

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA - COMEC  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**KAUÊ BERTUOL**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE *SHOT PEENING*  
NA DUREZA SUPERFICIAL, RUGOSIDADE E TENSÃO RESIDUAL  
EM AÇO ASTM A743-CA6NM**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA  
2014**

**KAUÊ BERTUOL**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE *SHOT PEENING*  
NA DUREZA SUPERFICIAL, RUGOSIDADE E TENSÃO RESIDUAL  
EM AÇO ASTM A743-CA6NM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Coordenação de Mecânica - COMEC, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz

**PONTA GROSSA**

**2014**



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE SHOT PEENING NA DUREZA SUPERFICIAL, RUGOSIDADE E TENSÃO RESIDUAL EM AÇO ASTM A743-CA6NM**

por

**KAUÊ BERTUOL**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 17 de julho de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz  
Orientador

---

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin  
Membro Titular

---

Prof. Dr. Roger Navarro Verastegui  
Membro Titular

---

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima  
Responsável pelos Trabalhos  
de Conclusão de Curso

---

Prof. Dr. Laercio Javarez Junior  
Coordenador do Curso de  
Engenharia Mecânica

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus por ter me dado saúde e persistência durante toda essa etapa importante da minha vida.

Agradeço à toda minha família, meus pais Suzana e Rodolfo, meu irmão Thuã e à minha namorada Morgana por terem sempre me apoiado e também por cederem parte do nosso tempo juntos, me possibilitando desenvolver este trabalho.

Agradeço ao meu orientador Anderson Pukasiewicz por ter me acompanhado por toda esta jornada, dedicando seu tempo, conhecimento do assunto e estrutura para a realização desta pesquisa.

Agradeço aos meus amigos e colegas de ensino, pela força e sugestões dadas durante o desenvolvimento do texto.

Agradeço a UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa, por me disponibilizar espaço e equipamentos necessários.

Agradeço a LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - por disponibilizar materiais e equipamentos desta pesquisa. Agradecendo em especial ao Gustavo Bavaresco por me auxiliar, e muito, na realização do Shot Peening e tensão residual.

E por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram na realização desta pesquisa.

## EPÍGRAFE

“Investir em conhecimentos rende sempre melhores juros.”

Benjamin Franklin

## RESUMO

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

O presente trabalho tem como base o estudo do tratamento de *Shot Peening*, tratamento este que refere-se a um jateamento onde é propelido pequenas granalhas sobre a superfície da peça, visando alterar suas propriedades mecânicas. Deste modo, o objetivo geral da pesquisa busca avaliar a influência da pressão, ângulo e distância de *Shot Peening* no comportamento da tensão residual, rugosidade, microdureza superficial e perda de massa em chapa de aço inoxidável martensítico ASTM A743-CA6NM. Foram variados dois níveis de pressão, distância e ângulo de incidência das granalhas durante o jateamento. A respeito da microdureza, notou-se um acréscimo significativo na dureza superficial após o *Shot Peening*, onde o parâmetro variável mais influente foi o ângulo de ataque das granalhas. Para rugosidade, o fator que apresentou maior significância na rugosidade média (Ra) foi a pressão do jateamento. Enquanto que na análise de perda de massa, constatou-se que não houve variação significativa em nenhum dos corpos de prova. Em relação ao estudo do comportamento da tensão residual, observou-se que independente dos parâmetros de *Shot Peening* aplicados, ocorreu um decréscimo na intensidade da tensão de Von Mises à medida que se aumentou a profundidade no ensaio de furo cego. Outra conclusão pertinente, foi que a distância do jateamento a que menos influenciou na tensão de Von Mises, enquanto que a pressão e ângulo de ataque afetaram na mesma intensidade.

**Palavras-chave: Parâmetros de *Shot Peening*. *Shot Peening*. Aço inox CA6NM.**

## ABSTRACT

BERTUOL, Kauê. **Analysis of the influence of Shot Peening parameters on surface hardness, roughness and residual stress in steel ASTM A743-CA6NM.** 2014. 77 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

The present work is based on the study of the treatment of shot peening, in this treatment is propelled small granules on the surface of the steel, in order to modify their mechanical properties. Thus, the main objective of this research is to evaluate the influence of pressure, angle and distance of shot peening on the behavior of residual stress, roughness, hardness and mass loss in martensitic stainless steel sheet ASTM A743-CA6NM. Two pressure levels, distance and angle of incidence of the granules were varied during the treatment. Regarding hardness, noticed a significant increase in surface hardness after shot peening, where the most influential variable parameter was the angle of attack of the granules. For roughness, the factor that had the greatest significance in the mean roughness (Ra) was the pressure. While the analysis of mass loss, was not found significant changes in any of the specimens. Regarding the study of the behavior of the residual stress, was realized that regardless of the parameters of shot peening applied, occurred a decrease in the intensity of Von Mises stress while increased the depth of the test hole drilling. Another relevant conclusion was that the treatment distance from the least influence on the Von Mises stress, while the pressure and angle of attack affected to the same degree.

**Keywords: Shot Peening parameters. Shot Peening. CA6NM stainless steel.**

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Diagrama de fases ferro-cromo-níquel para razão cromo/níquel de 3:1...   | 21 |
| Figura 2 – Fase do Aço CA6NM em diagrama de Schaeffler.....   | 21 |
| Figura 3 - Propriedades Físicas e Mecânicas do aço inox CA6NM.....  | 22 |
| Figura 4 - Estado de tensão residual em uma peça soldada. ....  | 27 |
| Figura 5 - Exemplo da formação de fissura a quente em um perfil “I” pelo processo de fundição.....  | 28 |
| Figura 6 - Formação e distribuição da tensão residual em uma peça laminada. ....  | 29 |
| Figura 7 - Exemplo da aplicação do extensômetro roseta na medição da deformação do material. (unidades em mm).....                            | 34 |
| Figura 8 - Região de deformação plástica e região de compressão em uma peça sujeita ao <i>Shot Peening</i> . ....                             | 36 |
| Figura 9 – Foto da superfície de uma das amostras após tratamento, demonstrando a superfície jateada (direita) e não jateada (esquerda). .... | 47 |
| Figura 10 - Gráfico que apresenta a variação da dureza em função dos diferentes níveis de ângulo de ataque ensaiados. ....                    | 53 |
| Figura 11 - Gráfico que apresenta a variação da dureza em função dos diferentes níveis de pressão do jateamento.....                          | 53 |
| Figura 12 - Gráfico que apresenta a variação da dureza em função dos diferentes níveis de distância do jateamento. ....                       | 54 |
| Figura 13 - Gráfico que apresenta a índice de significância de cada variável no resultado final de dureza. ....                               | 54 |
| Figura 14 – Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 1 (a) e após jateamento (b). .... | 56 |
| Figura 15 - Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 2 (a) e após jateamento (b). .... | 56 |
| Figura 16 - Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 3 (a) e após jateamento (b). .... | 56 |
| Figura 17 - Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 4 (a) e após jateamento (b). .... | 57 |
| Figura 18 - Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 5 (a) e após jateamento (b). .... | 57 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 19 - Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 6 (a) e após jateamento (b). ..... | 57 |
| Figura 20 - Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 7 (a) e após jateamento (b). ..... | 58 |
| Figura 21 - Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 8 (a) e após jateamento (b). ..... | 58 |
| Figura 22 - Gráfico que apresenta a variação da rugosidade média Ra em função dos diferentes níveis de ângulo de ataque ensaiados. ....        | 61 |
| Figura 23 - Gráfico que apresenta a variação da rugosidade média Ra em função dos diferentes níveis de pressão do jateamento. ....             | 61 |
| Figura 24 - Gráfico que apresenta a variação da rugosidade média Ra em função dos diferentes níveis de distância do jateamento.....            | 62 |
| Figura 25 - Gráfico que apresenta a índice de significância de cada variável na rugosidade média Ra. ....                                      | 62 |
| Figura 26 - Gráfico que apresenta a variação da rugosidade média Rz em função dos diferentes níveis de ângulo de ataque ensaiados. ....        | 63 |
| Figura 27 - Gráfico que apresenta a variação da rugosidade média Rz em função dos diferentes níveis de pressão do jateamento. ....             | 64 |
| Figura 28 - Gráfico que apresenta a variação da rugosidade média Rz em função dos diferentes níveis de distância do jateamento.....            | 64 |
| Figura 29 - Gráfico que apresenta o comportamento das tensões em função da profundidade do furo na superfície não jateada da amostra 7. ....   | 66 |
| Figura 30 - Gráfico que apresenta o comportamento das tensões em função da profundidade do furo na superfície jateada da amostra 3. ....       | 67 |
| Figura 31 - Gráfico que apresenta o comportamento das tensões em função da profundidade do furo na superfície jateada da amostra 5. ....       | 67 |
| Figura 32 - Gráfico que apresenta o comportamento das tensões em função da profundidade do furo na superfície jateada da amostra 7. ....       | 68 |
| Figura 33 - Gráfico que apresenta o comportamento das tensões em função da profundidade do furo na superfície jateada da amostra 8. ....       | 68 |
| Figura 34 - Gráfico que apresenta a influência de cada variável na tensão residual.  | 69 |
| Figura 35 - Gráfico que apresenta a influência do ângulo de ataque na tensão de Von Mises. ....  | 70 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 36 - Gráfico que apresenta a influência da pressão de jateamento na tensão de Von Mises.....   | 70 |
| Figura 37 - Gráfico que apresenta a influência da distância do jateamento na tensão de Von Mises..... | 71 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Composição química do Aço CA6NM. ....   | 19 |
| Tabela 2 – Granulometrias mais usuais. ....  | 41 |
| Tabela 3 - Variáveis do tratamento de Shot Peening com seus respectivos valores.<br>.....  | 46 |
| Tabela 4 - Combinações dos valores de cada variável na realização do Shot Peening.<br>.....  | 47 |
| Tabela 5 - Massa de cada corpo de prova (gramas) antes do jateamento. ....   | 49 |
| Tabela 6 - Massa de cada corpo de prova após o jateamento (gramas). ....   | 49 |
| Tabela 7 - Média e amplitude nas medições da massa dos corpos antes e após o<br>jateamento (gramas). ....                              | 50 |
| Tabela 8 - Dureza superficial das superfícies jateadas e não jateadas dos corpos de<br>prova com seus respectivos desvios padrão. .... | 51 |
| Tabela 9 - Acréscimo de dureza superficial dos corpos de prova quando submetido ao<br>tratamento de <i>Shot Peening</i> . ....         | 52 |
| Tabela 10 - Rugosidades Ra e Rz das superfícies jateadas e não jateadas dos corpos<br>de prova. ....                                   | 59 |
| Tabela 11 - Aumento da rugosidade Ra dos corpos de prova quando submetido ao<br><i>Shot Peening</i> . ....                             | 60 |
| Tabela 12 - Aumento da rugosidade Rz dos corpos de prova quando submetido ao<br><i>Shot Peening</i> . ....                             | 60 |

## LISTA DE SIGLAS

|                |   |
|----------------|---|
| ACI            | Alloy Casting Institute                             |
| AISI           | American Iron and Steel Institute                   |
| ASTM           | American Society for Testing and Materials          |
| CCC            | Cúbica de corpo centrado                            |
| CFC            | Cúbica de face centrada                             |
| HRC            | Escala de Dureza Rockwell C                         |
| M <sub>f</sub> | Temperatura final da transformação martensítica     |
| M <sub>s</sub> | Temperatura de início da transformação martensítica |
| R <sub>a</sub> | Rugosidade média                                    |
| R <sub>z</sub> | Rugosidade de profundidade média                    |
| TCC            | Tetragonal de corpo centrado                        |
| ZTA            | Zona termicamente afetada                           |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|          |                |
|----------|----------------|
| $\gamma$ | Fase austenita |
| $\delta$ | Fase ferrita   |
| C        | Carbono        |
| Cr       | Cromo          |
| Mn       | Manganês       |
| Ni       | Níquel         |

## SUMÁRIO

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1       | INTRODUÇÃO.....  | 13 |
| 1.1     | JUSTIFICATIVA .....  | 14 |
| 1.2     | OBJETIVOS .....  | 15 |
| 1.2.1   | Objetivo Geral.....  | 15 |
| 1.2.2   | Objetivo específico .....  | 15 |
| 2       | REFERENCIAL TEÓRICO .....  | 16 |
| 2.1     | AÇO INOX.....  | 16 |
| 2.1.1   | Histórico e definição .....  | 16 |
| 2.1.2   | Propriedades e classificação .....                                       | 17 |
| 2.2     | AÇO ASTM A743 DE GRAU CA6NM .....  | 19 |
| 2.2.1   | Histórico e definição .....  | 19 |
| 2.2.2   | Propriedades e aplicação do aço CA6NM .....                              | 22 |
| 2.3     | TENSÃO RESIDUAL.....   | 23 |
| 2.3.1   | Definição e origem.....  | 23 |
| 2.3.2   | Classificação das tensões residuais .....                                | 24 |
| 2.3.3   | Geração e alívio de tensões .....  | 25 |
| 2.3.4   | Geração de tensões residuais nos processos de fabricação.....            | 26 |
| 2.3.4.1 | Tensões residuais geradas na soldagem.....                               | 26 |
| 2.3.4.2 | Tensões residuais geradas na fundição.....                               | 27 |
| 2.3.4.3 | Tensões residuais geradas na usinagem.....                               | 28 |
| 2.3.4.4 | Tensões residuais geradas na conformação mecânica .....                  | 29 |
| 2.3.4.5 | Tensões residuais geradas nos tratamentos térmicos e termo químicos..... | 30 |
| 2.3.4.6 | Tensões residuais geradas após <i>Shot Peening</i> .....                 | 31 |
| 2.4     | TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL.....                              | 32 |
| 2.4.1   | Técnica do Furo Cego .....   | 33 |
| 2.5     | <i>SHOT PEENING</i> .....  | 36 |
| 2.5.1   | Conceito .....   | 36 |
| 2.5.2   | Vantagens do tratamento .....  | 37 |
| 2.5.3   | Variáveis operacionais de <i>Shot Peening</i> .....                      | 38 |
| 2.5.3.1 | Velocidade da granalha .....   | 38 |
| 2.5.3.2 | Pressão de jateamento .....  | 38 |
| 2.5.3.3 | Ângulo de ataque .....   | 39 |
| 2.5.3.4 | Distância de jateamento.....   | 39 |
| 2.5.3.5 | Tempo de exposição ao tratamento.....                                    | 40 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2.5.3.6 | Tipos de granalha .....   | 40 |
| 3       | METODOLOGIA .....   | 44 |
| 3.1     | MATERIAL, DIMENSÕES E QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA .....                             | 44 |
| 3.2     | PREPARAÇÃO PRÉVIA AO TRATAMENTO .....   | 45 |
| 3.3     | TRATAMENTO DE <i>SHOT PEENING</i> .....   | 45 |
| 3.4     | CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....  | 48 |
| 4       | RESULTADO E DISCUSSÕES .....  | 49 |
| 4.1     | ANÁLISE DA PERDA DE MASSA NOS CORPOS DE PROVA.....                                    | 49 |
| 4.2     | ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA MICRODUREZA SUPERFICIAL APÓS <i>SHOT PEENING</i> .....         | 51 |
| 4.3     | ANÁLISE DO PERFIL DE RUGOSIDADE RESULTANTE DO TRATAMENTO DE <i>SHOT PEENING</i> ..... | 55 |
| 4.4     | ANÁLISE DA TENSÃO RESIDUAL RESULTANTE DO TRATAMENTO DE <i>SHOT PEENING</i> .....      | 65 |
| 5       | CONSIDERAÇÕES FINAIS.....   | 72 |
| 6       | REFERÊNCIAS .....   | 73 |

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são aços compostos basicamente de ferro carbono com adição de cromo e níquel principalmente, e em alguns aços até mesmo molibdênio com uma porcentagem significativa. Devido à presença destes metais em sua composição, os aços inoxidáveis apresentam boa resistência a corrosão, boa resistência mecânica e resistência à temperatura. Os mesmos podem ser classificados de acordo com a fase predominante a temperatura ambiente, variando entre: austeníticos, ferríticos, martensíticos, duplex e endurecíveis por precipitação.

Na Suíça foi desenvolvido um aço classificado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) como um aço inoxidável macio, o aço martensítico grau CA6NM, o mesmo buscou suprir o mercado onde se requisita resistência a erosão por cavitação engajado com boa resistência mecânica e à corrosão. Devido a estas características, existem diversas aplicações para este aço, por exemplo, a fabricação de turbinas do tipo Francis e Pelton, uma vez que, além de ótimas propriedades mecânicas apresenta boa soldabilidade.

É recorrente em diversos processos de fabricação a peça apresentar um estado de tensão residual em seu corpo, tensões estas que permanecem na peça mesmo quando todas as cargas externas são removidas. As tensões residuais são oriundas de processos onde houve uma deformação não homogênea no corpo devido a efeitos térmicos ou mecânicos, podendo ser tensões trativas ou tensões compressivas. Tensões residuais trativas são muitas vezes prejudiciais aos componentes, enquanto que tensões residuais compressivas em diversos casos estendem a vida dos componentes.

