inclusive nos valores médios.

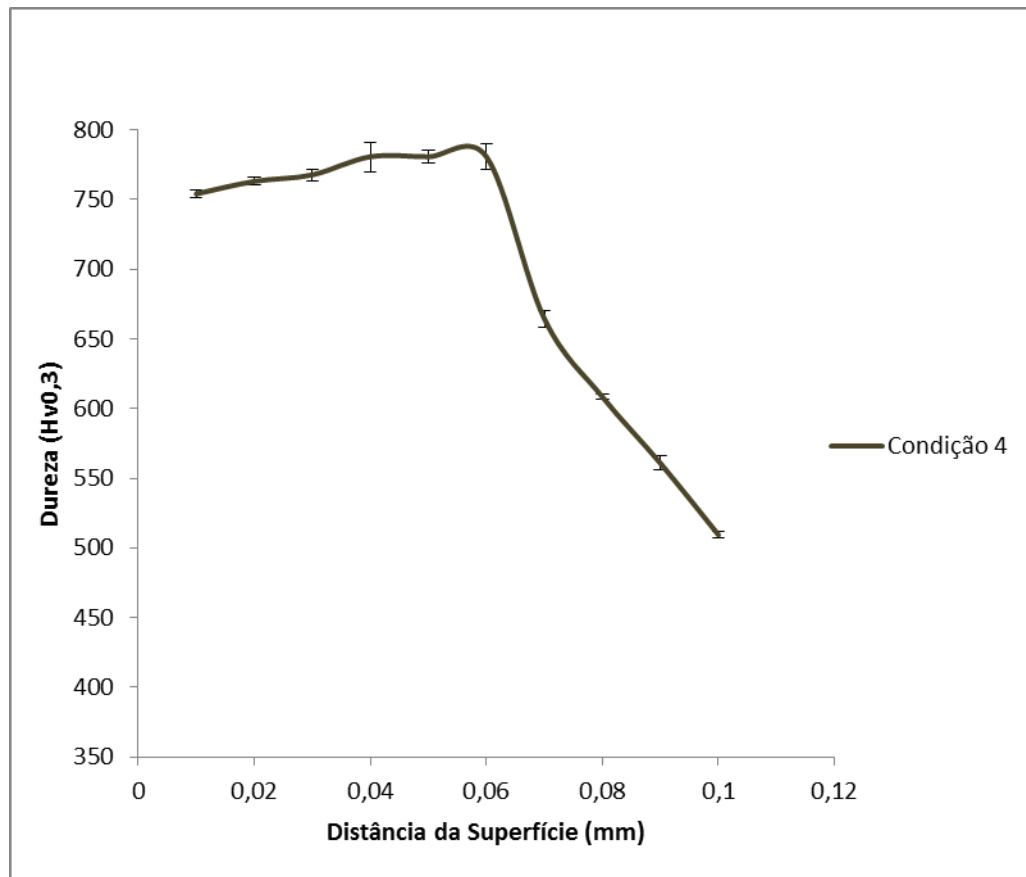


Figura 51 – Perfil médio de microdureza das amostras tratadas com shot peening na condição 4 (0,5mmA / 12 segundos).

O gráfico da figura 52 apresenta o comparativo das diferentes condições de shot peening com as amostras apenas cementadas.

Com o aumento do valor de almen (condição 1,2 e 4) observa-se uma tendência de aumento dos valores médios do perfil de dureza, ficando semelhantes com valores de almen acima de 0,4mmA. Em todas as condições de shot peening foi observado uma alteração no perfil de dureza em relação à camada cementada até uma profundidade de 0,06mm, permanecendo inalterada a partir 0,08mmm. Para mesmo valores de almen (condição 2 e 3) variando-se apenas o tempo observa-se o efeito do *over peening*.

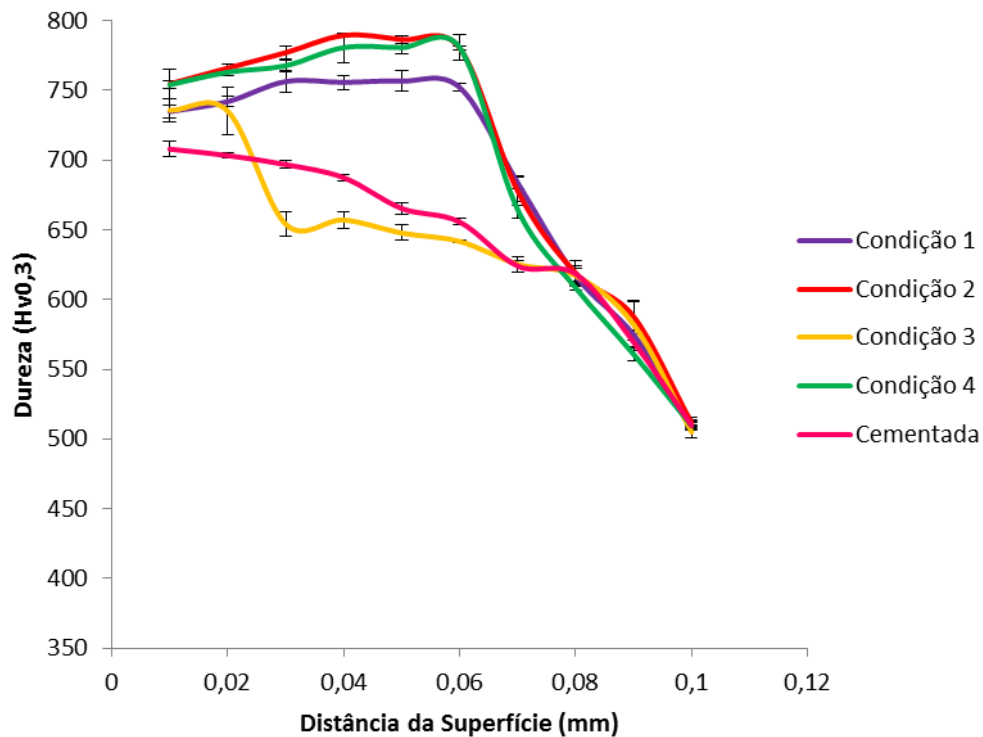


Figura 52 – Comparativo das diferentes condições de shot peening com as amostras apenas cementadas.

5.3.3. Microestrutura das amostras com shot peening

As figuras 53 a 56 apresentam os resultados da microestrutura para as diferentes condições de shot peening (tabela 5). Para as condição 1 (0,3mA / 12 segundos), não houve alterações significativas na microestrutura, ou ao menos que fossem possíveis de serem visualizadas por microscopia ótica (Figura 53), para a figura 54 condições 2 (0,4mA / 12 segundos), figura 55 condição 3 (0,4mA / 24 segundos) e figura 56 condição 4 (0,5mA / 12 segundos) foi observado uma pequena alteração na superfície da amostra, que pode ser considerado como microencruamentos superficial, e pode ser percebido pela coloração mais escura após o ataque com nital.