Um dos meios de se controlar tensões residuais trativas é através de tratamento superficial, mais especificamente neste trabalho será estudado o jateamento por *Shot Peening*. O *Shot Peening* trata-se de um processo de tratamento superficial a frio que basicamente propõe pequenas esferas contra a superfície da peça, utilizando geralmente granalhas de aço esféricas. Estas granalhas atuam deformando plasticamente a superfície das peças a serem tratadas, e como foi dito anteriormente, estas deformações podem gerar tensões residuais.

Entretanto, é possível perceber que além de propriedades mecânicas como resistência última a tração, resistência ao escoamento, dureza, tenacidade, entre



outras, para se determinar mais a fundo boas aplicações e vantagens do CA6NM é necessário uma análise complementar de aspectos microestruturais e uma análise do estado de tensão residual presente após tratamento de *Shot Peening*.

Existem diversas técnicas de se mensurar tensões residuais, sendo elas divididas entre ensaios destrutivos, semi-destrutivos e não-destrutivos. Entretanto, é dado ênfase neste estudo à técnica de furo-cego (semi-destrutivo), baseado na sua facilidade de aplicação e custo. A técnica de furo-cego constitui-se basicamente em medir a tensão residual através de um furo na superfície do componente e com um extensômetro verificar a mudança nas deformações.

Portanto, de acordo com tudo o que foi citado se busca saber, qual é o comportamento do estado de tensão residual, perfil de rugosidade, microdureza superficial e perda de massa em uma chapa de aço CA6NM quando submetida ao jateamento por *Shot Peening*.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Estudar na prática o comportamento da tensão residual em função de três parâmetros no tratamento de *Shot Peening*: pressão, distância e ângulo de ataque das granalhas. Uma vez que, variando estes parâmetros é possível obter diferentes resultados que interferem diretamente nas propriedades mecânicas finais do material.

Visto que o aço CA6NM é empregado na maioria dos casos em peças onde se necessitam elevadas propriedades mecânicas, sabendo também que normalmente executa-se processos de reparo em campo sem a possibilidade de tratamento térmico. Deste modo, o *Shot Peening* é uma boa alternativa quando se visa melhorar tais propriedades por meio do controle da tensão residual, e assim o presente trabalho se justifica pelo fato de avaliar o comportamento do CA6NM quando submetido ao tratamento.

Do ponto de vista acadêmico, a importância deste estudo é dada pela ausência de bibliografias que abordem a proposta da avaliação de *Shot Peening* exclusivamente em aços CA6NM.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência de parâmetros de *Shot Peening* na dureza superficial, rugosidade, perda de massa e tensão residual em aço ASTM A743-CA6NM.

### 1.2.2 Objetivo específico

- Realizar um estudo da influência da pressão, distância e ângulo no tratamento de *Shot Peening*.
- Analisar o perfil de rugosidade, dureza superficial, perda de massa, bem como as tensões residuais em chapas de aço sujeitas ao tratamento.
- Comparar o comportamento do estado de tensão residual em chapas submetidas e não submetidas ao *Shot Peening*.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 AÇO INOX

#### 2.1.1 Histórico e definição

Segundo Gracioso (2003), o primeiro aço inoxidável surgiu por volta do ano de 1910, com créditos a três países distintos, Estados Unidos, Inglaterra e Alemanha.

A partir de 1910 o aço inox vem conquistando cada vez mais espaço no mercado industrial devido a suas elevadas propriedades mecânicas. Nos últimos anos o consumo deste material teve um crescimento expressivo de 6,5% ao ano, dados da Núcleo Inox (2001) informam que no ano 2000 o consumo era de 193.851 toneladas, enquanto que em 2008 o consumo total de aço inoxidável no Brasil chegou a 367.500 toneladas, crescimento este considerado significativo quando levado em consideração um intervalo de tempo de apenas 8 anos.

O aço inoxidável refere-se ao conjunto de aços que apresentam uma elevada resistência a corrosão, aços estes que contém no mínimo 10,5% de cromo em sua solução. Outros elementos como níquel, molibdênio, cobre, nitrogênio, alumínio, titânio, silício e nióbio podem ser acrescentados na solução com o intuito de melhorar as propriedades exigidas para uma aplicação específica. Convém lembrar que o aço inox é a base de ferro e apresenta porcentagem de carbono variando geralmente entre 0,03% e 1%. (ALLENSTEIN,2007)

Segundo Barbosa et al (2003) o cromo trata-se do principal elemento de um aço inoxidável, e é devido a presença de cromo no material que o aço inox apresenta uma elevada resistência a corrosão. De fato, o cromo forma uma camada aderente e muito fina de óxido de cromo ( $Cr_2O_3$ ) na superfície do material que por fim, protege o aço dos efeitos corrosivos.

De acordo com Gracioso (2003) existem basicamente dois fatores determinantes que interferem na ação passivante do cromo e de outros elementos de liga em um aço inox, sendo o primeiro relacionado as condições de solicitação externa

sujeitas, o segundo item é referente as próprias características do elemento passivante, tais como a distribuição e quantidade de elementos presentes no aço.

Vale lembrar que diante de certas condições de serviço, como em meios agressivos e temperaturas elevadas, os aços inoxidáveis podem sofrer corrosão mesmo com o revestimento do filme de cromo, pois o mesmo pode se dissolver ou se romper pontualmente. (BARBOSA et al, 2003)

### 2.1.2 Propriedades e classificação

Os aços inoxidáveis apresentam, além de alta resistência a corrosão algumas propriedades como, resistência à temperatura, boa soldabilidade, boa conformabilidade, tenacidade, alta resistência mecânica quando comparado ao alumínio, baixa condutividade elétrica e térmica e boa resistência a erosão por cavitação. Níquel e molibdênio são geralmente adicionados a liga de aço inox a fim de tornar o aço ainda mais resistente a corrosão. No entanto, estas propriedades variam em função da composição e da microestrutura presente no aço, de modo simplificado os mesmos podem ser classificados de acordo com a fase predominante a temperatura ambiente, variando entre: austeníticos, ferríticos, martensíticos, duplex e endurecíveis por precipitação. (NÚCLEO INOX, 2001)

Os aços inoxidáveis mais comuns são os austeníticos, os mesmos apresentam estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), e do mesmo modo que os ferríticos, não permite o endurecimento por tratamento térmico. O aço inox austenítico mais comum é o aço AISI (*American Iron and Steel Institute*) 304, que apresenta em sua composição uma porcentagem de 17% de cromo e 8% de níquel. Alguns exemplos são, tipo AISI 304, 304L, 316, 310, entre outros com 16% a 26% de cromo. (OLIVEIRA, 2004)

Os aços inoxidáveis do tipo ferrítico tem estrutura CCC, cúbica de corpo centrado, e geralmente apresentam um teor de 11 a 17% de cromo na composição do aço. Tem baixo teor de carbono que resulta em baixa resistência mecânica quando comparado aos outros tipos de aços inoxidáveis. Os aços duplex apresentam composições químicas médias de cromo de 22% e tem boa soldabilidade e

conformabilidade. Enquanto que para os aços endurecíveis por precipitação é possível atingir resistência a tração de até 1700 MPa. (NÚCLEO INOX, 2001)

Apesar de já citadas algumas características das famílias de aços inoxidáveis existentes, o mais importante para este trabalho trata-se do aço inoxidável do tipo martensítico. O aço inox martensítico, segundo Núcleo Inox (2001), costuma apresentar propriedades semelhantes aos dos aços carbono e aços de baixa liga.

O aço inox martensítico contém um teor médio de cromo em sua composição variando entre 11% e 13%, teores de carbono entre 0,01% e 0,1%, teores de níquel entre 2% e 6%, e molibdênio próximo a 2%. (MARIANO et al, 2007)

Segundo dados obtidos pela Infomet (2013), os aços inoxidáveis martensíticos ainda podem ser divididos em três classes, sendo elas, baixo, médio e alto carbono, de modo respectivo são também conhecidos em função da sua aplicação, como exemplo, do tipo, turbina, cutelaria, e resistente ao desgaste.

Devido a sua composição esses aços apresentam uma boa combinação de diferentes propriedades mecânicas, tais como, boa resistência mecânica, moderada resistência a corrosão e boas propriedades para fadiga e fluência. (BARBOSA et al, 2003)

Através de um tratamento térmico do tipo temperado e revenido, obtém-se a estrutura martensítica. A combinação da sua composição com o tratamento térmico submetido, o aço inox martensítico permite obter também o incremento de propriedades como tenacidade e soldabilidade. (NÚCLEO INOX, 2001)

Os aços inox do tipo martensítico mais comuns no ramo industrial são, AISI 410, 420, 414, 431, 416, 440 por apresentarem uma boa combinação de propriedades mecânicas. (CHIAVERINI, 1990). Convém destacar que o aço ASTM (*American Society for Testing and Materials*) A743 grau CA6NM não está dentro da lista de aços mais comuns, no entanto apresenta uma boa combinação de diferentes propriedades, devido a isto será abordado adiante um tópico exclusivo a este tipo de aço com maiores detalhes.

## 2.2 AÇO ASTM A743 DE GRAU CA6NM

### 2.2.1 Histórico e definição

Na Suíça foi desenvolvido na década de 60 um aço classificado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) como um aço inoxidável macio, o aço martensítico ASTM A743 de grau CA6NM, o mesmo foi desenvolvido visando suprir o mercado onde se requisita resistência a erosão por cavitação engajado com boa resistência mecânica e à corrosão. (ALLENSTEIN, 2007)

O aço ASTM A743 de grau CA6NM refere-se a um aço inoxidável martensítico fundido que conforme a *Alloy Casting Institute* (ACI) é classificado de acordo com sua utilização e composição química. A composição nominal do CA6NM é apresentado na Tabela 1 a seguir.

**Tabela 1 - Composição química do Aço CA6NM.**

| Elemento químico | C (máx) | Mn (máx) | Si (máx) | Cr         | Ni      | Mo      | P (máx) | S (máx) |
|------------------|---------|----------|----------|------------|---------|---------|---------|---------|
| Percentual       | 0,06    | 1,00     | 1,00     | 11,5- 14,0 | 3,4-4,5 | 0,4-1,0 | 0,04    | 0,03    |

**Fonte: Norma ASTM A743-743M**

A sigla CA6NM pode ser entendida do seguinte modo, a letra (C) indica a resistência do aço a meio corrosivo. A letra (A) refere-se ao teor de níquel e cromo presente, podendo variar de A a Z em função do aumento do teor de níquel. O número que antecede as duas últimas letras indica o máximo teor de carbono no material, neste caso o número (6) representa 0,06% de carbono em sua composição. As letras (N) e (M) remanescentes correspondem respectivamente a primeira letra dos elementos de liga presentes no aço, sendo eles, níquel e molibdênio. (NASCIMENTO, 2012)

Além de ser muito importante o conhecimento da composição química do material a ser trabalhado, também é importante conhecer um pouco sobre a microestrutura e estrutura cristalina presente no aço.

Tendo em vista que a transformação martensítica, conforme Wink (2011), se inicia a uma temperatura chamada como temperatura de início da transformação martensítica, Ms, e que o fim desta transformação se dá a uma temperatura final da transformação martensítica Mf. A estrutura cristalina é transformada normalmente de cúbica de face centrada (CFC) para tetragonal centrado (TC) ao seu término, sendo assim, o aço apresenta estrutura TC predominante a temperatura ambiente.

Folkhard et al (1988) apresentou duas equações, Equação 1 e 2, onde se é possível estimar as temperaturas Ms e Mf para aços inoxidáveis martensíticos macios. É importante notar que a primeira equação está em função dos elementos de liga Ni, Cr, C e Mn.

$$Ms = 492 - (12 \times \%C) - (65,5 \times \%Mn) - (10 \times \%Cr) - (29 \times \%Ni) \quad (1)$$

$$Ms - Mf = 150 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2)$$

É possível notar que a Equação 1 é fortemente influenciada pelo teor de carbono, manganês e níquel na redução da temperatura Ms. Por meio da segunda equação, observa-se que o intervalo entre Ms e Mf não excede 150 °C. (GOUVEIA, 2008)

Visto que o CA6NM trata-se de um aço utilizado quando temperado e posteriormente revenido, uma boa alternativa de se melhorar o desempenho das propriedades mecânicas, para uma mesma composição química, é através da otimização dos tratamentos térmicos. (GRACIOSO, 2003) A presença de níquel e cromo neste aço segundo Straube (1988) proporciona uma alta temperabilidade, o que permite que até mesmo seções de 0,5 metro de raio formem uma estrutura martensítica em seu núcleo através de resfriamento ao ar.

Na Figura 1, a seguir, pode-se observar as fases presentes em função da temperatura e composição do aço.

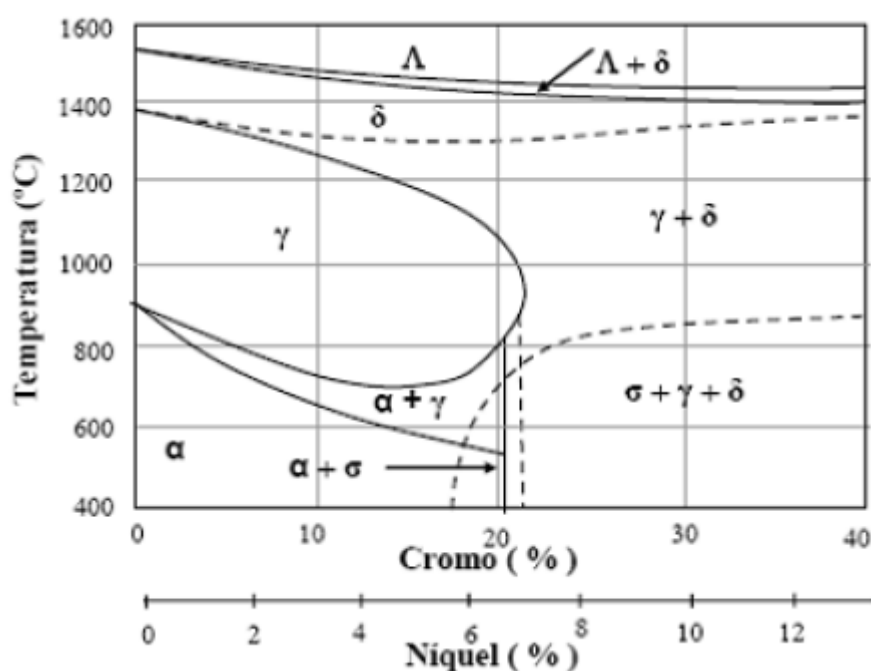


Figura 1 - Diagrama de fases ferro-cromo-níquel para razão cromo/níquel de 3:1.  
Fonte: Hernandez (2009)

Segundo o diagrama de Schaeffler apresentado na Figura 2 é possível relacionar as fases presentes pós solidificação.

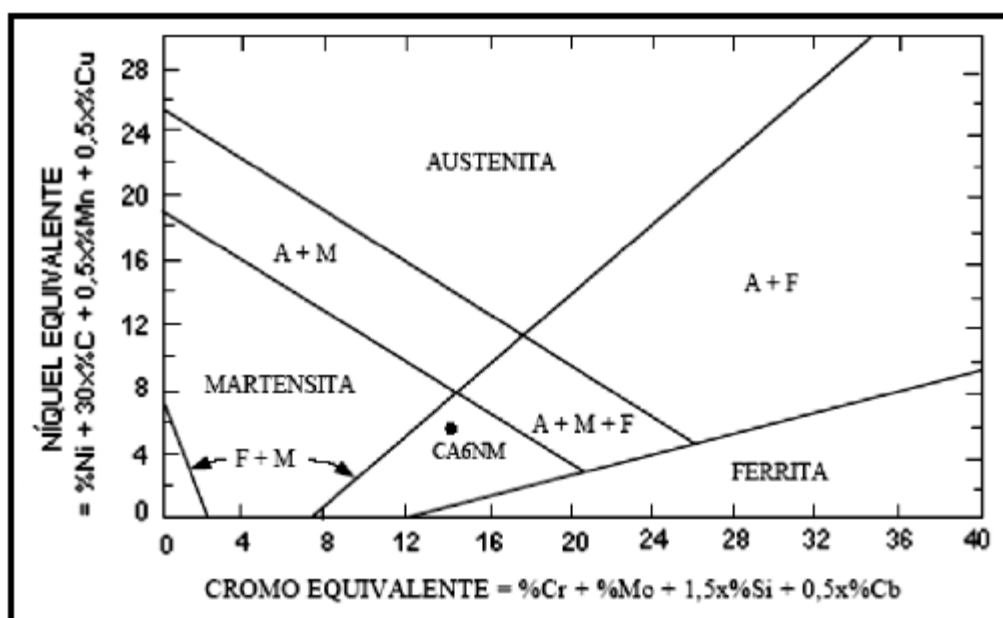


Figura 2 – Fase do Aço CA6NM em diagrama de Schaeffler.  
Fonte: Padilha e Guedes (1994)

Conforme o diagrama, nota-se que o aço CA6NM está localizado no campo martensita + ferrita, entretanto, está próximo a linha 100% martensita. Segundo Thibault et al (2009), o aço CA6NM normalmente contém, quando revenido, ferrita ( $\delta$ ),



normalmente até 2% e austenita ( $\gamma$ ) em proporções de 5% a 30% do volume, respectivamente, e o restante martensita.

## 2.2.2 Propriedades e aplicação do aço CA6NM

Após conhecer um pouco sobre a estrutura do material em si, convém destacar algumas das propriedades físicas e mecânicas do aço. Sendo assim, a seguir é apresentado na Figura 3 algumas das propriedades físicas e mecânicas do aço A743 grau CA6NM.

| <b>AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO ASTM A743 CA6NM</b>   |                 |                    |
|--|-----------------|--------------------|
| <b>Propriedades Físicas</b>  |                 |                    |
| Módulo de Elasticidade (GPa)   | 199,9           |                    |
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> )   | 7,7             |                    |
| Resistividade Elétrica ( $\mu\Omega\cdot m$ a 21 °C)                                       | 0,78            |                    |
| Ponto de Fusão aproximado (°C)   | 1510            |                    |
| Permeabilidade Magnética   | Ferromagnético  |                    |
| Condutividade Térmica<br>[BTU/(ft.h.°F)]   | A 100 °C        | 14,5               |
|  | A 538 °C        | 16,7               |
| Coeficiente linear média de expansão térmica<br>( $\mu\text{in/in}\cdot^{\circ}\text{F}$ ) | 21 a 100 °C     | 6,0                |
|  | 21 a 528 °C     | 7,0                |
| <b>Propriedades Mecânicas à Temperatura Ambiente</b>                                       |                 |                    |
| Propriedade  | Valores Típicos | Mínimos Requeridos |
| Limite de Resistência à Tração (MPa)   | 830             | 755                |
| Limite de Escoamento (0,2%, MPa)   | 690             | 550                |
| Limite de Resistência a Fadiga (MPa) <sup>(5)</sup>  | 360             | 348                |
| Alongamento, em 2in (%)  | 24              | 15                 |
| Redução de área (%)  | 60              | 35                 |
| Dureza Brinell (HB)  | 268             | 285 (máximo)       |

Figura 3 - Propriedades Físicas e Mecânicas do aço inox CA6NM.  
Fonte: Gooch (1995)

Devido a estas características, existem diversas aplicações para este aço, por exemplo, segundo Souza (2012) o aço CA6NM é muito utilizado em corpos de

válvulas, discos de compressores, indústrias petroquímicas e diversos componentes estruturais de aviões e motores.

No entanto, atualmente também vem sendo praticado a fabricação de turbinas hidráulicas do tipo Francis e Pelton com a utilização exclusiva do aço CA6NM, uma vez que além de ótimas propriedades mecânicas apresenta boa soldabilidade e fácil fabricação. (ALLENSTEIN,2007) É importante ressaltar que para tal aplicação necessita-se de um material com elevada tenacidade e o CA6NM é uma boa escolha para atender a esse requisito. (PUKASIEWICZ, 2002)

## 2.3 TENSÃO RESIDUAL

### 2.3.1 Definição e origem

As tensões residuais são definidas como as tensões que permanecem no material mesmo após o término do esforço externo que lhe deu origem. (BARBOSA et al, 2003)

Também conhecidas como tensões internas, as tensões residuais são oriundas de processos onde houve uma deformação não homogênea no corpo devido a efeitos térmicos ou mecânicos. Sabendo disto, é notável que em diversos processos de fabricação como soldagem, fundição, usinagem, laminação, forjamento e dobramento, ser recorrente a peça apresentar um estado de tensão residual em seu corpo. (COFIÑO, 2010)

Apesar deste estado de tensão ser um estado auto equilibrante é importante sempre levá-lo em consideração, pois, as tensões residuais variam entre tensões trativas e tensões compressivas, ou seja, quando acrescido de tensões externas podem apresentar mudança de comportamento, somando ou minimizando o carregamento em função do sentido da carga aplicada. (SOARES, 2003)

Para Barbosa et al (2003), os esforços externos e as tensões residuais sempre se somam linearmente dentro do regime elástico (deve-se levar em conta o sentido). Portanto, o efeito das tensões residuais, de acordo com Ribeiro et al (2003) pode ser prejudicial ou benéfico ao material, uma vez que o mesmo está diretamente ligado ao sinal, magnitude e distribuição destas tensões.

As tensões trativas são muitas vezes prejudiciais aos componentes, enquanto que tensões residuais compressivas em diversos casos estendem a vida dos componentes. (PUKASIEWICZ, 2002)

Ribeiro et al (2003) também afirma que existem muitos casos onde estas tensões foram o fator chave para a ocorrência de falhas estruturais em peças mecânicas. Sendo assim, controlar estas tensões é importante para que se possa garantir um bom desempenho e qualidade do componente.

Segundo Modenesi (2008), estas tensões influenciam fortemente em problemas como o surgimento de trincas, falta de estabilidade dimensional e fratura frágil.

### 2.3.2 Classificação das tensões residuais

De acordo com Soares (2003), é possível classificar as tensões residuais em três tipos, todas em função da sua área de abrangência, são elas: tensões residuais macroscópicas, microestruturais e micro localizadas.

As tensões residuais do tipo I (macroscópicas) refere-se a média volumétrica das tensões que agem sobre vários grãos do material. Assim sendo, a mudança ou alívio destas tensões podem causar alterações macroscópicas na forma do corpo. (SOARES, 2003)

As tensões residuais do tipo II (microestruturais) são muito inferiores a do tipo I, uma vez que, tensões microestruturais trata-se das tensões que cobrem a extensão de apenas um grão, ou parte dele. (RIBEIRO et al, 2003)

Pedrosa (2007), complementa que tensões do tipo II desenvolvem-se durante a deformação elastoplástica, e podem ocorrer entre diferentes fases ou entre partículas precipitadas, como inclusões.

Tensões micro localizados, tipo III, são ainda menores pois são geradas a nível atômico. As mesmas ocorrem em materiais com defeitos na rede cristalina, como por exemplo em vazios, impurezas, falhas de empilhamento, entre outros. (SOARES, 2003)

É importante ressaltar que neste trabalho as tensões do tipo I terão maior enfoque, uma vez que, tensões macroscópicas são mais significativas, e assim, influem mais no desempenho e na integridade estrutural dos metais.

### 2.3.3 Geração e alívio de tensões

Conforme Pedrosa (2007), as tensões residuais podem ser geradas por deformação plástica, processos de fabricação e tratamento térmico.

*Shot Peening*, laminação, extrusão e forjamento são alguns dos diversos exemplos de geração de tensão residual através de deformação plástica. Soldagem, fundição e usinagem são ótimos exemplos de processos de manufatura que geram tensão residual em suas peças. Outro grande exemplo de geradores de tensão residual são os tratamentos térmicos, tais como, têmpera, plasma e nitretação. (PEDROSA, 2007)

Do mesmo modo que podemos interpretar que os processos são geradores de tensão, podemos também interpretar como processos de alívio de tensão, pois, por exemplo, quando se pretende manter um estado de tensão compressiva em um material que apresenta um estado de tensão resultante trativa, ou vice versa, um modo de se modificar isto é por meio de tratamentos superficiais.

De modo mais detalhado, será explicado a formação de tensão residual nos principais e mais comuns processos de manufatura da atualidade. São eles: soldagem, fundição, usinagem e conformação mecânica. E no tocante a tratamentos superficiais, podemos destacar a têmpera superficial, carbonetação, nitretação e *Shot Peening*.

## 2.3.4 Geração de tensões residuais nos processos de fabricação

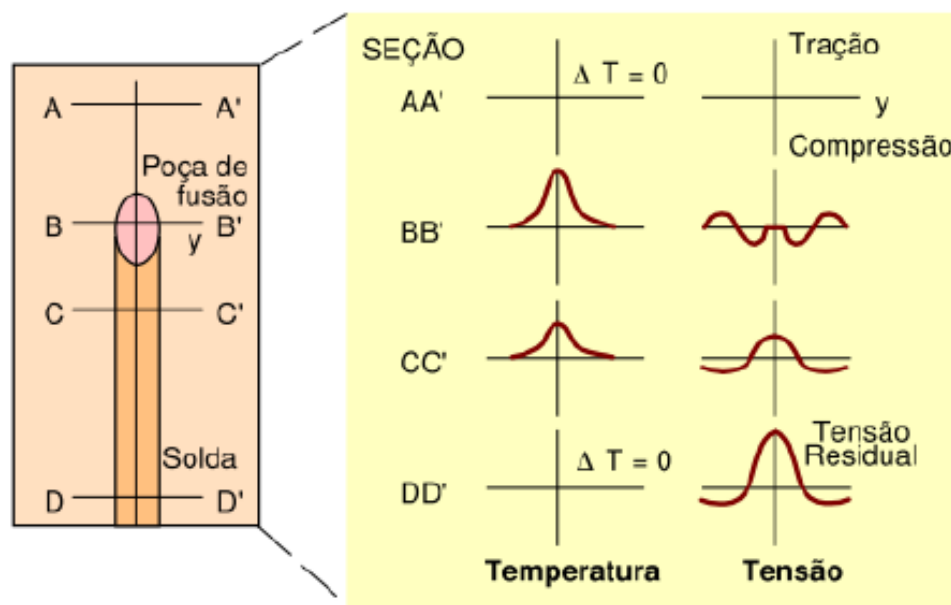
### 2.3.4.1 Tensões residuais geradas na soldagem

Sabe-se que no processo de soldagem o material fundido e suas proximidades são expostos a ciclos térmicos, ciclos de deformação, e a severas transformações metalúrgicas. Devido a estas significativas mudanças, a peça ou componente acabam sofrendo algumas heterogeneidades de caráter metalúrgico, micro estrutural e mecânico. (COFIÑO, 2010)

Se um material sem nenhuma restrição dimensional para sua contração e dilatação for aquecido e resfriado de maneira homogênea, este material não deverá apresentar nenhum estado de tensão residual. No entanto, se a variação de temperatura não for uniforme ao longo da peça, impedindo com que o material se expanda ou contraia livremente durante o seu ciclo térmico, a peça ou componente poderá apresentar um estado de tensão residual decorrente da soldagem. (COFIÑO, 2010)

Como normalmente, durante a soldagem por arco elétrico, o metal aquecido é impedido de se expandir pelas regiões mais frias do material, a zona termicamente afetada (ZTA) apresenta tensões residuais compressivas. Porém, em regiões mais distantes a ZTA, as quais impediram a sua dilatação é encontrado tensões residuais trativas. (COFIÑO, 2010)

Na Figura 4 a seguir é possível visualizar a variação no estado de tensão residual em um componente soldado.



**Figura 4 - Estado de tensão residual em uma peça soldada.**  
**Fonte: Modenesi (2008)**

Convém ressaltar, segundo Cofiño (2010), tais fenômenos influenciam significativamente na resistência mecânica, tenacidade, aparecimento e propagação de trincas, o que por conseguinte, afeta na aplicação e segurança dos componentes soldados.

#### 2.3.4.2 Tensões residuais geradas na fundição

A formação de um estado de tensão residual recorrentes do processo de fundição está diretamente ligado a maneira a qual foi feito o resfriamento após o processo. (RODRIGUES, 2007)

Durante a solidificação do material fundido, a restrição que o molde oferece ao material influencia decisivamente no estado de tensão residual da peça, que por consequência, afeta na possível formação de fissuras a quente. (RODRIGUES, 2007) Isto pode ser melhor visualizado na Figura 5 a seguir.

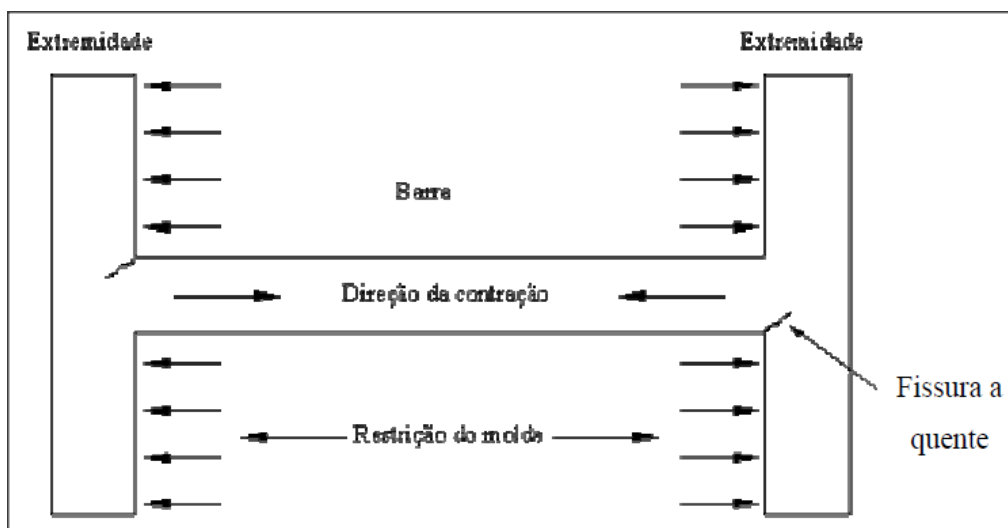


Figura 5 - Exemplo da formação de fissura a quente em um perfil "I" pelo processo de fundição. Fonte: Rodrigues (2007)

#### 2.3.4.3 Tensões residuais geradas na usinagem

Na usinagem, a formação de tensões residuais na peça é causado fundamentalmente pela deformação plástica gerada na camada superficial, e pelo aquecimento local. (BARBOSA et al, 2003)

O conceito básico do processo de usinagem está relacionado a todo processo mecânico que visa a remoção de material por meio da ação mecânica de uma ferramenta sobre peça. Sendo assim, durante a aplicação deste esforço além da retirada de cavaco da peça pode haver uma deformação plástica na peça, e é sabido, que devido a esta deformação haverá assim o surgimento de um estado de tensão residual na superfície da peça. (BARBOSA et al, 2003)

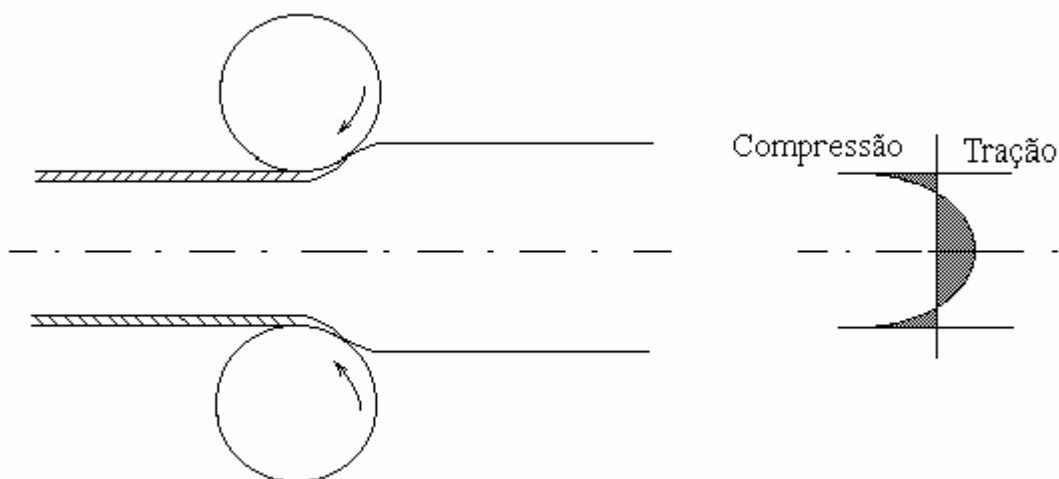
No tocante ao aquecimento local da peça, é possível que em pontos específicos se atinja valores elevados de temperatura, resultando assim na transformação de fases de algumas ligas e o surgimento de um estado de tensão residual no componente.

É importante ressaltar, que segundo Barbosa et al (2003), a distribuição das tensões residuais é fortemente dependente da velocidade de tratamento e da qualidade da ferramenta usada durante a usinagem.

#### 2.3.4.4 Tensões residuais geradas na conformação mecânica

É sabido que tensões residuais surgem a partir de deformações plásticas heterogêneas no corpo, (SOARES, 2003) e o principal mecanismo de um processo de conformação, é gerar deformação plástica no material a fim de obter um formato específico. Sendo assim, alguns processos, como por exemplo, laminação, dobramento e extrusão acabam gerando nas regiões centrais e superficiais da peça tensões residuais. (RODRIGUES, 2007)

Um bom exemplo para demonstrar o surgimento da tensão residual em uma peça conformada é através do processo de laminação, Figura 6.