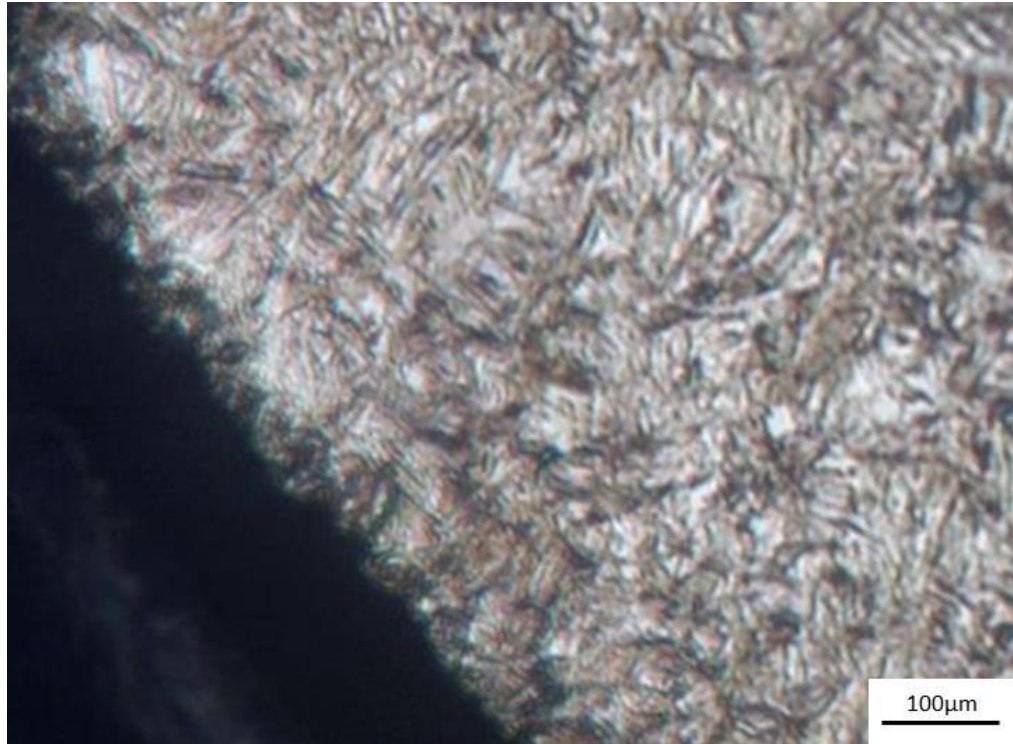


Figura 53 – Microestrutura após o shot peening com altura de arco de 0,3mmA não houve alterações significativas, mantendo a matriz martensítica.

Para as figuras 54 a 56 pode-se concluir que o aumento da intensidade de Almen faz com que haja um aumento do encruamento da superfície que pode ser notada pela diferença na coloração após o ataque com Nital. A superfície dos corpos de prova da condição 2, condição 3 e condição 4 mostraram-se diferentes da superfície das amostras da condição 1, essa condição de microencruamento já é conhecida em peças que são submetidas ao processo de shot peening, portanto é de se esperar que a partir de uma determinada condição de deflexão de almen esse microencruamento seja mais acentuado no caso das condições 2,3 e 4 e menos acentuado na condição 1, pode-se esperar também que haja uma condição onde haverá saturação, portanto a partir dessa condição esse microencruamento deixa de acontecer.



Figura 54 – Microestrutura após o shot peening para condição 2, camada microencruada e mais escura na superfície.

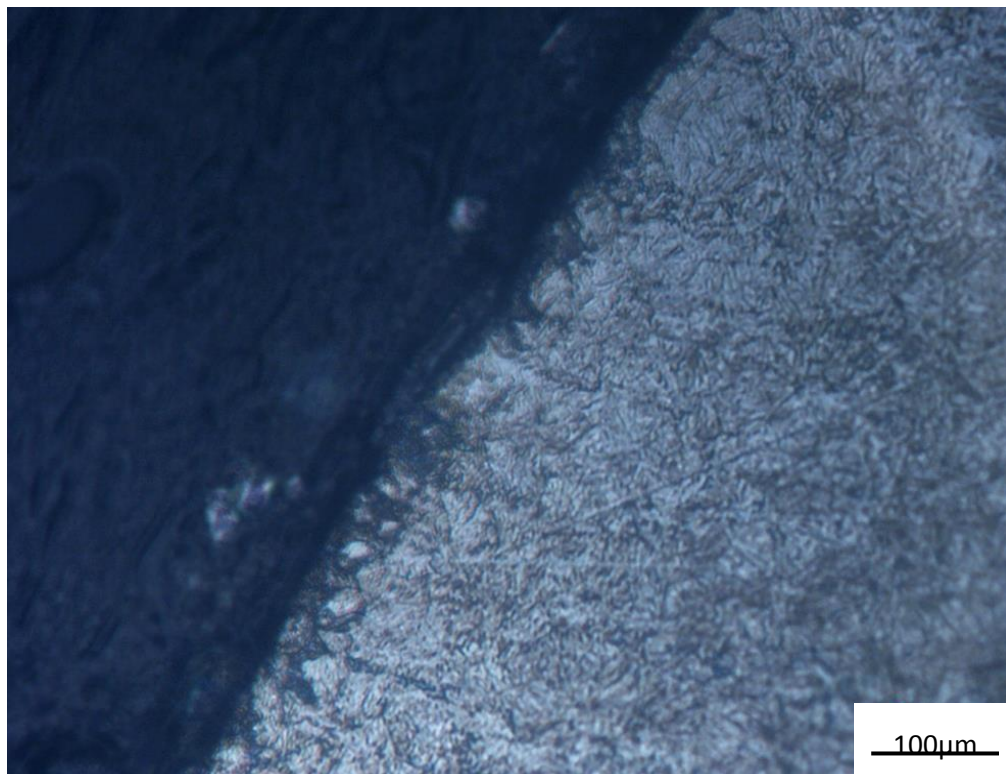


Figura 55 – Microestrutura após o shot peening para condição 3, camada microencruada e mais escura na superfície.



Figura 56 – Microestrutura após o shot peening para condição 4, camada microencruada e mais escura na superfície.

5.3.4. Perfis de tensão residual das amostras com shot peening

As figuras de 57 a 60 mostram os perfis de tensão residual gerados pelo processo de shot peening nas amostras, as tensões residuais das peças com shot peening foram medidos no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/USP), com um difratômetro de raio-x Rigaku Rint 200, com o método do $\sin^2\Psi$, as peças foram medidas em 5 pontos desde a superfície, 0,01mm, 0,03mm, 0,05mm e 0,07mm em direção ao núcleo. Em todos os casos os perfis de tensão obtidos foram bem similares aos perfis encontrados na literatura existente, onde pode ser observado valores de tensões residuais compressivas menores na superfície, quando se aprofunda um pouco mais em direção ao núcleo esses valores tendem a crescer até uma determinada distância e voltam a diminuir até chegar aos valores de tensão residual já existentes no núcleo da peça.

A figura 57 mostra o perfil de tensão residual compressiva gerado na peça pelo shot peening na condição de processo 1 (0,3mmA / 12segundos). É possível observar que houve a formação do perfil característico de peças que são submetidas

ao processo de shot peening. O valor médio de tensão residual compressiva na superfície foi de -750MPa, sendo o valor máximo de tensão a uma distância de 0,03mm da superfície com valor médio de -982MPa, a partir do ponto 0,03mm a tensão residual compressiva tem uma redução do seu valor chegando ao ponto 0,07mm com valor médio de -680MPa, sendo o desvio padrão médio de ± 27 MPa (Figura57).