**Figura 6 - Formação e distribuição da tensão residual em uma peça laminada.**  
Fonte: Soares (2003)

Durante o processo de laminação, conforme a figura anterior, uma chapa de metal está sendo laminada de modo que apenas a região próxima à superfície da chapa está sofrendo escoamento, enquanto que o centro não escoa. Deste modo, a região central da chapa tende a impedir que a parte superficial se alongue, e a parte superficial o inverso, ou seja, busca estender a parte central. Como consequência, a região próxima à superfície apresenta tensões residuais do tipo compressiva enquanto a região central apresenta tensões trativas. (SOARES, 2003)



#### 2.3.4.5 Tensões residuais geradas nos tratamentos térmicos e termo químicos

Têmpera superficial consiste em um tratamento térmico de endurecimento superficial por meio do aquecimento superficial procedido de um resfriamento rápido do material. Este tratamento é muito usual, pois propicia ao material um aumento na dureza superficial sem mudança significativa na microestrutura do núcleo da peça. (RODRIGUES, 2007)

Uma vez que o tratamento de têmpera está ligado a transformação de fase, efeitos térmicos e restrições mecânicas do núcleo sobre a superfície, a peça tende a apresentar tensões do tipo compressivas em sua superfície. (RODRIGUES, 2007)

O tratamento de carbonetação consiste em difundir átomos de carbono na superfície de aços (geralmente de baixo carbono) através do aquecimento e resfriamento da peça metálica. (SOARES, 2003)

Este ciclo térmico gera em peças de grandes dimensões uma estrutura martensítica em sua superfície, enquanto que no núcleo, pode ocorrer a formação de microestrutura composta por ferrita e perlita. Sendo assim, existirá uma variação de volume na peça, que por consequência, originará tensões compressivas em sua superfície. (RODRIGUES, 2007)

Entretanto, para peças com dimensões inferiores, pode haver tensões residuais trativas na sua superfície, uma vez que a taxa de resfriamento do núcleo e superfície serão muito próximas, o núcleo pode apresentar uma microestrutura semelhante a superfície, ou seja, martensita em ambos. (RODRIGUES, 2007)

A nitretação consiste basicamente em aumentar a dureza superficial da peça engajado com o aumento da resistência ao desgaste. Para tal, é necessário a formação de nitretos na superfície do material através de aquecimento e resfriamento superficial. (RODRIGUES, 2007)

Como a nitretação está relacionada a mudança de volume da peça, a peça tende a apresentar tensões residuais compressivas na superfície. Visto que, o volume da ferrita presente na peça é inferior ao volume dos nitretos presentes na superfície.

### 2.3.4.6 Tensões residuais geradas após *Shot Peening*

Um ótimo meio de se controlar tensões residuais trativas dos componentes é através do tratamento superficial por *Shot Peening*. Devido a isto, neste trabalho será abordado um tópico à frente exclusivo ao *Shot Peening* (tópico 2.5), onde será explicado com maiores detalhes a sua relação com a tensão residual.

Para simplificar, no Quadro 1 a seguir, é apresentado uma relação entre os processos e seus respectivos mecanismos causadores.

| Mecanismos causadores             | Deformação mecânica diferencial  | Transformação de fase do material | Contração ou expansão térmica diferencial         | Microestrutura diferencial | Desigualdades estruturais                                  |
|-----------------------------------|--|-----------------------------------|---|----------------------------|--|
| Processos associados              |  |                                   |   |                            |  |
| Conformação                       | Laminação, estampagem, forjamento, extrusão, estiramento                 |                                   |   |                            |  |
| Conformação superficial           | <i>Shot peening</i> , martelamento                                       |                                   |   |                            |  |
| Usinagem                          | Torneamento, plainamento, fresamento, retificação, furação, eletroerosão |                                   |   |                            |  |
| Soldagem                          |  | Todos os processos                | Todos os processos                                |                            |  |
| Tratamentos térmicos              |  | Têmpera, normalização             | Têmpera, normalização                             |                            |  |
| Fundição                          |  |                                   | Diferentes seções transversais, grandes dimensões |                            |  |
| Tratamentos térmicos superficiais |  |                                   | Cementação, nitretação                            | Cementação, nitretação     |  |
| Montagem e ajustes                |  |                                   |   |                            | Estruturas de grandes dimensões, desalinhamentos de uniões |

Quadro 1 – Mecanismos causadores de tensão residual em função de alguns processos de fabricação e tratamento superficial.

Fonte: Rodrigues (2007)

## 2.4 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL

Como a maioria das técnicas tradicionais de medição de tensão de modo experimental tem como princípio a mudança de determinadas propriedades mecânicas antes e depois da aplicação de um carregamento. (SOARES, 2003) As técnicas de medição de tensão residual são particularmente difíceis, uma vez que mudanças no estado de tensão residual são de difícil percepção e estão presentes em componentes mesmo sem carregamentos externos. (COFIÑO, 2010)

Contudo, existem basicamente duas formas de se mensurar as tensões residuais, segundo Cofiño (2010).

- Remoção de material, e desta forma verificar o alívio de tensão gerado, e
- Comparação, onde se é comparado as propriedades de um componente tensionado junto a um não tensionado.

A primeira forma compreende as técnicas de medição conhecidas como destrutivas, e a segunda, técnicas não destrutivas. Entretanto, de acordo com Ribeiro et al (2003), as técnicas de medição de tensões residuais se classificam em três tipos: técnicas destrutivas, semi-destrutivas e não destrutivas. Convém lembrar que a técnica semi-destrutiva é assim chamada pelo fato de que o prejuízo dado ao material é quase que insignificante, como é o caso do método de furo cego.

As principais técnicas destrutivas e semi-destrutivas existentes atualmente são:

- Método do furo-cego.
- Método do anel.
- Método da deflexão.
- Método da seção. (PEDROSA, 2007)

Em contra partida, as principais técnicas não destrutivas são:

- Método de difração de raios X.

- Método de difração de nêutrons.
- Método de ultra-som.
- Método magnético. (PEDROSA, 2007)

Cada uma das técnicas apresentam suas respectivas vantagens, desvantagens, aplicações, limitações e peculiaridades.

É importante destacar que as vezes um determinado estudo pode apresentar um comportamento inesperado, e isso pode não ser devido a medidas incorretas de tensões, mas simplesmente devido a escolha inadequada da técnica. Deste modo, segundo Lu (1996), durante a escolha da técnica a ser utilizada para medição da tensão residual é necessário ser levado em consideração alguns parâmetros, sendo eles, a natureza do componente, tipo de tensões residuais, gradiente de tensões residuais, geometria do componente e o custo final da medição.

Neste tópico foi possível perceber que existe uma vasta diversidade de métodos de se mensurar as tensões residuais, no entanto, a seguir será descrito detalhadamente apenas uma das mais usuais técnicas de medição, a técnica do furo cego.

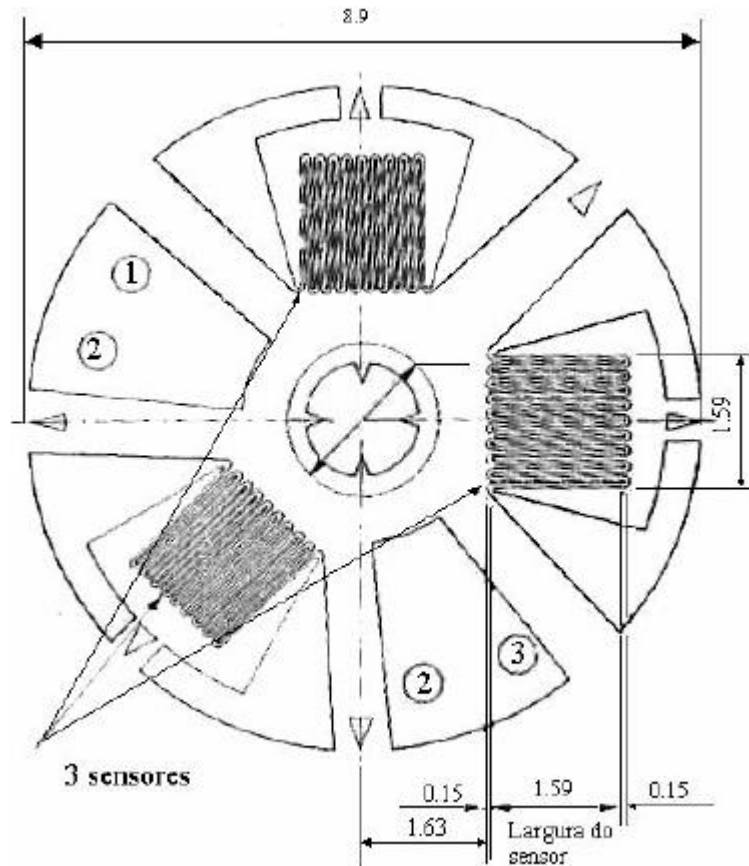
#### 2.4.1 Técnica do Furo Cego

Esta técnica apesar de ser de cunho destrutivo, podemos classifica-la como uma técnica semi-destrutiva, pois a mesma não altera a utilização da peça (na maioria dos casos) e muito menos afeta de modo significativo a resistência mecânica do componente. Definição esta de técnica semi-destrutiva, segundo Cofiño (2010).

De modo mais específico, a técnica do furo cego ou *Hole-Drilling* consiste em uma técnica semi-destrutiva para medir a tensão residual na camada superficial de um corpo sólido. A técnica basicamente é realizada por dois estágios, no primeiro estágio é feito um pequeno furo na peça (cerca de 2 mm de diâmetro) a fim de remover a tensão existente no material. Enquanto que no segundo estágio é mensurado a mudança na deformação superficial decorrente do furo. (VALENTE et al, 2005)

A usinagem do furo gera um alívio de tensão no volume do material removido, que conseqüentemente, provoca mudanças no estado de deformação de

regiões adjacentes ao furo. Através de extensômetros ali posicionados (conforme esquema da Figura 7 a seguir) é possível mensurar estas deformações, e em seguida determinar os valores da tensão residual. (SOARES, 2003)



**Figura 7 - Exemplo da aplicação do extensômetro roseta na medição da deformação do material. (unidades em mm).**

Fonte: Soares (2003)

Basicamente, segundo Cofiño (2010) existem três métodos diferentes dentro da técnica do furo cego, são elas:

- Método da integral: Apresenta a melhor resolução dentre as três, pois é realizado uma avaliação separada das tensões residuais a cada variação de profundidade e em seguida realizado a integração. Deste modo, trata-se do método mais adequado quando as tensões apresentam grande variação, como consequência, a sensibilidade aos erros experimentais também é maior.
- Método Power Series: Este método é indicado quando as tensões variam pouco em função da profundidade, entretanto, promove resolução limitada visto que é considerado que as tensões variam de maneira linear.

- Método de tensões uniformes: Indicado pela norma ASTM 837, este método é o mais indicado quando as tensões residuais são uniformes em função da profundidade do material, pois é o menos sensível a erros experimentais.

Outro método que pode ser utilizado é o método de Kockelmann que trata-se do aprimoramento das outras técnicas, entretanto, não será abordado neste trabalho. Contudo, o mesmo pode ser encontrado com maiores detalhes no estudo de Rocha et al (2009).

Para o caso de componentes sujeitos ao tratamento de *Shot Peening* o método de tensões uniforme é inviável, uma vez que os componentes apresentam elevadas tensões residuais compressivas na superfície e tensões trativas logo abaixo. Sendo assim, os métodos mais indicados são o de Power Series, o método da integral, ou até mesmo o de Kockelmann. (ROCHA et al, 2009)

Baixo custo, mobilidade do equipamento e aplicação a uma vasta variedade de materiais faz que o método do furo cego seja um dos mais utilizados para avaliação das tensões residuais superficiais. Porém, o mesmo pode apresentar certas limitações dependendo da peça a ser ensaiada, isto se dá ao fato de ser um método semi-destrutivo, pois algumas vezes o furo pode danificar o componente. (COFIÑO, 2010)

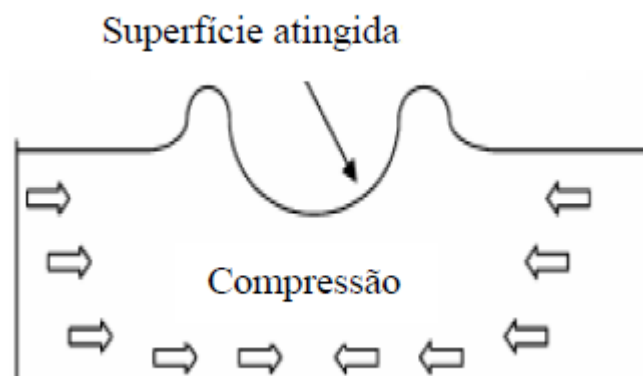
## 2.5 SHOT PEENING

### 2.5.1 Conceito

O processo de *Shot Peening*, segundo Rodrigues (2007), consiste basicamente no jateamento de diversas esferas sobre a superfície da peça a ser tratada.

De modo mais específico, o jateamento por *Shot Peening* trata-se de um tratamento superficial de trabalho a frio, que utiliza-se de pequenas granalhas de aço, vidro ou cerâmica a serem propelidas com alta velocidade contra a superfície da peça a fim de aliviar as tensões residuais ali presentes. (BLODGETT, 2004)

Através da energia cinética das esferas, quando em contato com a superfície do material, as mesmas atuam como se fossem pequenos martelos provocando uma deformação plástica na camada superficial do material. (COSTA, 2006) É importante destacar, que com o choque, a superfície da peça é então comprimida pela região adjacente a ela, e assim, conseqüentemente, gerando um estado de tensões superficiais compressivas. (RODRIGUES, 2007) Conforme Figura 8 a seguir.



**Figura 8 - Região de deformação plástica e região de compressão em uma peça sujeita ao *Shot Peening*.**

Fonte: Rodrigues (2007)

Estas tensões compressivas acabam aliviando as tensões trativas, se presentes no material, o que resulta em diversos benefícios na vida a fadiga dos componentes tratados. (CLÁUDIO et al, 2008) Deste modo, será abordado adiante, em um tópico exclusivo, as diversas vantagens do *Shot Peening*.

### 2.5.2 Vantagens do tratamento

Classificado como um processo mecânico de tratamento superficial, o *Shot peening* conquistou a sua importância no setor industrial devido à grande aplicabilidade e vantagens do mesmo quando comparado aos demais.

Através da realização do jateamento por *Shot Peening*, é perceptível uma melhoria nas propriedades mecânicas superficiais dos materiais. Segundo Scuracchio (2012), o tratamento em questão além de efetuar um encruamento na superfície do componente, ainda promove um aumento na dureza, no limite de escoamento do material e na rugosidade final. Propriedades estas que influenciam significativamente na vida a fadiga dos componentes, na resistência a corrosão, e ainda, permite o controle dos parâmetros superficiais da peça como, rugosidade, porosidade, dureza, e eliminação de marcas de ferramenta. (HIGOUNENC, 2005)

Segundo informações retiradas da CMV (2014), o tratamento de *Shot Peening* traz vantagens como:

- Melhorar a resistência a fadigas mecânicas e térmicas;
- Melhorar a resistência a corrosão;
- Aumentar a resistência ao atrito;
- Possibilitar a redução dimensional e/ou de peso sem comprometer a resistência mecânica e;
- Eliminar riscos direcionais de usinagem ou de microfissuras, inibindo a propagação de trincas.

De acordo com um estudo realizado pela SPM (2001), a vida a fadiga dos componentes é fortemente influenciada pelo tratamento de *Shot Peening* e podem ser



aumentadas a patamares como por exemplo, 600% em feixes de mola, 1300% em molas helicoidais, e engrenagens em 1500%.

### 2.5.3 Variáveis operacionais de *Shot Peening*

Quando se visa realizar o jateamento por *Shot Peening* em uma peça, é importante se levar em conta alguns fatores, uma vez que eles interferem no resultado final do tratamento. Assim sendo, a seguir será descrito algumas das diferentes variáveis.

#### 2.5.3.1 Velocidade da granalha

A velocidade das granalhas interfere diretamente no processo. Portanto, se aumentarmos a velocidade das esferas, temos por conseguinte, um aumento na intensidade do tratamento, uma vez que as granalhas se chocam com mais força na superfície da peça. (OLIVEIRA, 2011) Convém destacar que o fator velocidade pouco influi no valor final da tensão residual, no entanto, interfere de modo direto na profundidade da tensão compressiva. (REGO, 2011)

Em materiais mais dúcteis costuma-se trabalhar com velocidades baixas, enquanto que para peças mais duras trabalha-se com velocidades superiores para que se possa obter resultados significativos. (ROHWEDER et al, 2011)

#### 2.5.3.2 Pressão de jateamento

A pressão com que as granalhas são propelidas, segundo estudo realizado por Oliveira (2011), interfere diretamente na profundidade das tensões residuais

compressivas geradas no material, no entanto, não influencia nos valores da tensão residual máxima.

Quanto maior for a pressão de jateamento, menor serão os valores de tensão residual na superfície dos componentes tratados. Isto é dado em função do relaxamento da rede que ocorre devido ao alto impacto das granalhas com a peça. (OLIVEIRA, 2011)

#### 2.5.3.3 Ângulo de ataque

O ângulo de ataque consiste no ângulo que é formado entre a direção do jato e o plano da superfície do material. Não se trabalha com ângulo de  $90^\circ$ , pois deste modo, as esferas ricocheteadas colidiriam com as incidentes, o que aumentaria o consumo de granalhas e diminuiria a eficiência do tratamento. (ROHWEDER et al, 2011) No entanto, quanto maior o ângulo de ataque, maior será a intensidade do tratamento. Isso é notável, uma vez que a componente vertical da força será maior quanto maior o ângulo. (REGO, 2011)

A escolha do ângulo de ataque no jateamento varia em função do material das granalhas. Normalmente, para granalhas de aço e granalhas de vidro, o ângulo fica entre  $60^\circ$  e  $70^\circ$ , entretanto, para granalhas de material mais frágil o ângulo trabalhado costuma ser inferior a  $60^\circ$ . (ROHWEDER et al, 2011)

#### 2.5.3.4 Distância de jateamento

A distância do jateamento é definida como a distância entre a saída do jato até a face do material. Sendo assim, é notável que quanto maior for esta distância, maior será a área do material submetida ao tratamento, no entanto, menor será a intensidade do ataque destas granalhas. (ROHWEDER et al, 2011) Segundo Tecgal (2013), a distância recomendável é no mínimo de 50mm.