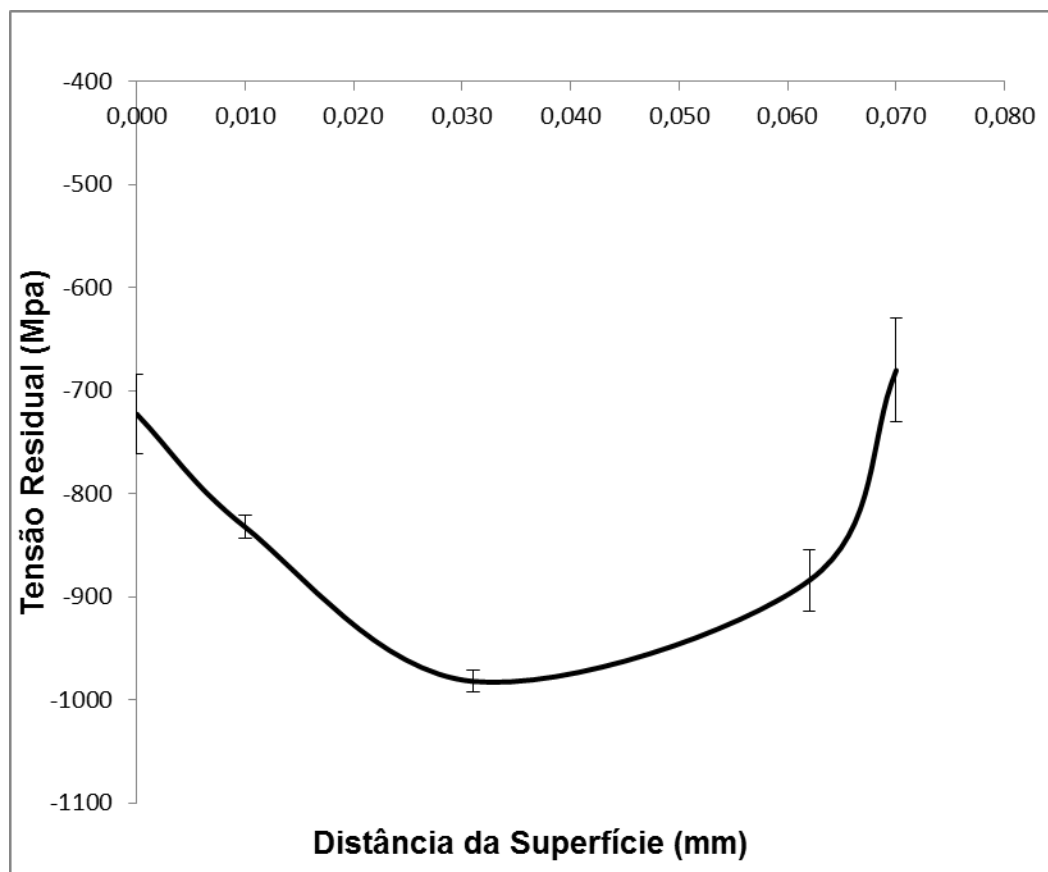


Figura 57 – Perfil de tensão residual compressiva para amostra com shot peening na condição 1 (0,3mmA / 12segundos).

A figura 58 mostra o perfil de tensão residual compressiva gerado na peça pelo shot peening na condição de processo 2 (0,4mmA / 12segundos). É possível observar que houve a formação do perfil característico de peças que são submetidas ao processo de shot peening. O valor médio de tensão residual compressiva teve um sensível aumento em relação a amostra na condição 1, na superfície esse valor foi de -781MPa, sendo o valor máximo de tensão residual compressiva na mesma distância de 0,03mm da superfície com valor médio de -1011MPa, a partir do ponto 0,03mm a tensão residual compressiva tem uma redução do seu valor chegando ao

ponto 0,07mm com valor médio de -526MPa, valor sensivelmente menor que a amostra na condição 1, com desvio padrão médio de ± 24 MPa (Figura 58).

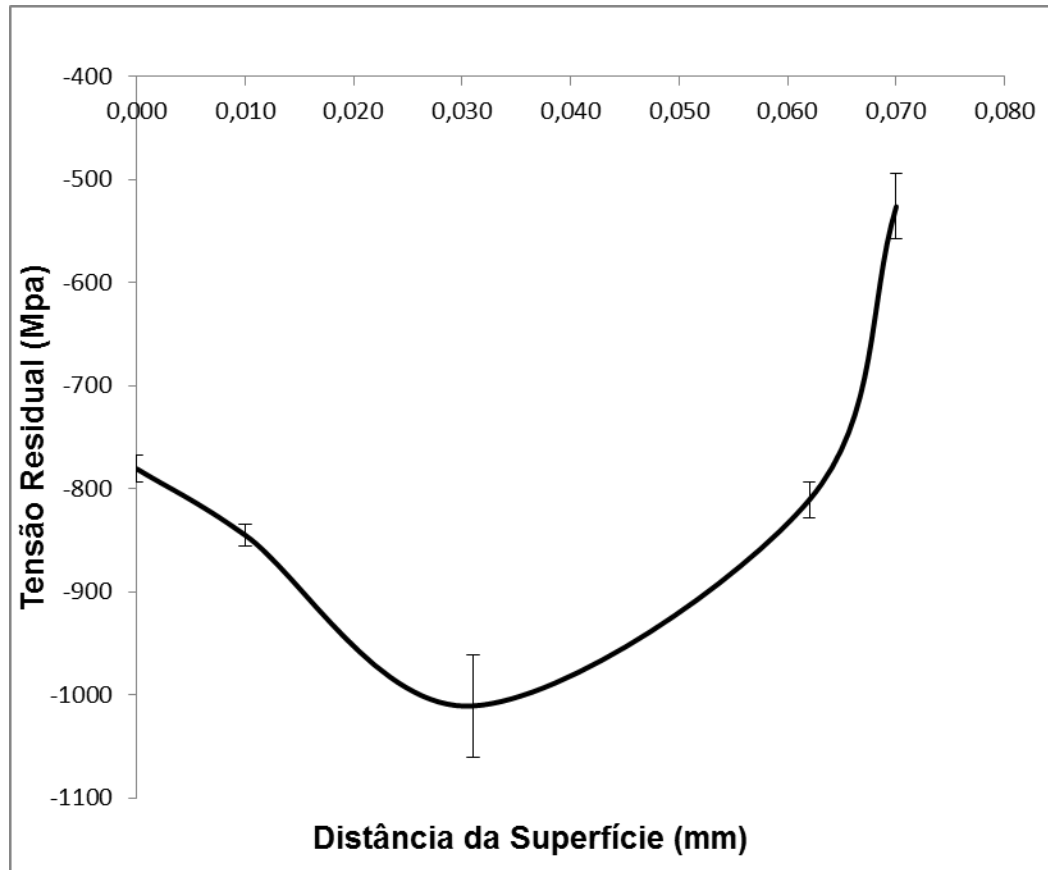


Figura 58 – Perfil de tensão residual compressiva para amostra com shot peening na condição 2 (0,4mA / 12segundos).

A figura 59 mostra o perfil de tensão residual compressiva gerado na peça pelo shot peening na condição de processo 3 (0,4mA / 24 segundos). Embora tenha havido um aumento no tempo não houve uma alteração significativa no perfil de tensão residual, sendo o perfil muito similar ao da condição 2. O valor médio de tensão residual compressiva na superfície foi de -721MPa, sendo o valor máximo de tensão residual compressiva na mesma distância de 0,03mm da superfície com valor médio de -1032MPa, a partir do ponto 0,03mm a tensão residual compressiva tem uma redução do seu valor chegando ao ponto 0,07mm com valor médio de -548MPa, valor sensivelmente menor que a amostra na condição 1, com desvio padrão médio de ± 49 MPa (Figura 59).

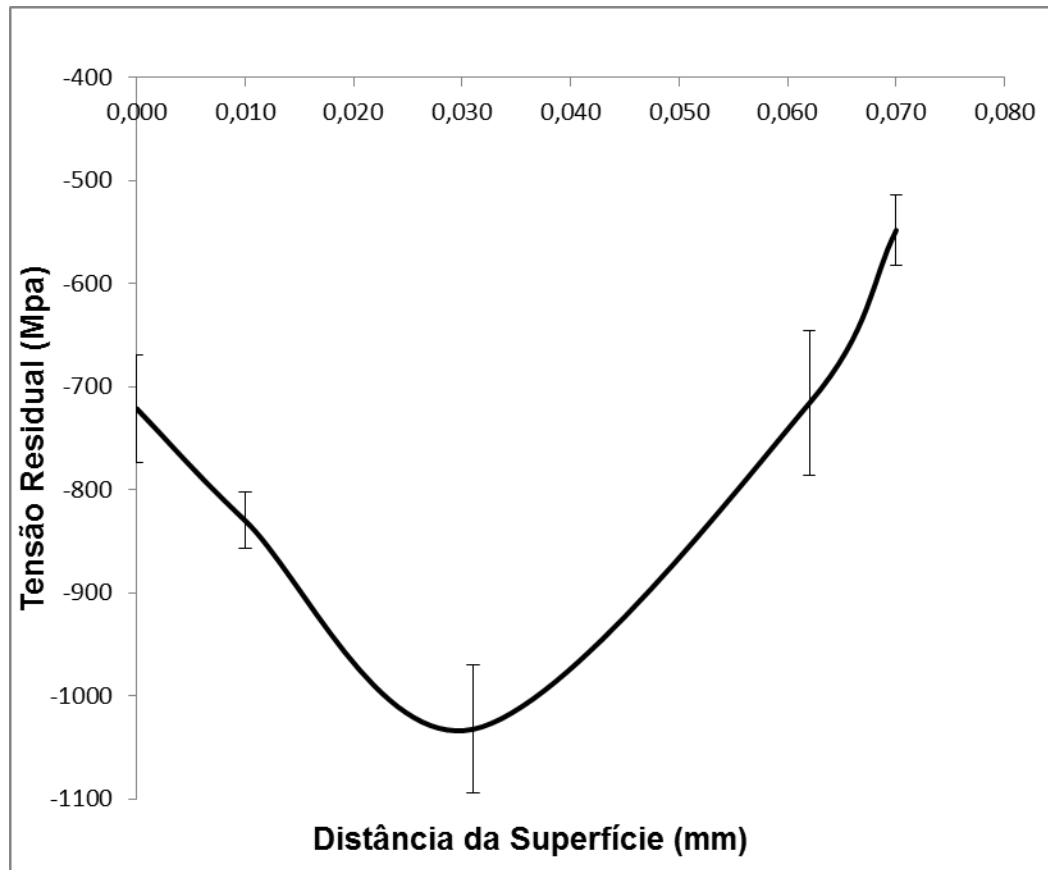


Figura 59 – Perfil de tensão residual compressiva para amostra com shot peening na condição 3 (0,4mmA / 24 segundos).

A figura 60 mostra o perfil de tensão residual compressiva gerado na peça pelo shot peening na condição de processo 4 (0,5mmA / 12segundos). É possível observar que não houve alterações significativas e que estatisticamente seu perfil é igual ao das condições anteriores. O valor médio de tensão residual compressiva na superfície esse valor foi de -674MPa, sendo o valor máximo de tensão residual compressiva na mesma distância de 0,03mm da superfície com valor médio de -992MPa, a partir do ponto 0,03mm a tensão residual compressiva tem uma redução do seu valor chegando ao ponto 0,07mm com valor médio de -723MPa, com desvio padrão médio de ± 16 MPa (Figura 60).

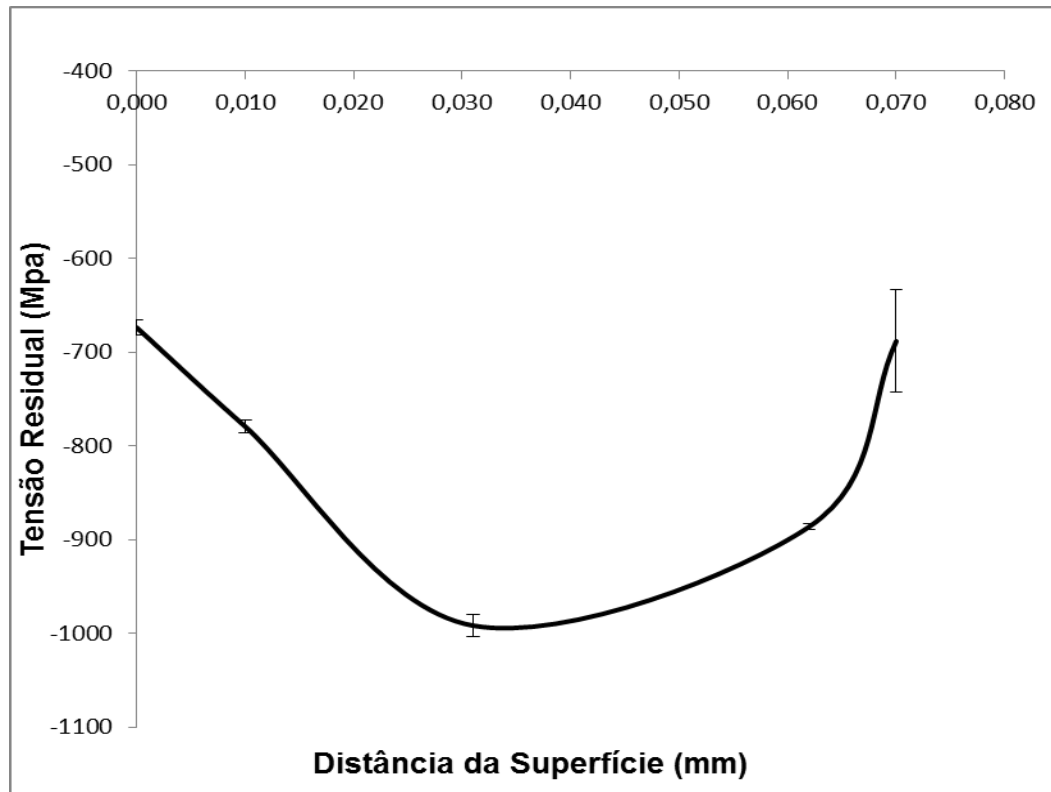


Figura 60 – Perfil de tensão residual compressiva para amostra com shot peening na condição 3 (0,5mmA / 12 segundos).

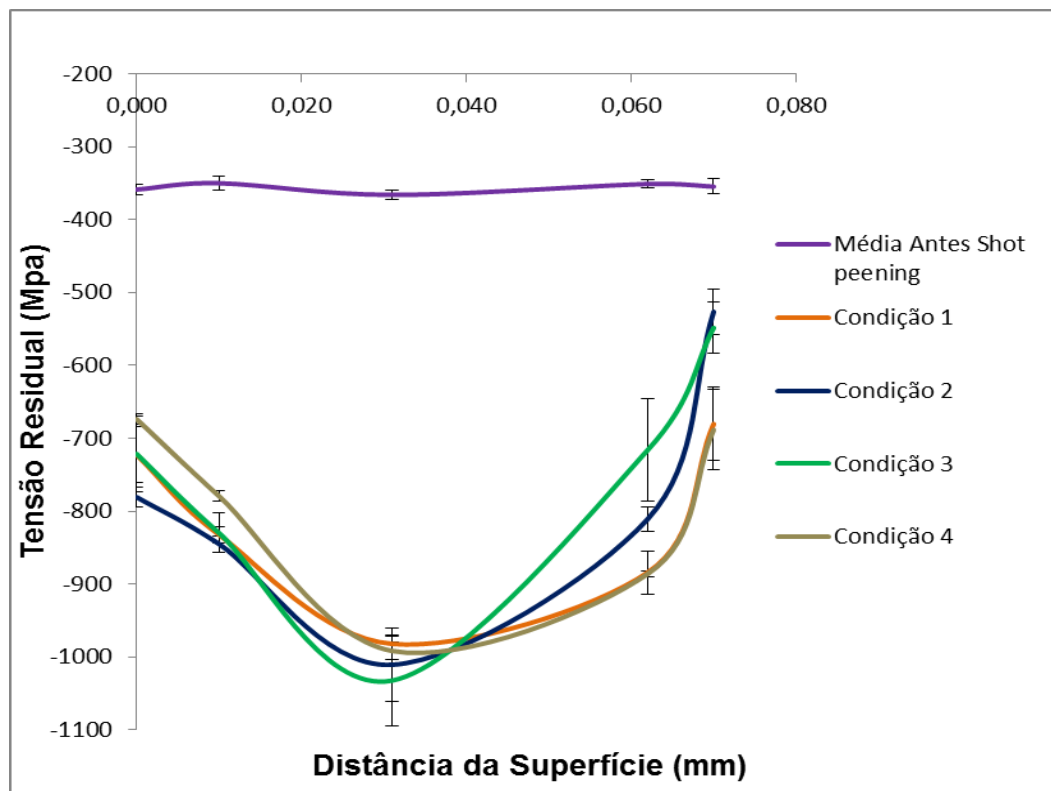


Figura 61 – Comparativo das diferentes condições de shot peening com as amostras apenas cementadas.