#### 2.5.3.5 Tempo de exposição ao tratamento

O parâmetro tempo operacional quando ligado ao tempo de jateamento segue a lógica do conceito de saturação. Ou seja, o quão maior for o tempo de exposição da peça ao jateamento, maior será a intensidade do mesmo, no entanto, isto se dá apenas até um determinado ponto, no caso, o ponto de saturação. (REGO, 2011)

O ponto de saturação é definido como o ponto onde a intensidade do *Shot Peening* permanece a mesma ou varia de maneira insignificante. Normalmente, este ponto é atingido quando se foi coberto cerca de 98% do material. (OLIVEIRA, 2011)

#### 2.5.3.6 Tipos de granalha

Dentre os parâmetros citados, pode-se destacar os relacionados ao tipo de granalha como sendo um dos mais importantes, principalmente no tocante a dureza, formato, dimensão e material da granalha escolhida.

O material da granalha, evidentemente, deve apresentar uma dureza igual ou superior a do material da peça a ser exposta ao jateamento. Entretanto, quando a rugosidade da peça tratar-se de um fator decisivo poderá existir exceções. KRITZLER; WÜBBENHORST, 2002 (apud REGO, 2011)

O formato das granalhas busca sempre ser o mais arredondado possível, ou seja, esférico, visando assim evitar a formação de arestas e descontinuidades acentuadas na superfície da peça. Pois, estas descontinuidades podem gerar concentradores de tensão, o que posteriormente afetará no sucesso do tratamento. (REGO, 2011)

A dimensão da granalha consiste em um dos principais parâmetros do processo de *Shot Peening*. Visto que alterações no diâmetro influenciam na tensão residual, intensidade do tratamento, rugosidade e vida a fadiga da peça. (REGO, 2011)

## Segundo Rego (2011)

Se as demais variáveis do processo são mantidas, o aumento da dimensão da granalha resultará em aumento da intensidade de jateamento e da profundidade da camada compressiva, mas também uma diminuição do recobrimento do jateamento no componente. A alteração da dimensão da granalha impactará diretamente na distribuição das tensões residuais assim como na rugosidade da peça. Sendo o jateamento um processo de impacto, a superfície jateada sofre alterações microscópicas que serão de maior magnitude quanto maior a massa da granalha. Para materiais submetidos a altas tensões trativas, o aumento da dimensão fará com que a profundidade da camada compressiva aumente substancialmente. Na superfície, a tensão residual deve permanecer a mesma, porém o valor máximo da tensão residual compressiva assim como a sua profundidade irão aumentar.

A norma SAE (*Society of Automotive Engineers*) é quem controla e classifica as dimensões das granalhas. Na Tabela 2 seguinte é possível visualizar as granulometrias mais usuais dada em função da classificação SAE.

**Tabela 2 – Granulometrias mais usuais.**

| TIPO      | TAMANHO       | TIPO      | TAMANHO       |
|-----------|---------------|-----------|---------------|
| SAE S-660 | 2 - 1,68mm    | SAE S-330 | 1,00 – 0,84mm |
| SAE S-650 | 1,68 - 1,41mm | SAE S-280 | 0,84 – 0,71mm |
| SAE S-460 | 1,41 - 1,19mm | SAE S-230 | 0,71 – 0,59mm |
| SAE S-390 | 1,19 - 1,00mm | SAE S-170 | 0,59 – 0,42mm |

Fonte: CMV (2014)

Em relação ao material das granalhas, as granalhas se dividem em materiais ferrosos e não ferrosos. Sendo as duas principais matérias-primas, as esferas de vidro (não ferrosas) e as granalhas de aço (ferrosas). Baseado nisto, será detalhado um pouco sobre cada uma delas a seguir.

### 2.5.3.6.1 Esferas de vidro

Este tipo de esfera apresenta uma característica peculiar, pois é a única que possui a capacidade de prover um acabamento superficial acetinado de grande

beleza ao material após ter sido aplicada, isto tudo devido ao seu poder de limpeza na peça. (BRASIBRAS, 2014)

As esferas de vidro, segundo a Tecgal (2013), apresentam diversas vantagens, tais como:

- Não são abrasivas: O que faz com que não afete as tolerâncias da peça;
- Não são contaminantes: Por ser inerte, o vidro não reage com os materiais submetidos ao tratamento;
- Tem um custo operacional baixo: pois trabalha com equipamentos leves, não necessita de mão-de-obra especializada, tem baixo consumo de esferas; rapidez e eficiência nas operações; entre outros;
- Formação mínima de pó: Sua forma e dureza oferecem grande resistência à pulverização;
- Permite uniformização do processo: Regularidade de propriedades físicas, químicas e de forma garantem a uniformidade do processo.

Com base na segunda vantagem apresentada pela Tecgal (2013), Oliveira (2011) descreve sobre a utilização deste tipo de esferas normalmente quando não se pode trabalhar com esferas de aço, pelo fato destas esferas serem contaminantes a certos tipos de materiais. Deste modo, a seguir será descrito um pouco sobre as granalhas de aço.

#### 2.5.3.6.2 Granalhas de aço

As granalhas de aço se dividem em granalhas de fio de aço cortado e granalha de aço fundido. Na mesma categoria de granalha de materiais metálicos temos as granalhas de ferro fundido branco e maleável.

As esferas de aço fundido apresentam normalmente dureza entre 40 e 50 HRC (escala de dureza Rockwell C), enquanto que esferas de ferro fundido são mais quebradiças e apresentam valores entre 58 e 68 HRC. (OLIVEIRA, 2011)

Vale ressaltar que como as granalhas são produzidas a partir de sucatas de materiais metálicos, e podem ser reutilizadas por 400 ciclos ou mais, recomenda-se que no mínimo 85% das granalhas estejam em boas condições, pois elas podem riscar a superfície da peça e apresentar uma não uniformidade no processo (REGO, 2011).

Segundo a Brasibras (2014), as principais vantagens das granalhas de aço são:

- Baixo custo operacional em função da vida útil;
- Velocidade de limpeza;
- Uniformidade no acabamento;
- Menor desgaste;
- Menor geração de pó.

### 3 METODOLOGIA

Este estudo trata-se de uma análise somente quantitativa dos dados, pois todos os valores serão coletados com o auxílio de equipamentos e por meio de ensaios e experimentos práticos.

A metodologia pôde ser dividida em quatro etapas, sendo elas:

- Determinação do material, dimensões e quantidade de corpos de prova;
- Preparação prévia ao tratamento;
- Determinação dos parâmetros e a realização do *Shot Peening*;
- Caracterização das amostras.

#### 3.1 MATERIAL, DIMENSÕES E QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA

O material trabalhado neste experimento, como brevemente detalhado no tópico 2.2, trata-se de um aço inoxidável martensítico fundido da classe ASTM A743 de grau CA6NM. O mesmo foi fornecido pela instituição UTFPR e certificado segundo norma ASTM-A743M.

O número de corpos de prova necessários para a realização do trabalho está diretamente ligado com o número de parâmetros a serem trabalhados e a variação de cada um destes parâmetros. Sendo assim, antecipadamente sabe-se que será trabalhado com três parâmetros no tratamento de *Shot Peening* e para cada um destes parâmetros serão usados dois níveis diferentes. Deste modo, com um planejamento fatorial, o número mínimo de corpos de prova resultante é oito ( $2^3 = 8$ ).

Foram cortados os corpos de provas em dimensões de aproximadamente 40 mm de largura, 40 mm de comprimento e 10 mm de espessura, o que facilita o corte, manuseio do corpo durante o ensaio e proporciona uma boa relação entre a cobertura do tratamento e o seu custo. Convém lembrar também que a área superficial é intencionalmente superior aos 84 mm<sup>2</sup> (7x12 mm) necessários para o posicionamento do extensômetro, visto que posteriormente será realizado a medição da tensão residual por meio do extensômetro.

### 3.2 PREPARAÇÃO PRÉVIA AO TRATAMENTO

Foram cortados os 8 corpos de prova por meio da máquina MAXICUT Metaltest localizada no laboratório de preparação metalográfica (DAMEC) da UTFPR-PG, conforme dimensões informadas anteriormente (40x40x10 mm).

Foi importante também efetuar a retificação em apenas umas das faces de cada chapa a fim de se obter uma superfície mais uniforme devido as imperfeições do corte. O faceamento em questão foi elaborado no laboratório de usinagem da UTFPR-PG.

Em seguida, foram lixados os corpos de prova com lixa A400, pelo auxílio de uma lixadeira e politriz modelo PLF Fortel que se encontra no laboratório de preparação metalográfica (DAMEC) da UTFPR-PG.

Após o lixamento das faces, e com o intuito de aliviar as tensões residuais, foi efetuado o revenimento, onde todos os corpos de prova foram aquecidos à 610°C por um intervalo de 2 horas em um forno do tipo Mufla da marca Jung modelo LF0612 presente no laboratório de preparação metalográfica (DAMEC) da UTFPR-PG.

Antecedendo ao tratamento de *Shot Peening* em si, foi também verificado a massa dos corpos de provas, com o auxílio de uma balança analítica Shimadzu modelo AW-220, foi medido a massa de cada corpo realizando 4 medidas para cada um, objetivando maior precisão na obtenção dos dados.

### 3.3 TRATAMENTO DE *SHOT PEENING*

Após efetuado todos os ensaios prévios, o próximo passo foi realizar o tratamento de *Shot Peening* em si, mas antes é importante ressaltar que para a realização do tratamento foram escolhidas as seguintes variáveis do processo: ângulo de ataque, pressão e distância.



O parâmetro ângulo de ataque foi escolhido, uma vez que ele interfere na intensidade do tratamento. Foi trabalhado com ângulos de 60° e 80° que são os valores médios trabalhados com granalhas de aço e vidro.

Com relação a pressão do ar do tratamento, foram definidos valores de 35 e 53 psi devido a limitações técnicas no aparelho, as pressões foram controladas através de uma válvula reguladora no equipamento de *Shot Peening*.

A respeito da distância do tratamento, variável que também interfere na intensidade e área do tratamento, foi optado trabalhar com distâncias de 200 mm e 300 mm, para que se possa verificar o comportamento dos resultados do tratamento em dois pontos distintos.

A Tabela 3 a seguir apresenta de forma objetiva o que foi citado anteriormente, evidenciando quais foram as variáveis do tratamento de *Shot Peening* e seus respectivos valores.

**Tabela 3 - Variáveis do tratamento de *Shot Peening* com seus respectivos valores.**

| Variáveis                      | Valor I | Valor II |
|--------------------------------|---------|----------|
| Ângulo de ataque das granalhas | 60°     | 80°      |
| Pressão do ar do tratamento    | 35 psi  | 53 psi   |
| Distância do tratamento        | 200 mm  | 300 mm   |

**Fonte: Autoria própria.**

Outros parâmetros como o tempo operacional e tipo de granalhas foram fixados.

O tempo de exposição ao tratamento foi de 30 segundos, tempo este necessário para uma total cobertura do tratamento.

O tipo de granalha escolhido foi a granalha de aço com granulometria de 1 mm do tipo SAE S-390, esta escolha se dá pelo fato de ser uma das mais usuais.

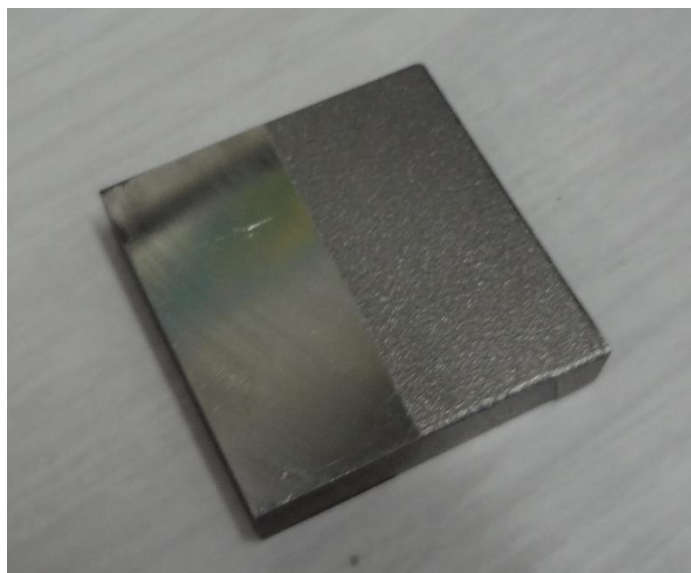
Com base em todas estas variáveis já mencionadas, em seguida foi possível realizar o tratamento de *Shot Peening* em cada um dos corpos de prova com as seguintes combinações (Tabela 4 à diante). Vale ressaltar que o tratamento foi realizado com o auxílio de um jato de alta pressão para jateamento modelo JM 45, e uma cabine de jateamento, ambos localizados no laboratório de aspersão térmica da UFPR em Curitiba-PR.

**Tabela 4 - Combinações dos valores de cada variável na realização do *Shot Peening*.**

| Variáveis                         | Ensaio I | Ensaio II | Ensaio III | Ensaio IV | Ensaio V | Ensaio VI | Ensaio VII | Ensaio VIII |
|-----------------------------------|----------|-----------|------------|-----------|----------|-----------|------------|-------------|
| Ângulo de ataque                  | 60°      | 60°       | 60°        | 60°       | 80°      | 80°       | 80°        | 80°         |
| Pressão do ar do tratamento (psi) | 35       | 35        | 53         | 53        | 35       | 35        | 53         | 53          |
| Distância do tratamento (mm)      | 200      | 300       | 200        | 300       | 200      | 300       | 200        | 300         |

**Fonte: A autoria própria.**

Para a execução do tratamento foi coberto aproximadamente metade da área superficial do corpo de prova, por meio de outro metal, ou seja, a área sujeita ao tratamento ficou em torno de 800 mm<sup>2</sup> (20x40 mm). Este procedimento é justificado pelo fato de posteriormente facilitar a análise e comparação da região tratada e a região não tratada. Conforme imagem a seguir.



**Figura 9 – Foto da superfície de uma das amostras após tratamento, demonstrando a superfície jateada (direita) e não jateada (esquerda).**

**Fonte: A autoria própria.**

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Após ter sido realizado o *Shot Peening*, se tornou possível verificar alguns parâmetros, tais como, rugosidade, microdureza, perda de massa e a tensão residual. Vale ressaltar que estes parâmetros (exceto a perda de massa) foram analisados tanto na área submetida ao tratamento quanto na área não submetida, visando comparar os valores de antes e depois do *Shot Peening*.

Foi medido a massa dos corpos de provas novamente para verificar se houve ou não perda de massa durante o jateamento.

Através de um Durômetro Time Vickers também localizado no laboratório de preparação metalográfica (DAMEC) da UTFPR-PG, com aplicação de carga de 300 gf e 16 medidas para cada uma das amostras, sendo dispostas em uma matriz 4x4 em intervalos de 0,5 mm entre as mesmas, foram mensurados os valores de microdureza dos corpos de prova a fim de se comparar o quanto foi alterado depois do ensaio de jateamento.

A rugosidade foi analisada por meio de um Perfilômetro ótico TAYLOR HOBSON modelo CCI, com lentes de 10X e 50X, obtendo para cada uma das lentes 4 imagens por superfície, sendo que estas imagens foram sobrepostas pelo próprio equipamento para refino dos resultados, o mesmo está localizado no laboratório de preparação metalográfica (DAMEC) da UTFPR-PG. Vale lembrar, que neste processo optou-se por analisar as rugosidades médias (Ra e Rz) e projeções tridimensionais da superfície de cada amostra, tanto para a superfície jateada quanto à superfície não jateada.

A mensuração da tensão residual em ambas as áreas (jateada e não jateada) foi realizada através do ensaio de furo cego com equipamento localizado no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Revestimentos e Soldagem – LACTEC em Curitiba – PR. Neste ensaio foram colados os extensômetros nos corpos de prova e através de um furo de 2 mm de profundidade, com tomada de dados em intervalos de 0,2 mm obteve-se os valores de tensão residual.

## 4 RESULTADO E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE DA PERDA DE MASSA NOS CORPOS DE PROVA

As Tabelas 5 e 6 a seguir apresentam respectivamente a massa de cada corpo de prova antes do tratamento de *Shot Peening* e após o tratamento.