Apesar das variações, não é possível observar diferença entre as amostras. Estatisticamente pode se afirmar que apesar de condições distintas os perfis de tensão residual compressiva permanecem com as mesmas características, ou seja, tem uma tensão residual na superfície que varia de -690 ~ 800MPa, sendo o pico de tensão residual compressiva aos 0,03mm da superfície variando de -900 ~ 1060MPa e por ultimo a uma distância de 0,07mm onde foi encontrado as maiores variações com tensão residual compressiva de -500 ~ -700MPa. Os perfis obtidos podem ser coMParados com os perfis encontrados por V. Llaneza, F.J. Belzunce (2015), com uma diferença entre o ponto final de medição, neste trabalho a tensão medida até o ponto de 0,07mm enquanto V. Llaneza, F.J. Belzunce (2015) construíram um perfil com maior profundidade. Comparando os resultados obtidos pelos pesquisadores pode se considerar um resultado bem próximo com os encontrados neste trabalho.

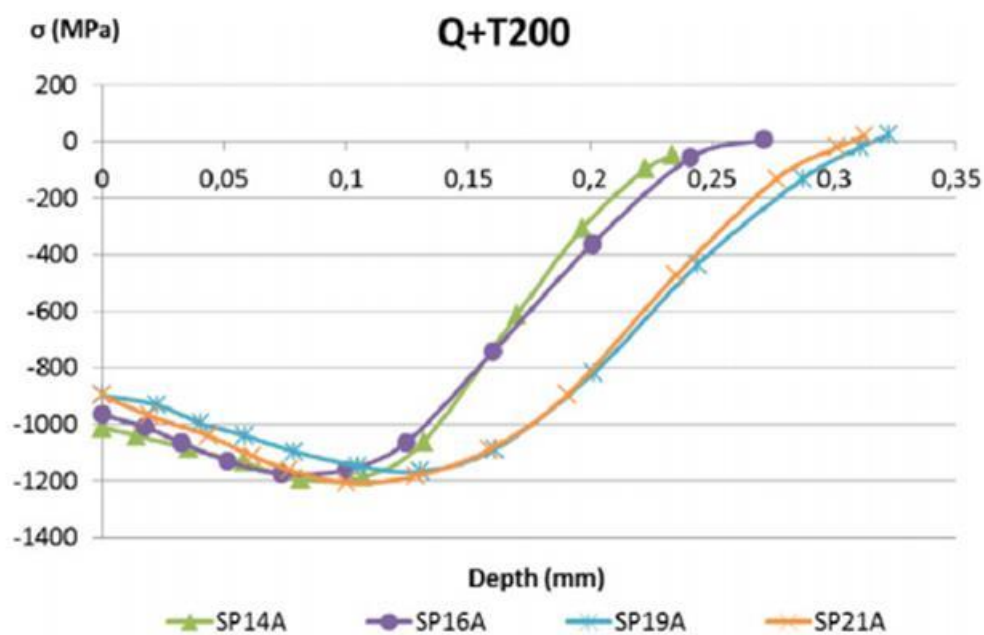


Figura 62 – Perfis de tensão residual obtidos por Llaneza e Belzunce para uma amostra temperada e revenida a 200°C

5.3.5. Rugosidade

A figura 64 mostra a média da rugosidade $R_{m\acute{a}x}$ para as amostras apenas cementadas, condição de 0,3mmA, 0,4mmA e 0,5mmA, para os flancos direito e esquerdo. Foram realizadas medições em três dentes distintos para cada lado do dente e então realizado a média das 3 medições. Para a condição apenas

cementada a média da rugosidade $R_{\text{máx}}$ foi de $5,73\mu\text{m}$ e $6,02\mu\text{m}$ com desvio padrão médio de $1,57\mu\text{m}$ e $1,87\mu\text{m}$, para o flanco esquerdo e direito respectivamente. Para condição de $0,3\text{mmA}$ a rugosidade média foi de $5,152\mu\text{m}$ e $5,779\mu\text{m}$ com desvio padrão médio de $1,48\mu\text{m}$ e $1,34\mu\text{m}$ para o flanco esquerdo e direito respectivamente. Para condição de $0,4\text{mmA}$ a rugosidade média foi de $5,261\mu\text{m}$ e $5,786\mu\text{m}$ com desvio padrão médio de $1,12\mu\text{m}$ e $1,59\mu\text{m}$ para o flanco direito e esquerdo respectivamente. Para condição de $0,5\text{mmA}$ a rugosidade média foi de $5,398\mu\text{m}$ e $5,741\mu\text{m}$ com desvio padrão medio de $1,31\mu\text{m}$ e $1,72\mu\text{m}$ para o flanco direito e esquerdo respectivamente. A figura 65 mostra a média da rugosidade R_a para as amostras apenas cementadas, condição de $0,3\text{mmA}$, $0,4\text{mmA}$ e $0,5\text{mmA}$, para os flancos direito e esquerdo, foram realizadas medições em três dentes distintos para cada lado do dente e então realizado a média das 3 medições, para a condição apenas cementada a média da rugosidade R_a foi de $0,65\mu\text{m}$ e $0,69\mu\text{m}$ com desvio padrão médio de $0,17\mu\text{m}$ e $0,22\mu\text{m}$, para o flanco esquerdo e direito respectivamente. Para condição de $0,3\text{mmA}$ a rugosidade média foi de $0,74\mu\text{m}$ e $0,69\mu\text{m}$ com desvio padrão médio de $0,19\mu\text{m}$ e $0,24\mu\text{m}$ para o flanco esquerdo e direito respectivamente. Para condição de $0,4\text{mmA}$ a rugosidade média foi de $0,68\mu\text{m}$ e $0,73\mu\text{m}$ com desvio padrão médio de $0,14\mu\text{m}$ e $0,21\mu\text{m}$ para o flanco direito e esquerdo respectivamente. Para condição de $0,5\text{mmA}$ a rugosidade média foi de $0,77\mu\text{m}$ e $0,78\mu\text{m}$ com desvio padrão medio de $0,16\mu\text{m}$ e $0,21\mu\text{m}$ para o flanco direito e esquerdo respectivamente.

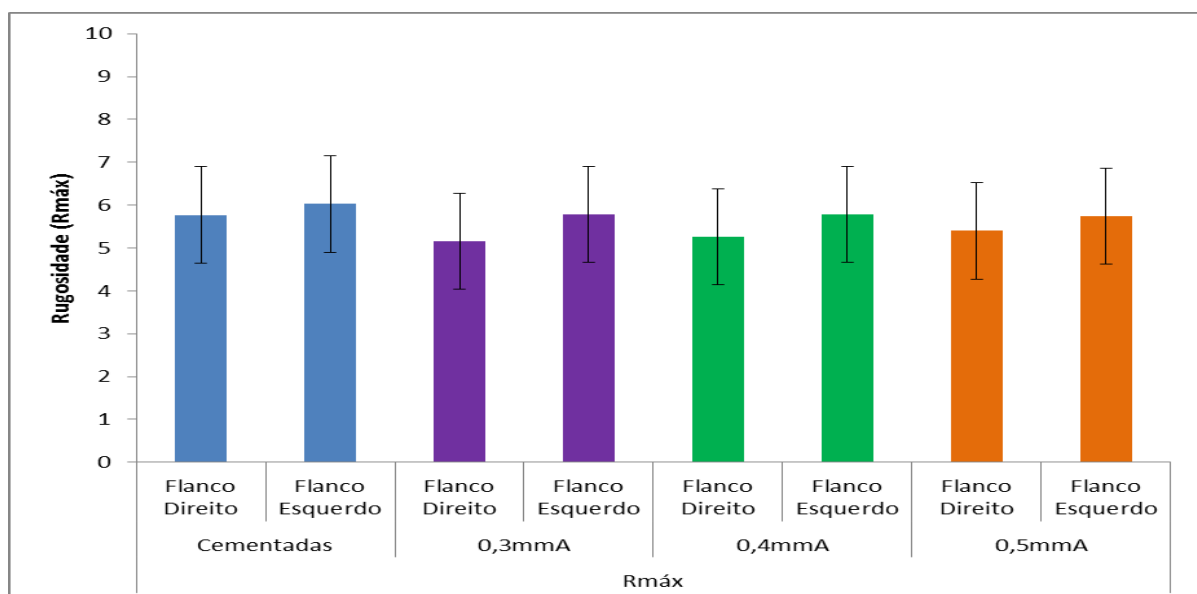


Figura 63 – Comparativo da rugosidade superficial $R_{\text{máx}}$ nos flancos dos dentes esquerdo e direito em diferentes condições de Almen.

Pode ser observado que as amostras quando comparadas com as amostras apenas cementadas tem uma sensível diminuição no valor de $R_{\text{máx}}$. Isso pode ser explicado pelo fato de que o parâmetro de rugosidade $R_{\text{máx}}$ ser a distância entre o maior pico e o maior vale em uma distância determinada. Pode-se dizer que o shot peening promove uma melhora na uniformidade da superfície, ou seja, as granalhas diminuem a distância entre os picos e vales (Figura 63). Já se comparar unicamente o parâmetro de rugosidade $R_{\text{máx}}$ entre as amostras submetidas ao processo de shot peening pode-se afirmar que não há alteração e que a rugosidade superficial se mantém independente da deflexão de Almen utilizada, o que se pode concluir que independente das condições de shot peening utilizadas quando se mantém constante os parâmetros de vazão de granalha, tamanho da esfera, distância do bico, rotação, cobertura e tempo, o que definirá as condições de rugosidade será a condição de dureza superficial que a peça se encontra; ou seja, para peças com a mesma dureza superficial a variação da deflexão do Almen não impactam na rugosidade $R_{\text{máx}}$.

Para a condição de rugosidade R_a (Figura 64) pode ser observado que ao contrário da rugosidade $R_{\text{máx}}$ a rugosidade R_a tem um sensível aumento, isso se dá pelo fato deste parâmetro medir a rugosidade média, o que já é esperado, pois apesar do shot peening propiciar uma melhor uniformidade entre picos e vales existe uma tendência de um leve aumento da rugosidade superficial, como o parâmetro de rugosidade R_a é mais sensível devido a sua característica de traçar uma rugosidade média é possível observar esse aumento da rugosidade superficial. Em relação ao aumento da deflexão do Almen pode ser feitas as mesmas considerações feitas para rugosidade $R_{\text{máx}}$, à deflexão do Almen não tem relação direta com a rugosidade, pois depende das propriedades mecânicas do material e da dureza superficial.

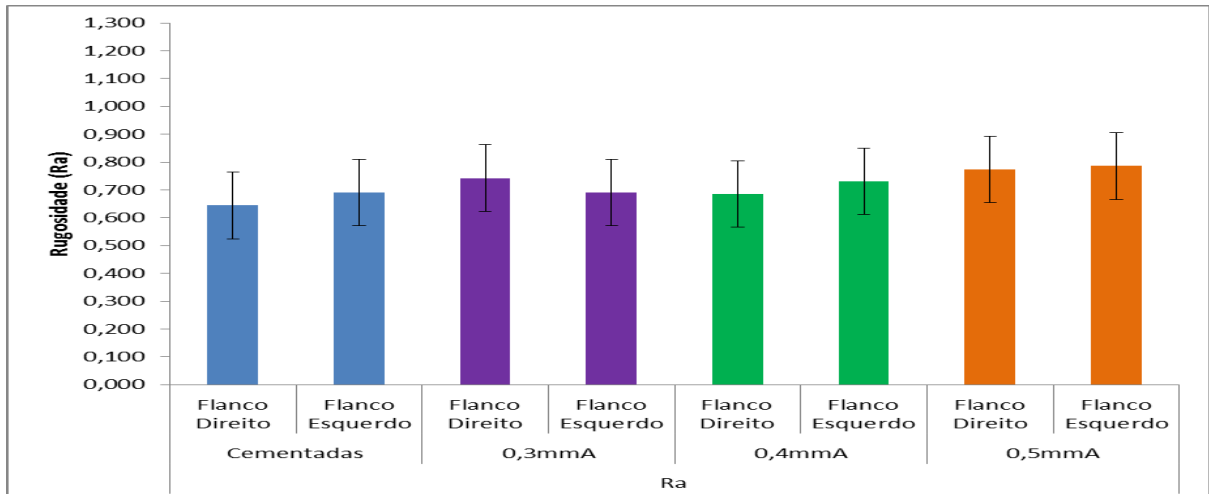


Figura 64 – Comparativo da rugosidade superficial Ra nos flancos dos dentes esquerdo e direito em diferentes condições de Almen.

Os resultados obtidos neste trabalho podem ser comparados aos resultados obtidos pelos pesquisadores V. Llanea, F.J. Belzunce (2015) que chegaram à conclusão que as características mecânicas influenciam mais na rugosidade superficial de peças submetidas ao processo de shot peening que a deflexão do Almen, ou seja, quanto maior a dureza superficial menor será o impacto do shot peening na rugosidade superficial.

Utilizando a equação descrita no trabalho de V. Llanea, F.J. Belzunce (2015) pode se obter resultados bem próximos aos obtidos pelos pesquisadores, mesmo sendo materiais com propriedades mecânicas e químicas distintas, pode ser considerado que os resultados obtidos neste trabalho estão alinhados com os resultados obtidos pelos pesquisadores. A figura 65 mostra o resultado obtido pelos pesquisadores V. Llanea, F.J. Belzunce (2015) para rugosidade Ra assim como a equação para previsão dos valores de rugosidade a partir da dureza superficial.