**Tabela 5 - Massa de cada corpo de prova antes do jateamento (medidas em gramas).**

|   | 1° medida | 2° medida | 3° medida | 4° medida | Média           |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| 1 | 96,6728   | 96,6734   | 96,6730   | 96,6729   | 96,6730±0,0003  |
| 2 | 96,0429   | 96,0413   | 96,0420   | 96,0432   | 96,0424±0,0009  |
| 3 | 100,2309  | 100,2303  | 100,2311  | 100,2309  | 100,2308±0,0003 |
| 4 | 99,0028   | 99,0002   | 98,9999   | 99,0013   | 99,0011±0,0013  |
| 5 | 109,7050  | 109,7046  | 109,7052  | 109,7049  | 109,7049±0,0003 |
| 6 | 89,7835   | 89,7846   | 89,7836   | 89,7862   | 89,7845±0,0013  |
| 7 | 116,0886  | 116,0893  | 116,0889  | 116,0892  | 116,0890±0,0003 |
| 8 | 93,6555   | 93,6555   | 93,6561   | 93,6560   | 93,6558±0,0003  |

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 6 - Massa de cada corpo de prova após o jateamento (medidas em gramas).**

|   | 1° medida | 2° medida | 3° medida | 4° medida | Média           |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|
| 1 | 96,6721   | 96,6717   | 96,6720   | 96,6716   | 96,6719±0,0002  |
| 2 | 96,0398   | 96,0391   | 96,0392   | 96,0393   | 96,0394±0,0003  |
| 3 | 100,2301  | 100,2299  | 100,2301  | 100,2302  | 100,2301±0,0001 |
| 4 | 98,9991   | 98,9992   | 98,9990   | 98,9989   | 98,9991±0,0001  |
| 5 | 109,7039  | 109,7037  | 109,7042  | 109,7043  | 109,7040±0,0003 |
| 6 | 89,8006   | 89,8004   | 89,8003   | 89,8002   | 89,8004±0,0002  |
| 7 | 116,0892  | 116,0890  | 116,0890  | 116,0892  | 116,0891±0,0001 |
| 8 | 93,6554   | 93,6572   | 93,6567   | 93,6568   | 93,6565±0,0008  |

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 7 é comparado a diferença na média das massas dos corpos de prova antes do tratamento de *Shot Peening* e após o tratamento.

**Tabela 7 - Média e amplitude nas medições da massa dos corpos antes e após o jateamento (gramas).**

| Corpo de prova | Média (antes do tratamento) | Média (após o tratamento) | Diferença entre médias |
|----------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------|
| 1              | 96,6730±0,0003              | 96,6719±0,0002            | -0,0011                |
| 2              | 96,0424±0,0009              | 96,0394±0,0003            | -0,0030                |
| 3              | 100,2308±0,0003             | 100,2301±0,0001           | -0,0007                |
| 4              | 99,0011±0,0013              | 98,9991±0,0001            | -0,0020                |
| 5              | 109,7049±0,0003             | 109,7040±0,0003           | -0,0009                |
| 6              | 89,7845±0,0013              | 89,8004±0,0002            | +0,0159                |
| 7              | 116,0890±0,0003             | 116,0891±0,0001           | +0,0001                |
| 8              | 93,6558±0,0003              | 93,6565±0,0008            | +0,0007                |

Fonte: Autoria própria.

De acordo com as Tabelas 5, 6 e 7, é possível notar que a diferença nas massas não foram significativas para nenhum dos corpos de prova analisados. Uma vez que a diferença entre as médias é da mesma ordem de grandeza do desvio padrão das medições.

Nos corpos de prova 6, 7 e 8, segundo as medições, houve um incremento na massa dos mesmos, enquanto que para o restante dos corpos de prova (1, 2, 3, 4 e 5) houve um decréscimo na massa. Sendo assim, um dos possíveis motivos desta variação irregular na massa, seja devido a fatores técnicos durante o processo de medição da massa, e não pode-se afirmar que tais variações são oriundas do tratamento de *Shot Peening* em si. Visto que, são pequenas variações e que oscilam entre perda e ganho de massa.

## 4.2 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA MICRODUREZA SUPERFICIAL APÓS *SHOT PEENING*

Na Tabela 8 a seguir, é apresentado os níveis de dureza superficial para cada um dos corpos de prova ensaiados, destacando os valores de dureza obtidos na superfície jateada e não jateada.

**Tabela 8 - Dureza superficial das superfícies jateadas e não jateadas dos corpos de prova com seus respectivos desvios padrão.**

| Corpo de prova | Ângulo de ataque | Pressão do ar do tratamento (psi) | Distância entre o corpo e jato (mm) | Dureza superficial sem <i>Shot Peening</i> (HV) | Dureza superficial após o <i>Shot Peening</i> (HV) |
|----------------|------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| 1              | 60°              | 35                                | 200                                 | 280±5,54  | 363±31,52  |
| 2              | 60°              | 35                                | 300                                 | 305±9,54  | 366±17,83  |
| 3              | 60°              | 53                                | 200                                 | 314±7,84  | 391±22,38  |
| 4              | 60°              | 53                                | 300                                 | 286±6,04  | 340±20,95  |
| 5              | 80°              | 35                                | 200                                 | 306±8,04  | 352±18,69  |
| 6              | 80°              | 35                                | 300                                 | 305±6,77  | 340±19,49  |
| 7              | 80°              | 53                                | 200                                 | 306±6,83  | 338±18,76  |
| 8              | 80°              | 53                                | 300                                 | 312±7,59  | 339±15,90  |

Fonte: Autoria própria.

É possível perceber que o desvio padrão da dureza após tratamento é superior ao desvio padrão de dureza da superfície sem jateamento, isso é explicado, uma vez que durante a obtenção dos valores, os ensaios na superfície rugosa após *Shot Peening* apresentaram distorções. Pois durante a aplicação da carga para mensurar a dureza superficial na superfície rugosa é esperado que a deformação causada seja menos uniforme, visto que existem vales e picos mais intensos nesse tipo de superfície.

Para melhor compreensão dos dados foi elaborado uma tabela comparando a diferença de dureza superficial que cada corpo de prova apresentou após o tratamento, conforme segue na Tabela 9 adiante.

**Tabela 9 - Acréscimo de dureza superficial dos corpos de prova quando submetido ao tratamento de *Shot Peening*.**

| Corpo de prova | Ângulo de ataque | Pressão do ar do tratamento (psi) | Distância entre o corpo e jato (mm) | Acréscimo de dureza superficial (HV) | Percentual de acréscimo |
|----------------|------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| 1              | 60°              | 35                                | 200                                 | 83                                   | 29,6%                   |
| 2              | 60°              | 35                                | 300                                 | 61                                   | 20,0%                   |
| 3              | 60°              | 53                                | 200                                 | 77                                   | 24,5%                   |
| 4              | 60°              | 53                                | 300                                 | 54                                   | 18,9%                   |
| 5              | 80°              | 35                                | 200                                 | 46                                   | 15,0%                   |
| 6              | 80°              | 35                                | 300                                 | 35                                   | 11,5%                   |
| 7              | 80°              | 53                                | 200                                 | 32                                   | 10,5%                   |
| 8              | 80°              | 53                                | 300                                 | 27                                   | 8,7%                    |

Fonte: Autoria própria.

Por meio da tabela anterior é possível notar um aumento na dureza superficial principalmente em função do ângulo de ataque das granalhas, enquanto que para a distância e pressão do tratamento não houve mudanças tão significativas.

Deste modo, com o auxílio do software STATISTICA 7.0 foi possível a elaboração de gráficos que apresentem a variação individual de cada uma das variáveis do tratamento com um grau de certeza de 95% (Figura 10, 11 e 12), juntamente com um gráfico de barras que visa demonstrar o índice de significância de cada variável em função do resultado final (Figura 13).

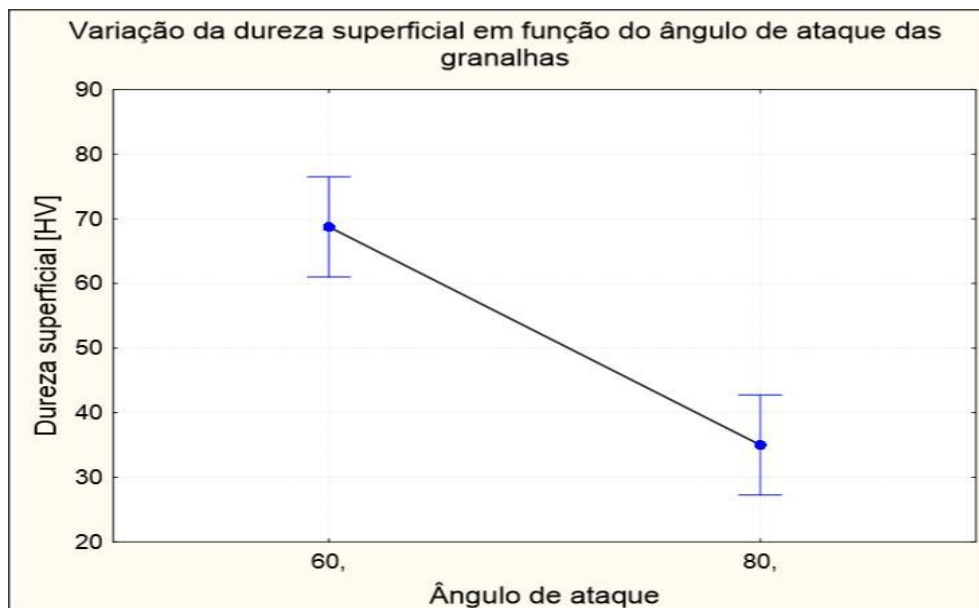


Figura 10 - Gráfico que apresenta a variação da dureza em função dos diferentes níveis de ângulo de ataque ensaiados.

Fonte: Autoria própria.

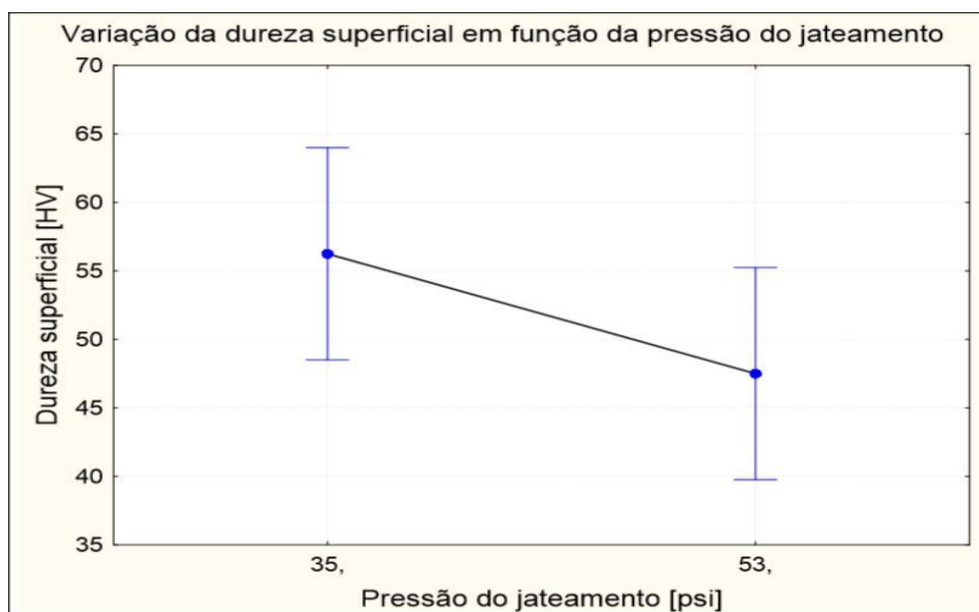
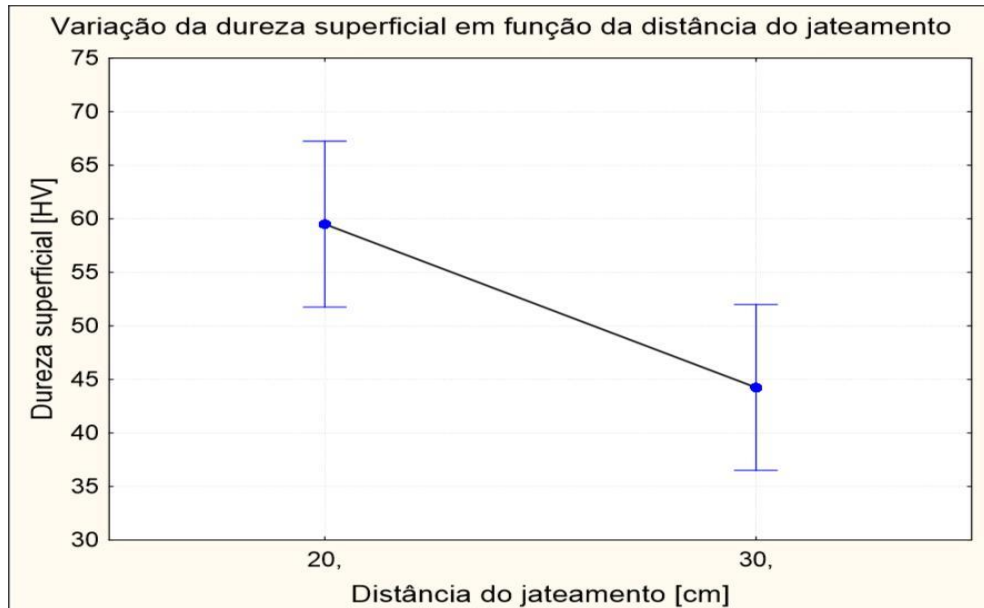


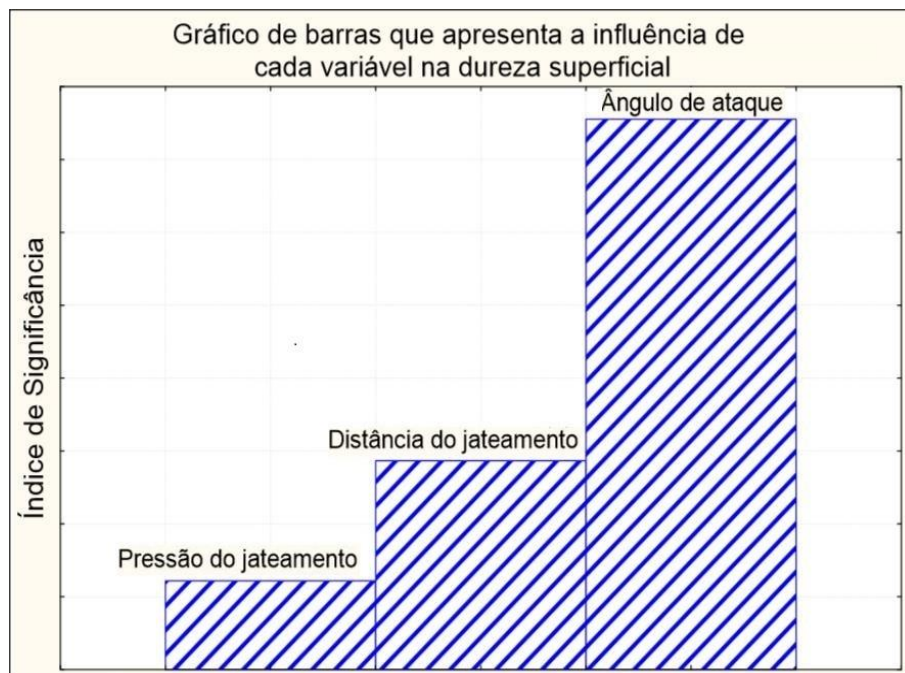
Figura 11 - Gráfico que apresenta a variação da dureza em função dos diferentes níveis de pressão do jateamento.

Fonte: Autoria própria.





**Figura 12 - Gráfico que apresenta a variação da dureza em função dos diferentes níveis de distância do jateamento.**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 13 - Gráfico que apresenta a índice de significância de cada variável no resultado final de dureza.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Portanto, relacionando as Figuras 10, 11, 12 e 13 apresentadas anteriormente, chega-se à conclusão de que o parâmetro mais influente na dureza superficial do material foi o ângulo de ataque das granalhas.

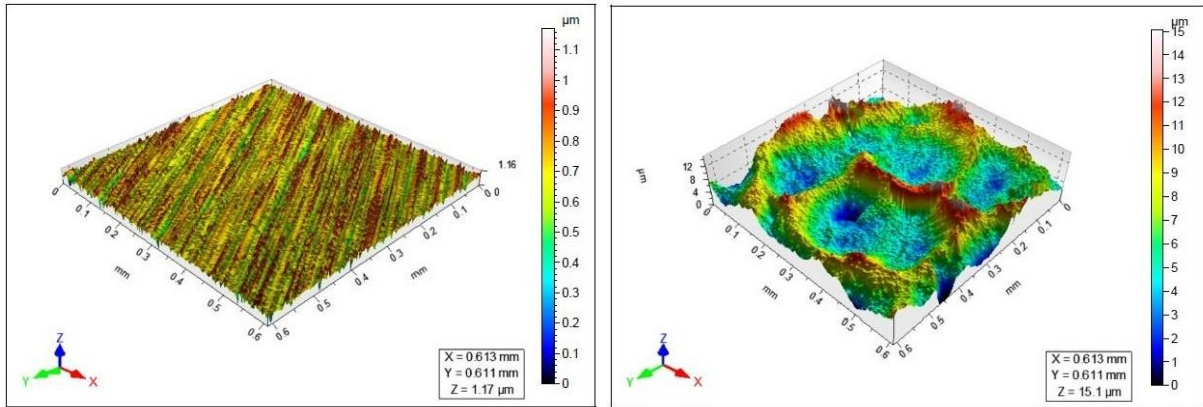
De acordo com a Figura 10 e Tabela 9, para ângulo de 60° o acréscimo de dureza foi mais acentuado, chegando a patamares de 29,6% de aumento, em contra partida, com o restante das variáveis constantes e ângulo de 80°, obteve-se 15,0% de aumento.

Sendo assim, o resultado do experimento foi contrário com a teoria de Rego, 2011 que afirma que quanto maior o ângulo de ataque, maior seria a intensidade do tratamento. No entanto, este trabalho está de acordo com a teoria de Rohweder et al, 2011 que afirma que se o ângulo de ataque for muito grande existirá o choque das granalhas ricocheteadas com as incidentes. Portanto, neste estudo, foi observado que 80° foi o suficiente para que houvesse perda na eficiência do tratamento devido a colisão entre as granalhas, o que fez com que mesmo 60° que apresenta uma componente vertical da força inferior, resultasse em um acréscimo de dureza superficial superior ao ângulo de 80°.

#### 4.3 ANÁLISE DO PERFIL DE RUGOSIDADE RESULTANTE DO TRATAMENTO DE *SHOT PEENING*

Com o auxílio do software TalyMap Gold 6.2 do perfilômetro TalyHobson com lente de 50X, foi possível gerar perfis de rugosidade tridimensionais das superfícies jateadas e não jateadas de cada amostra.

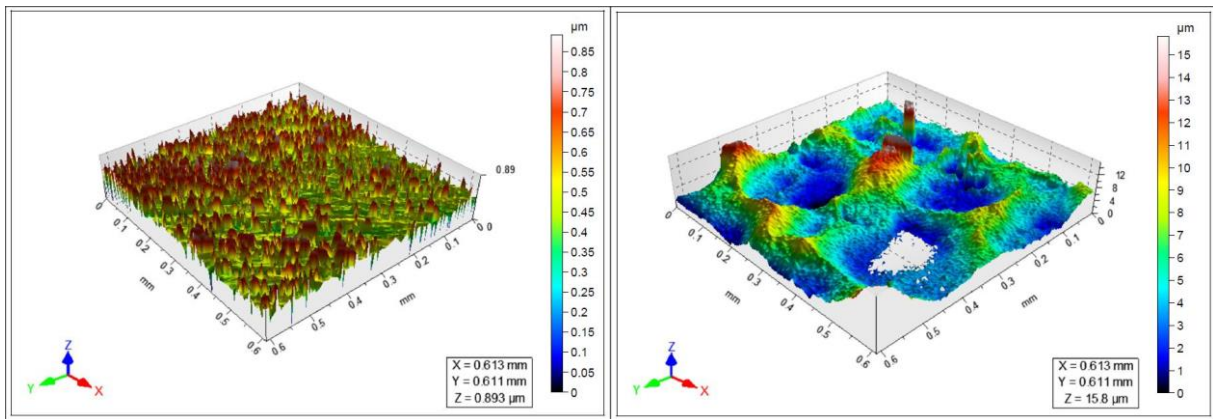
Sendo assim, nas Figuras 14 até a Figura 21 apresentadas a seguir, é possível visualizar os diferentes perfis de rugosidade citados.



(a)

(b)

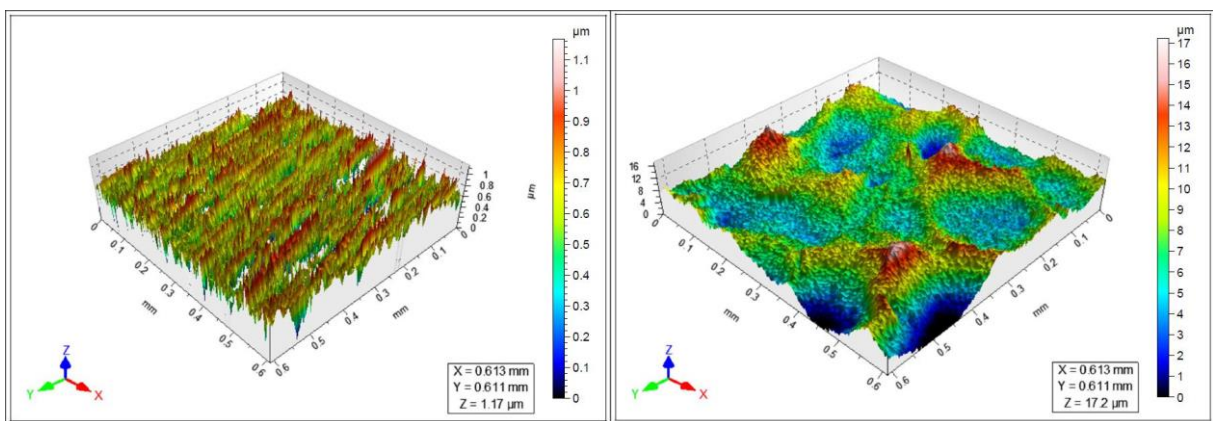
Figura 14 – Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 1 (a) e após jateamento (b).  
Fonte: Software TalyMap.



(a)

(b)

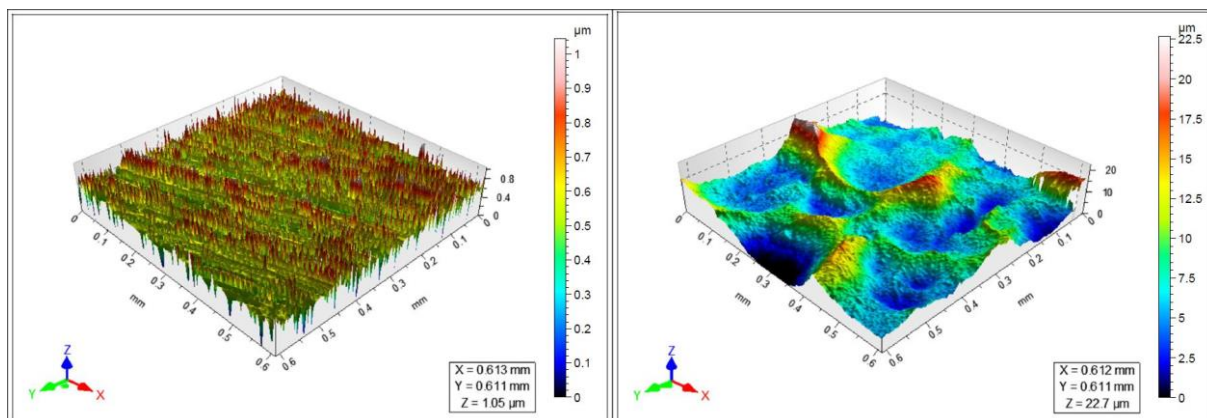
Figura 15 - Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 2 (a) e após jateamento (b).  
Fonte: Software TalyMap.



(a)

(b)

Figura 16 - Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 3 (a) e após jateamento (b).  
Fonte: Software TalyMap.

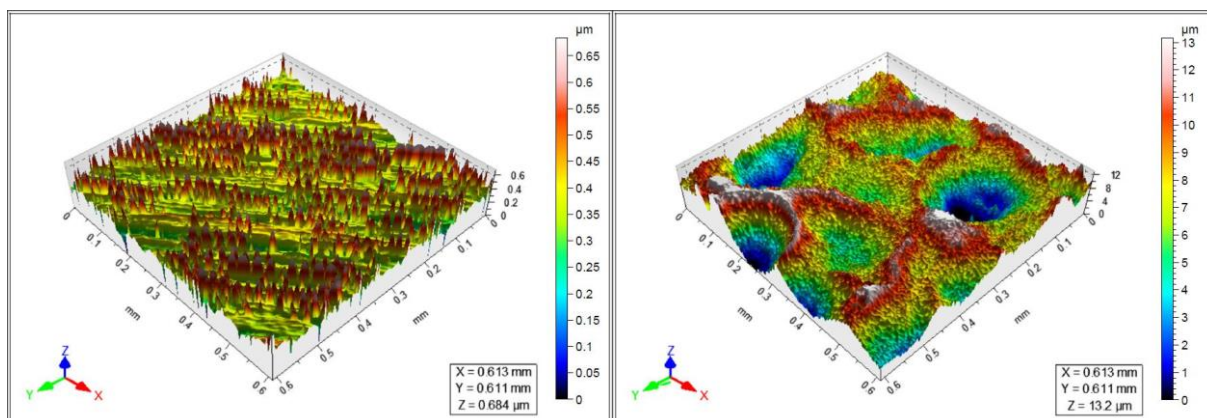


(a)

(b)

Figura 17 - Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 4 (a) e após jateamento (b).

Fonte: Software TalyMap.

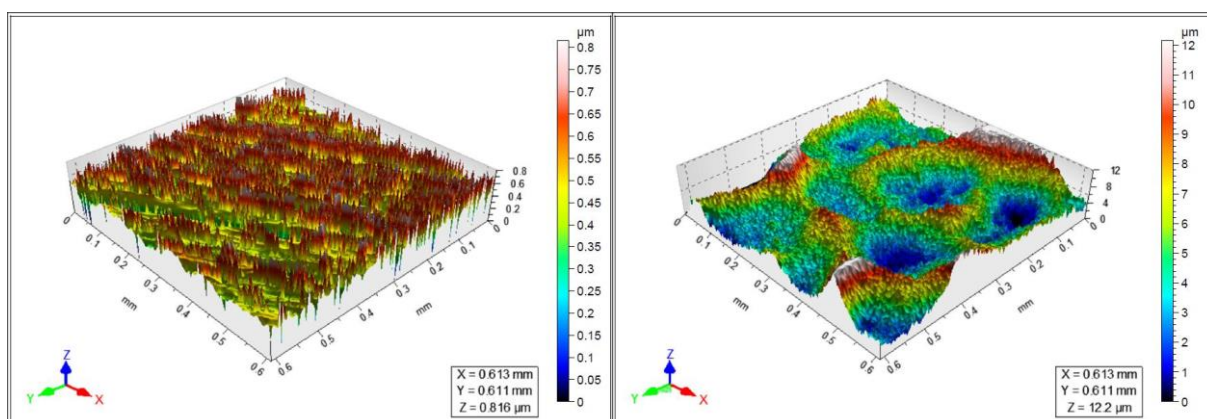


(a)

(b)

Figura 18 - Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 5 (a) e após jateamento (b).

Fonte: Software TalyMap.



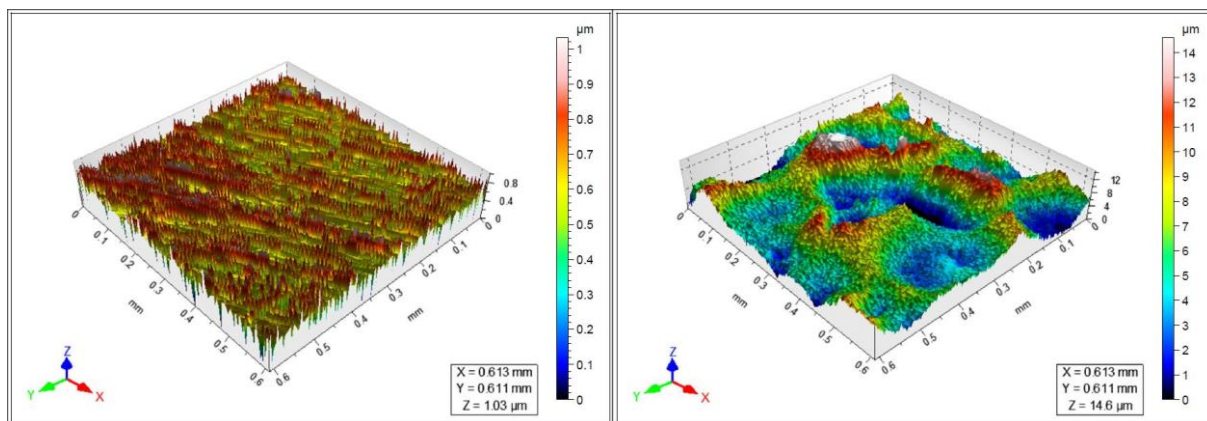
(a)

(b)

Figura 19 - Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 6 (a) e após jateamento (b).

Fonte: Software TalyMap.



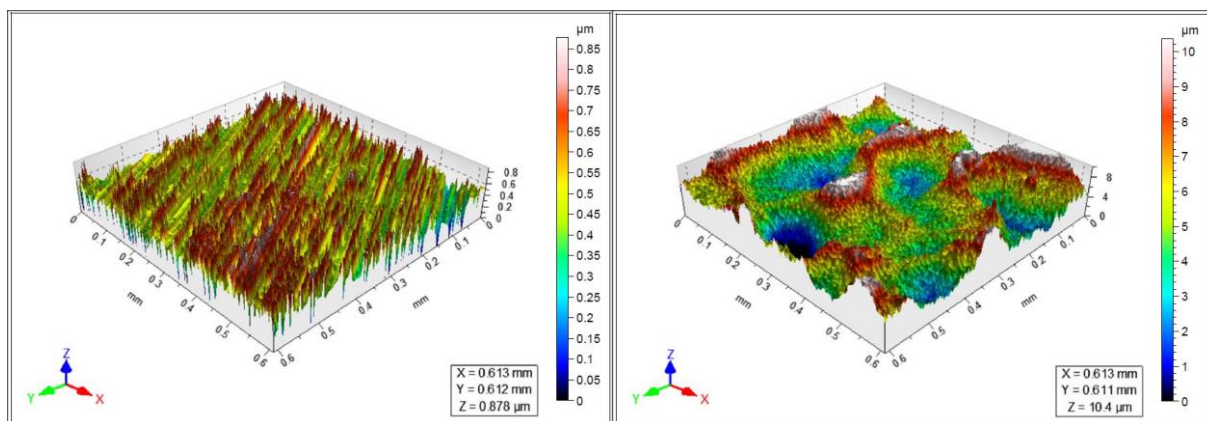


(a)

(b)

Figura 20 - Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 7 (a) e após jateamento (b).

Fonte: Software TalyMap.



(a)

(b)

Figura 21 - Vista tridimensional do perfil de rugosidade da superfície não jateada do corpo de prova número 8 (a) e após jateamento (b).

Fonte: Software TalyMap.

Por meio das figuras anteriores observa-se a diferença entre as superfícies jateadas e não jateadas. Nas imagens das superfícies não jateadas percebe-se como acabamento final o processo de usinagem, inclusive até a direção do lixamento e seus baixos níveis de rugosidade, entre 0,6 e 1,1  $\mu\text{m}$ .

Na superfície jateada nota-se a presença de diversas cavidades, cavidades estas oriundas da incidência das granalhas sobre a peça durante o jateamento por *Shot Peening*. Deste modo, se buscou saber qual foi o fator mais influente e o quanto este influenciou (fatores como: ângulo de ataque, pressão do jateamento e distância do tratamento) no acabamento final da superfície.

O método de avaliar o acabamento superficial neste trabalho tomou como base a norma ISO 4287 que refere-se a medição da rugosidade média “Ra” e rugosidade de profundidade média “Rz”.

Sendo assim, os valores de rugosidade Ra e Rz serão apresentados na Tabela 10 a seguir, em função de cada um dos corpos de prova. Convém destacar que nesta tabela os valores de rugosidade são dados para ambas as superfícies de cada amostra, superfície jateada e não jateada.

**Tabela 10 - Rugosidades Ra e Rz das superfícies jateadas e não jateadas dos corpos de prova.**

| <b>Corpo de prova</b> | <b>Ângulo de ataque</b> | <b>Pressão (psi)</b> | <b>Distância (mm)</b> | <b>Ra da superfície sem Shot Peening (<math>\mu\text{m}</math>)</b> | <b>Rz da superfície sem Shot Peening (<math>\mu\text{m}</math>)</b> | <b>Ra da superfície após Shot Peening (<math>\mu\text{m}</math>)</b> | <b>Rz da superfície após Shot Peening (<math>\mu\text{m}</math>)</b> |
|-----------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|---|---|--|--|
| 1                     | 60°                     | 35                   | 200                   | 0,0540  | 0,5520  | 1,710±0,25   | 12,50±1,83   |
| 2                     | 60°                     | 35                   | 300                   | 0,0418  | 0,5200  | 1,700±0,35   | 9,89±2,22  |
| 3                     | 60°                     | 53                   | 200                   | 0,0627  | 0,5530  | 1,940±0,35   | 11,20±2,64   |
| 4                     | 60°                     | 53                   | 300                   | 0,0576  | 0,3910  | 1,880±0,43   | 11,00±2,75   |
| 5                     | 80°                     | 35                   | 200                   | 0,0315  | 0,2560  | 1,610±0,26   | 9,04±1,21  |
| 6                     | 80°                     | 35                   | 300                   | 0,0393  | 0,2920  | 1,730±0,35   | 9,52±2,00  |
| 7                     | 80°                     | 53                   | 200                   | 0,0407  | 0,3070  | 1,780±0,38   | 9,48±1,94  |
| 8                     | 80°                     | 53                   | 300                   | 0,0634  | 0,4780  | 1,830±0,49   | 10,00±2,02   |

**Fonte: Autoria própria.**

Para facilitar o entendimento foi elaborado uma tabela comparando a diferença entre os valores de rugosidade que cada corpo de prova apresentou após o tratamento, conforme segue na Tabela 11 e 12 adiante.