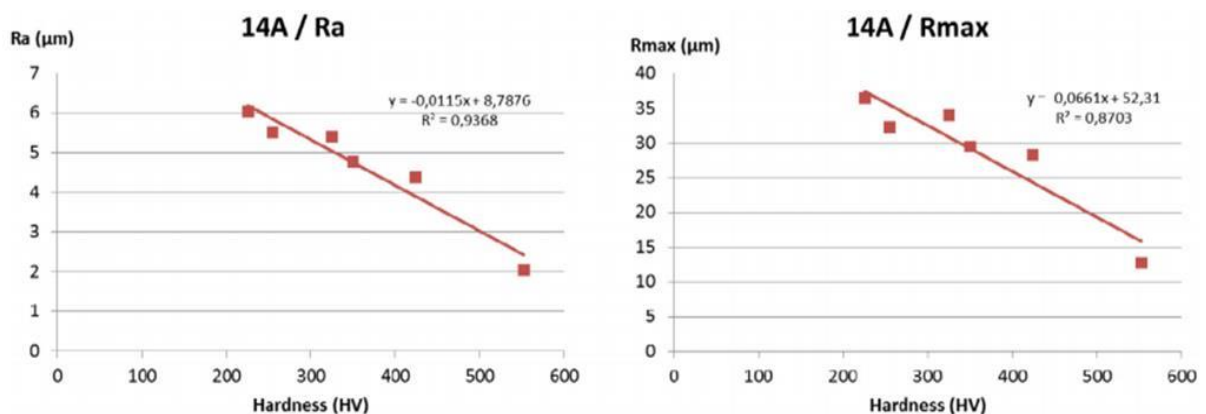


Figura 65 – Valores obtidos para rugosidade Ra e Rmáx. (LLANEZA e BELZUNCE, 2015)

6. CONCLUSÕES

- O tempo necessário para atingir a cobertura de no mínimo 98% foi de 6 segundos;
- Para todas as condições de shot peening houve um aumento na microdureza, esse aumento se deu até uma distância de 0,06mm da superfície, permanecendo inalterado a partir de 0,08mm. A única exceção foi à condição 3 onde o perfil de microdureza diferiu completamente dos perfis obtidos nas outras condições;
- A condição 3 sofreu um fenômeno conhecido na literatura como over peening devido há um tempo prolongado de jateamento ao qual foi exposto;
- Os perfis para as condições 1, 2 e 4 podem ser considerados estatisticamente idênticos;
- Os maiores valores de microdureza foram encontrados a uma distancia de 0,03mm da superfície para as condições 1,2 e 4.
- A microestrutura, para a condição 1 não houve alterações perceptíveis, para as condições 2, 3 e 4 houve um microencruamento, que pode ser notado pela coloração mais escura na superfície após o ataque com nital;
- Para todas as condições de shot peening os perfis de tensões residuais tem perfil característico de peças submetidas ao processo de shot peening, sendo o pico máximo a 0,03mm, chegando a -1099 MPa;
- Para a condição 3 embora tenha sofrido o over peening que fica perceptível na medição do perfil de microdureza não houve essa mesma indicação nos resultados de tensão residual;
- Todos os perfis de tensão residual para todas as condições de shot peening podem ser considerados estatisticamente iguais;
- Existe uma convergência e similaridade entre os perfis de microdureza e os perfis de tensão residual, sendo que, as peças que sofrem o over peening embora tenham valores de tensão residual similares ao de peças sem o over peening apresentam uma queda brusca na

microdureza a partir de uma distância de 0,02mm, porém não se pode afirmar ainda que exista correlação entre os valores;

- O perfil de microdureza pode ser um parâmetro mais simples que pode melhorar a precisão da técnica de raio-x utilizada;
- Com o perfil de microdureza poder ser observado com maior facilidade o fenômeno de *over peening*;
- O shot peening apresenta-se uma boa técnica para promover uma uniformização no perfil da rugosidade;
- A rugosidade superficial $R_{\text{máx}}$ por ser um parâmetro que calcula a maior distância entre o maior pico e o maior vale apresentou uma sensível melhora, mostrando que o shot peening é eficiente na uniformização da superfície;
- Embora haja influência na rugosidade a deflexão de Almen não tem relação direta com o aumento da rugosidade, podendo concluir que as características mecânicas do material podem influenciar mais no resultado que a deflexão de almen;
- Quanto maior a dureza superficial do material menor será a influência do shot peening na rugosidade superficial.

7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Este estudo deu um primeiro passo em relação à infinidade de temas que podem surgir a partir da relação do shot peening com o aumento da resistência a fadiga. Como temas futuros poderão ser estudados o aumento da resistência ao desgaste em peças submetidas ao processo de shot peening, assim como o desenvolvimento de modelos matemáticos que tornem o processo de shot peening mais previsível e menos empírico.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEN, J. O.; BACK, P. H.; **Residual stresses and fatigue in metals**. Mc Graw-Hill, cap. 6, p. 61-62, apêndice a-12, p. 200-201, New York, 1963.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Metals Handbook. Fundamentals of corrosion**. Vol13. 9th edition. OH, EUA, 1990.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Metals Handbook – Heat Treating**. 9 ed, Ohio, v. 4. 1988.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM E 3-95 (1995). Standard practice for preparation of metallographic specimens**. Philadelphia, ASTM.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM E 18-94 (1994). Standard test methods for Rockwell hardness and Rockwell superficial hardness of metallic materials**. Philadelphia, ASTM.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM E 92-82 (1992). Standard test methods for Vickers hardness of metallic materials**. Philadelphia, ASTM.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM E 384-89 (1990). Standard test methods for microhardness of materials**. Philadelphia, ASTM.
- BAGHERIFARD, S., FERNANDEZ-Pariente, I., GHELICHI, R. *and* GUAGLIANO M. - **Fatigue behavior of steel notched specimens with nanocrystallized surface obtained by severe shot peening**, Mater Design, 45, 497–503. (2013)
- BAGHERIFARD, S., GHELICHI, R., GUAGLIANO, M. (2012). **Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening**. Appl Surf Sci. 258 6831– 6840.
- BAGHERIFARD, S., GHELICHI, R., GUAGLIANO, M. (2012). **On the shot peening surface coverage and its assessment by means of finite element simulation: a critical review and some original developments**. Appl. Surf. Sci., 259, 186–194. [CrossRef](#), [CAS](#), [Web of Science® Times Cited: 6](#), [ADS](#).
- BALAN, K. **Shot peening techniques for springs**. The Shot Peener. Eletronics Incorporated, 2007, vol. 21, n. 1, p. 14-16.
- BARRA, G. C. P.; **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica de Troca de Processos de Cementação em Linha Industrial de Tratamento Térmico**. POLI –

Engenharia Metalúrgica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2013.

BOTTARO, M. **Estudo do envelhecimento de um tubo de raios-x por métodos não evasivos**. Dissertação (mestrado). Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo, SP, 2010.

BRINGAS, J. E. **Handbook of Comparative World Steel Standards**. ASTM international. USA, 2007. P. 840.

CALLE G., M. A.; **Análise Numérico-Computacional das Tensões Residuais Induzidas pelo Jateamento com Granalha**. 2004. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, USP, 2004.

CALLE G., M. A.; **Análise Numerico-computacional das Tensões Residuais Induzidas por Jateamento com Granalha em Molas Automotivas**. 2009. 215 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, USP, 2009.

CALLISTER JR., W. D.; **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CAMARGO, J. A. M.; **A influência do shot peening e das anodizações crômica, sulfúrica e dura sobre a resistência à fadiga da liga 7050-t7451 de uso aeronáutico**. 2007, Tese (doutorado) Faculdade de Engenharia – Campos de Guaratinguetá da UNESP.

CAO, W., FATHALLAH, R., CASTEX, L., **Correlation of almen ar height with residual stresses in shot peening process**. Materials Science and Technology. V.11, p. 967-973, 1995.

SILVA, E. C.; **Simulação Numérica do Processo de Conformação de Chapas por Jateamento de Esferas**. Tese (doutorado) Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica – Campinas, SP, 2008.

CARVALHO, D. M., **Análise de Fadiga de Molas Planas para Suspensão de Veículos comerciais**. 2005. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

Castex L., SPRAUEL, J. M.; **X-Ray Stress Analysis**. Materials Science Forum, v. 79-82, 1991, p. 143-152.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. São Paulo: ABM, 1979.

CURTIS, S. A.; ROMERO, J. S.; RIOS, E.R.; RODOPOULOS, C.A. and LEVERS, A.; **Predicting the interfaces between crack growth regimes in 7150-T651**

aluminum alloy using the fatigue damage map. International Journal of Fatigue. 25 – p. 59-66. 2003.

DALY, J.J.; JONHSON, D.E.; **Computer-Enhanced Shot Peening. Advanced Materials and Processes**, n.5, 1990, p. 49-52.

DIEPART, C. P.; **Modeling of Shot Peening Residual Stresses – Pratical applications.** Materials Science Forum, v. 163-165, p. 457-464, Stafa, Zurich, 1994.

ECHEVERRI ARIZA, E. A.; **Análise Numérica e Experimental das tensões residuais geradas durante o processo de têmpera de cilindros de aço AISI 1045, 4110 e 4340** – São Paulo, 2012. 177 p.

FATHALLAH, R., BOURAOU, C., BEM SGHAIER, R.; **An Engineering Predctive Design Approach to High Cycle Fatigue Reability of Shot Peenes Parts;** Materials Design, vol. 30, 2009, p. 475-486.

FUCHS, H. O.; **Regional Tensile Stress as a Measure of the Fatigue Strength of Notched Parts. Proceedings of the International Conference on Mechanical Behavior of Materials, Vol. 2, 1971, p. 478-488.**

GUAGLIANO, M., VERGANI, L.; **An approach for prediction of fatigue strength of shot peened components.** Engineering fracture mechanics. V. 21 21.171, p. 501-512, 2001.

GRIFFITHS, B. **Manufectoring Surface Technology.** London, Penton Press, 2001, p. 233.

GROSCH, J. (1993) **Fundamentals of Carburising and toughness of carburized components. In: QUENCHING AND CARBURISING, Melbourne, 1991.** Proceedindgs. London, The Institute of Materials. P. 227-249.

HOESCH; **Warm Gromte Federn – Konstruktion un Fertigung**, 1987.

JOHNS, H. E.; **The Physics of Radiology**, 4^o ed. Charles C. Thomas Publisher, Springfield, IL, 1983.

KLOOS, K.; MAUCHERAUCH, E.; **Origin, Mensurement and Evaluation of Residual Stress".** Residual Stress in Science and Technology, Vol. 1, 1987, p. 3-27.

KOBAYASHI, M.; MATSUI, T.; MURAKAMI, Y. **Mechanism of Creation of Compressive Residual Stress by Shot Peening.** International Journal of Fatigue; v.20, n. 5, p. 351-357, 1998.

KRAUSS, G.; **Microestructure of Carburized steels**, Heat Teating, v25, n4, p 12-15, Apr., 1993.

KRAUSS, G.; **Steels Processing, Structure and Performance**. ASM International. Materials Park, Ohio, 2005, 614 p.

LI, D. **Boiling Water Heat Transfer during Quenching of Steel Plates and Tubes**. 2003. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais e Metais) – University of British Columbia, Vancouver, 2003.

LIU X. D., SHANG D. G., ZHANG L. H., SUN Y. J. and CHEN T. - **Residual life prediction for healing fatigue damaged copper film by laser shock peening**. Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. 37, 4, 427–435. (2014).

LLANEZA, V.; BELZUNCE, F.J.; **Study of the effects produced by shot peening on the surface of quenched and temperes steels: roughness, residual stresses and work hardening**. 2015. Applied Surface Science. Ed. 356 (2015) p. 475-485.

L. TRŠKO, O. BOKUŮVKA, F. NOVÝ, M. GUAGLIANO - **Effect of severe shot peening on ultra-high-cycle fatigue of a low-alloy steel**. Mater. Des., 57 (2014), pp. 103–113.

MIC; **Shot peening applications**. Metal Improvement Company – 9ª ed., 62p. Disponível em: http://www.metalimprovement.com/premium/PDF/greenbook_v9/english/MIC%20Green%20Book%20-%209th%20edition%20-%20Complete%20Book.pdf, Acesso em: 15 Março. 2015.

OLIVEIRA, R. R.; **Avaliação da Tensão Residual Em Alumínio 7050 Conformado pelo Processo Peen Forming**. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear - Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2011.

OLMI, G.; FREDDI, A. - **A new method for modelling the support effect under rotating bending fatigue: application to Ti-6Al-4 V alloy, with and without shot peening**. Fatigue Fract Eng Mater Struct. 36, 981–993. (2013).

PYZALLA, A.; **Methods and Feasibility of Residual Stress Analysis by High-Energy Synchrotron Radiation in Transmission Geometry Using a White Beam**. Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 19, No. 1, 2000.

ROTHERY, W. H. **Estrutura das Ligas de Ferros – Introdução Elementar**. Edgar Blücher Ltda, 1968.

SCURACCHIO, B. G.; **Tensões Residuais Induzidas por Shot Peening e Durabilidade de Molas em Lâmina**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, SP. 2012.

SHARP, P. K.; CLAYTON, J. Q.; CLARK, G.; ***The Fatigue Resistance of Peened 7050-T7451 Aluminum Alloy Repair and Re-Treatment of a Component Surface.***

Fatigue e Fracture of Engineering Materials e Structures, 17 (3), p. 243-252, 1994.

SILVA, E. C.; ***Simulação Numérica do Processo de Conformação de Chapas por Jateamento de Esferas.*** Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP. 2008.

SONG, P. S.; WEN, C. C.; ***Crack Closure and Crack Growth Behavior in Shot Peened Fatigue Specimen, Engineering Fracture Mechanics.*** *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 63, p 295-304, 1999.

SOUZA, S. A.; ***Aços de Baixa Liga. Em: Composição Química dos Aços.*** Ed. Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 2001, p. 19-52.

TANGE, A., OKADA, H.: ***Shot Peening and Coverage.*** *Revista Shotpeener*, 2002.

<http://www.shotpeener.com/library/pdf/200267.pdf>

TORRES, M. A. S.: ***Uma Avaliação do Efeito do Shot Peening na Vida em Fadiga do Aço ABNT 4340 com e sem Revestimento de Cromo Duro.*** Tese (Doutorado) – FEG/UNESP, Guaratinguetá, SP, 2002.

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul; ***Física Moderna, cap 5., Produção de Raio-X.*** Disponível em

http://www.ifufrgs.br/tex/fis142/fismof/mod05/m_s01.html. Acesso em 25 de Março de 2015.

WANG, T.; YAO, M.; WANG, R.; ***Fatigue Limits of Shot Peened metals.*** *Journal of Materials Processing Technology*. V. 73, p 57-63, 1998.

ZAMMIT, A., ABELA, S., WAGNER, L., MHAEDE, M. and GRECH, M. ***Tribological behaviour of shot peened Cu–Ni austempered ductile iron.*** *Wear*, 302, 829–836. (2013). [CrossRef](#), [CAS](#), [Web of Science® Times Cited: 1](#)

9. ANEXOS

- TRABALHO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO



Campinas, 23 de Abril de 2015.

DECLARAÇÃO

A Simmelink e Fiorini Editora declara para os devidos fins que o artigo **Estudo da Influência do Shot Peening na Microdureza de Engrenagens Helicoidais Automotivas Cementadas**, de autoria de **Jardel Jackson de Oliveira Silva** foi aprovado para publicação na revista Industrial Heating (ISSN 2178-0110).

O mesmo será publicado no decorrer do ano de 2015.

Me coloco a disposição para esclarecimento de quaisquer dúvidas.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Udo Fiorini'.

Udo Fiorini
Editor - Revista FORGE
Simmelink e Fiorini Editora Ltda

- CERTIFICADO DE PREMIAÇÃO DE MELHOR TRABALHO APRESENTADO NA VII CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE TEMAS DE TRATAMENTO TÉRMICO.