**Tabela 11 - Aumento da rugosidade Ra dos corpos de prova quando submetido ao *Shot Peening*.**

| Corpo de prova | Ângulo de ataque | Pressão do ar do tratamento (psi) | Distância entre o corpo e jato (mm) | Diferença de rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ ) | Acréscimo percentual Ra |
|----------------|------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------|
| 1              | 60°              | 35                                | 200                                 | 1,6560                                       | 3067%                   |
| 2              | 60°              | 35                                | 300                                 | 1,6582                                       | 3967%                   |
| 3              | 60°              | 53                                | 200                                 | 1,8773                                       | 2994%                   |
| 4              | 60°              | 53                                | 300                                 | 1,8224                                       | 3164%                   |
| 5              | 80°              | 35                                | 200                                 | 1,5785                                       | 5011%                   |
| 6              | 80°              | 35                                | 300                                 | 1,6907                                       | 4302%                   |
| 7              | 80°              | 53                                | 200                                 | 1,7393                                       | 4273%                   |
| 8              | 80°              | 53                                | 300                                 | 1,7666                                       | 2786%                   |

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 12 - Aumento da rugosidade Rz dos corpos de prova quando submetido ao *Shot Peening*.**

| Corpo de prova | Ângulo de ataque | Pressão do ar do tratamento (psi) | Distância entre o corpo e jato (mm) | Diferença de rugosidade Rz ( $\mu\text{m}$ ) | Acréscimo percentual Rz |
|----------------|------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------|
| 1              | 60°              | 35                                | 200                                 | 11,9480                                      | 2164%                   |
| 2              | 60°              | 35                                | 300                                 | 9,3700                                       | 1802%                   |
| 3              | 60°              | 53                                | 200                                 | 10,6470                                      | 1925%                   |
| 4              | 60°              | 53                                | 300                                 | 10,6090                                      | 2713%                   |
| 5              | 80°              | 35                                | 200                                 | 8,7840                                       | 3431%                   |
| 6              | 80°              | 35                                | 300                                 | 9,2280                                       | 3160%                   |
| 7              | 80°              | 53                                | 200                                 | 9,1730                                       | 2988%                   |
| 8              | 80°              | 53                                | 300                                 | 9,5220                                       | 1992%                   |

Fonte: Autoria própria.

Através dos valores obtidos na Tabela 11 e com o auxílio do software STATISTICA 7.0 foi possível elaborar gráficos que apresentem a variação individual de cada uma das variáveis do tratamento na rugosidade média Ra, com um grau de confiabilidade de 95% (Figura 22, 23 e 24), juntamente com um gráfico de barras que visa demonstrar o índice de significância de cada variável na rugosidade média Ra (Figura 25).

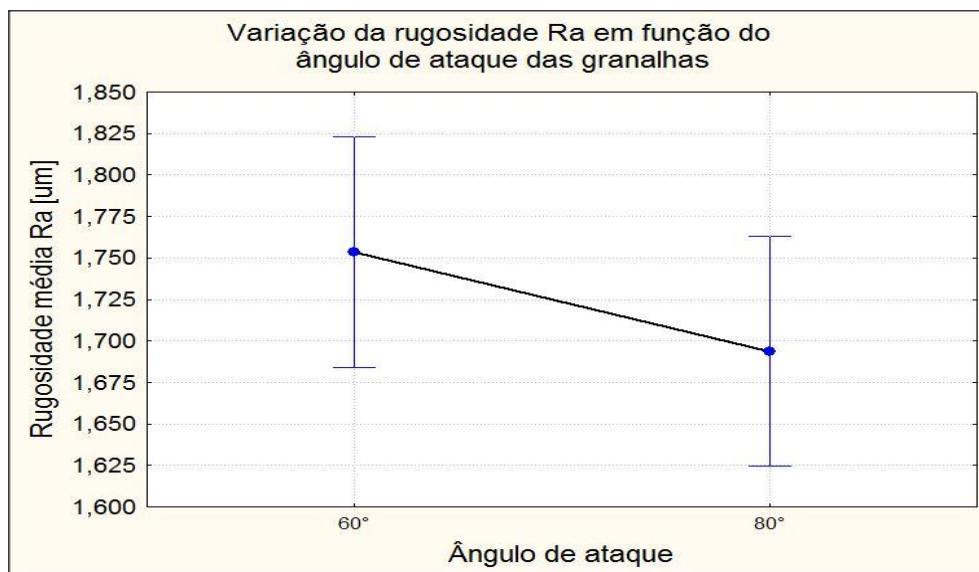


Figura 22 - Gráfico que apresenta a variação da rugosidade média Ra em função dos diferentes níveis de ângulo de ataque ensaiados.  
Fonte: Autoria própria.

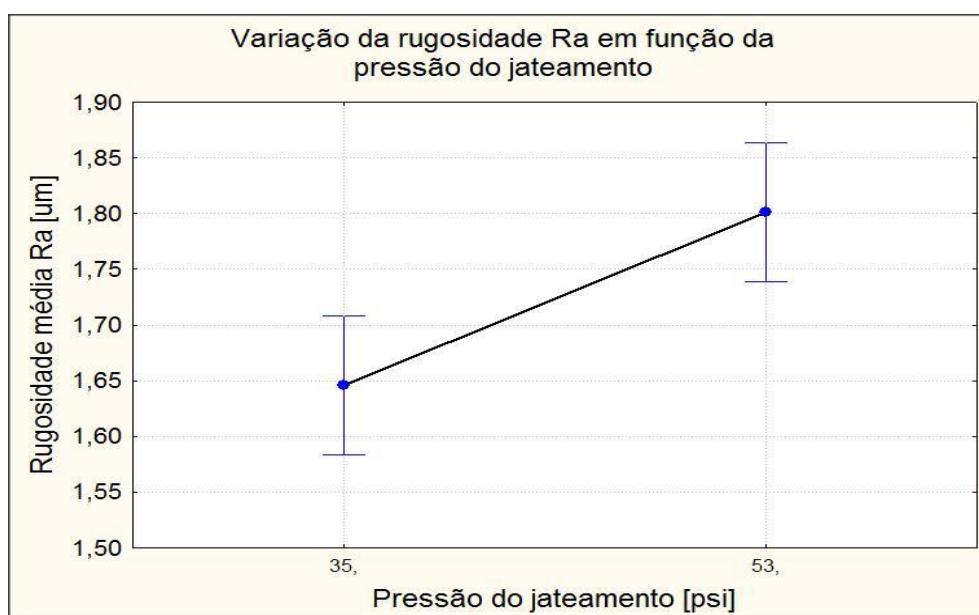


Figura 23 - Gráfico que apresenta a variação da rugosidade média Ra em função dos diferentes níveis de pressão do jateamento.  
Fonte: Autoria própria.



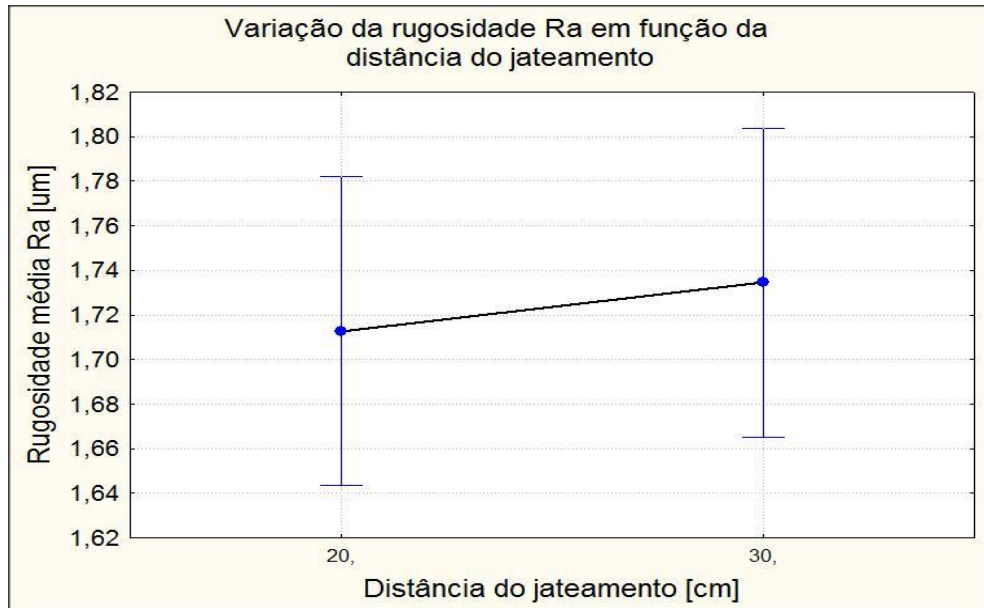


Figura 24 - Gráfico que apresenta a variação da rugosidade média Ra em função dos diferentes níveis de distância do jateamento.  
 Fonte: Autoria própria.

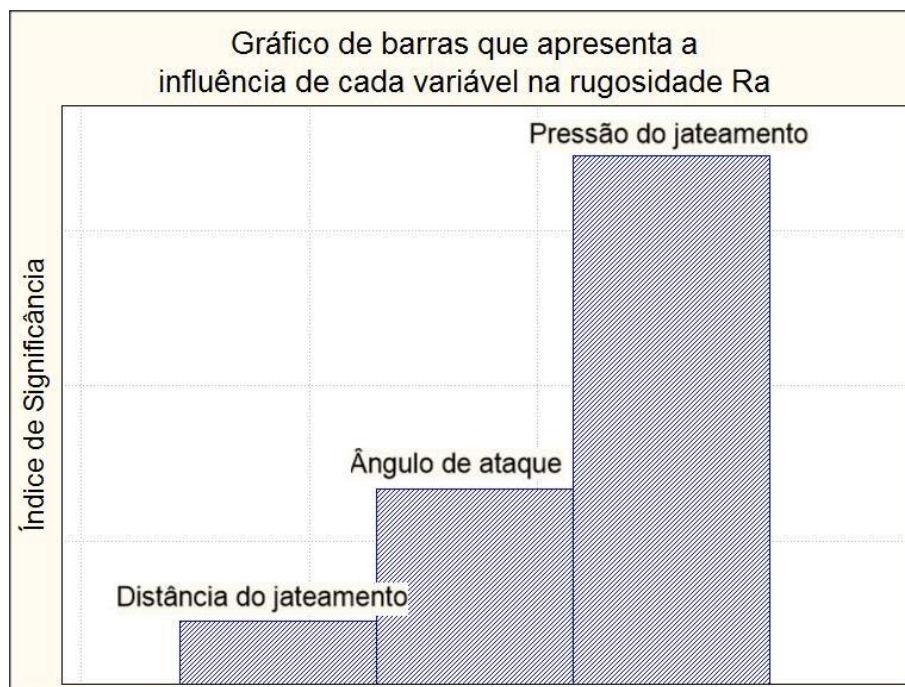


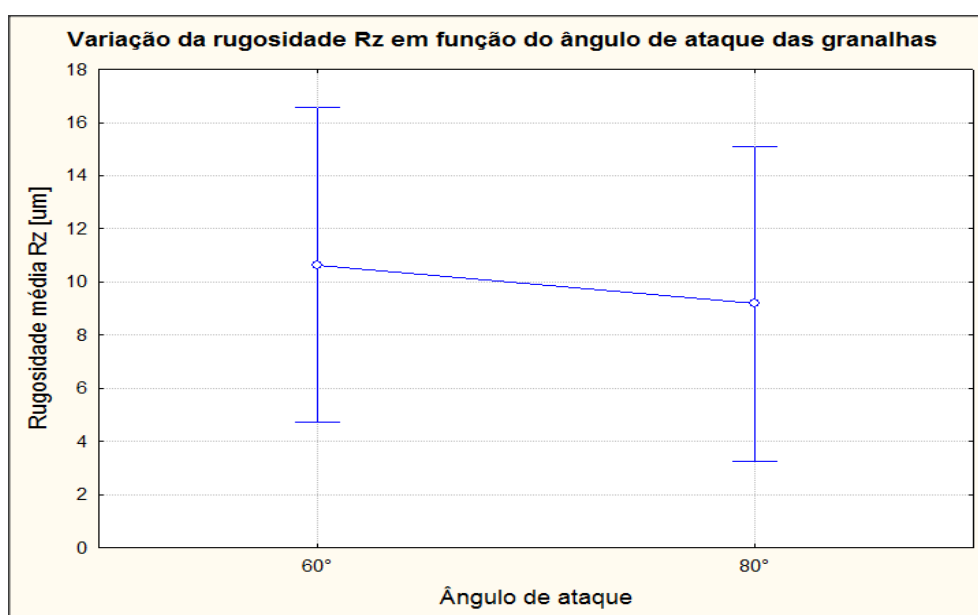
Figura 25 - Gráfico que apresenta a índice de significância de cada variável na rugosidade média Ra.  
 Fonte: Autoria própria.

Se relacionarmos as Figuras 22, 23, 24 e 25 apresentadas acima, nota-se que o principal parâmetro e o que apresenta maior significância na rugosidade média Ra foi a pressão do jateamento. Convém ressaltar que o ângulo de ataque e distância

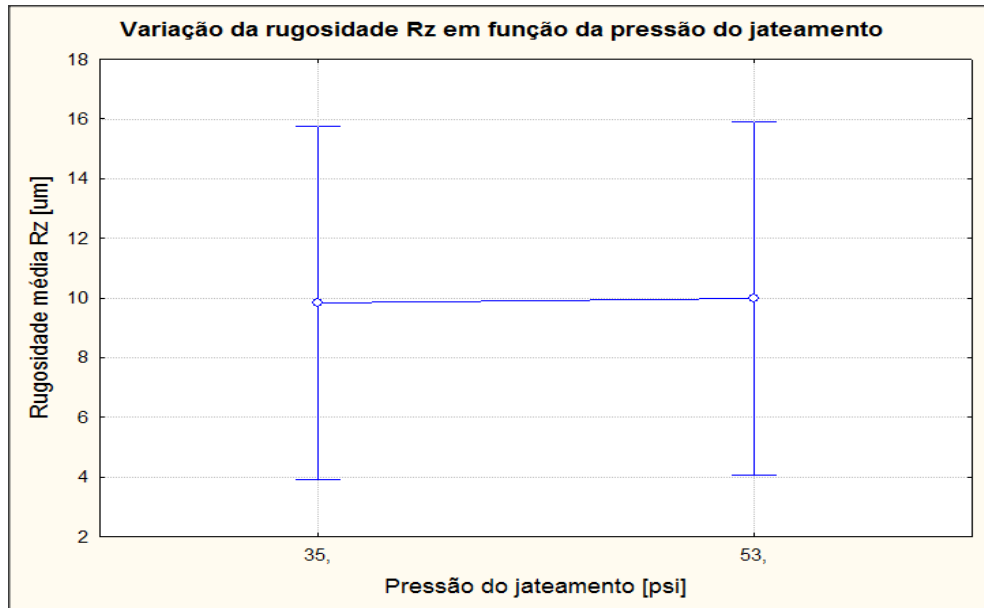
do jateamento não apresentaram influência significativa no resultado da rugosidade Ra, principalmente quando os mesmos são comparados com a pressão de jateamento, isto pode ser comprovado através da Figura 24.

Na Figura 22 é possível notar um aumento na média de 1,65  $\mu\text{m}$  para 1,80  $\mu\text{m}$  na rugosidade média Ra, entre as pressões de 35 e 53 psi, o que equivale a um aumento de aproximadamente 8,3 % em um intervalo de 18 psi.

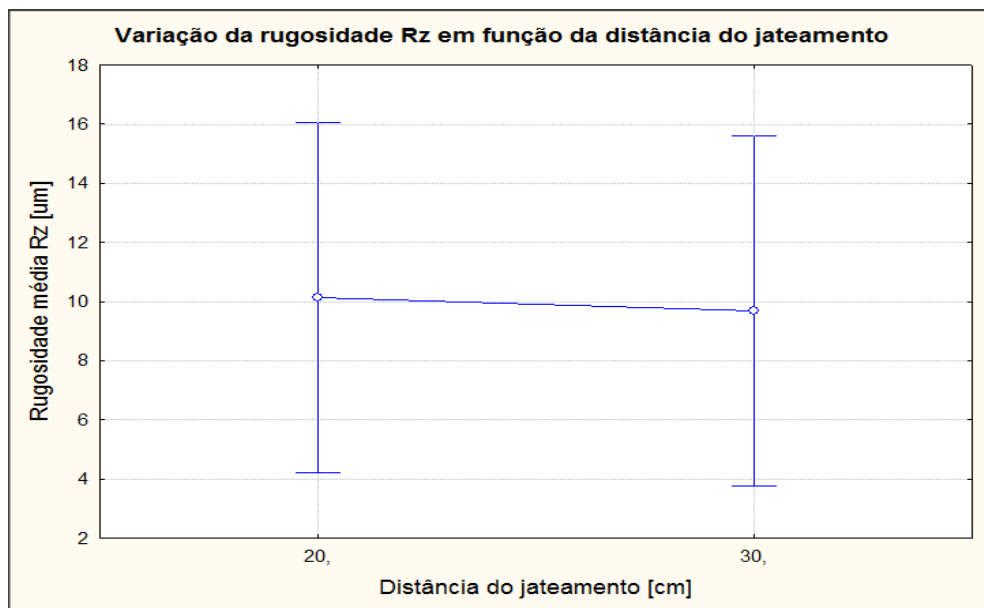
Analogamente as figuras anteriormente apresentadas para rugosidade Ra, as figuras 26, 27 e 28 seguintes correspondem a análises da rugosidade média Rz.



**Figura 26 - Gráfico que apresenta a variação da rugosidade média Rz em função dos diferentes níveis de ângulo de ataque ensaiados.**  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 27 - Gráfico que apresenta a variação da rugosidade média Rz em função dos diferentes níveis de pressão do jateamento.**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 28 - Gráfico que apresenta a variação da rugosidade média Rz em função dos diferentes níveis de distância do jateamento.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Sendo assim, observa-se que nenhuma das variáveis ensaiadas resultaram em variações significativas na rugosidade Rz, dentro de um grau de confiabilidade de 95 %.

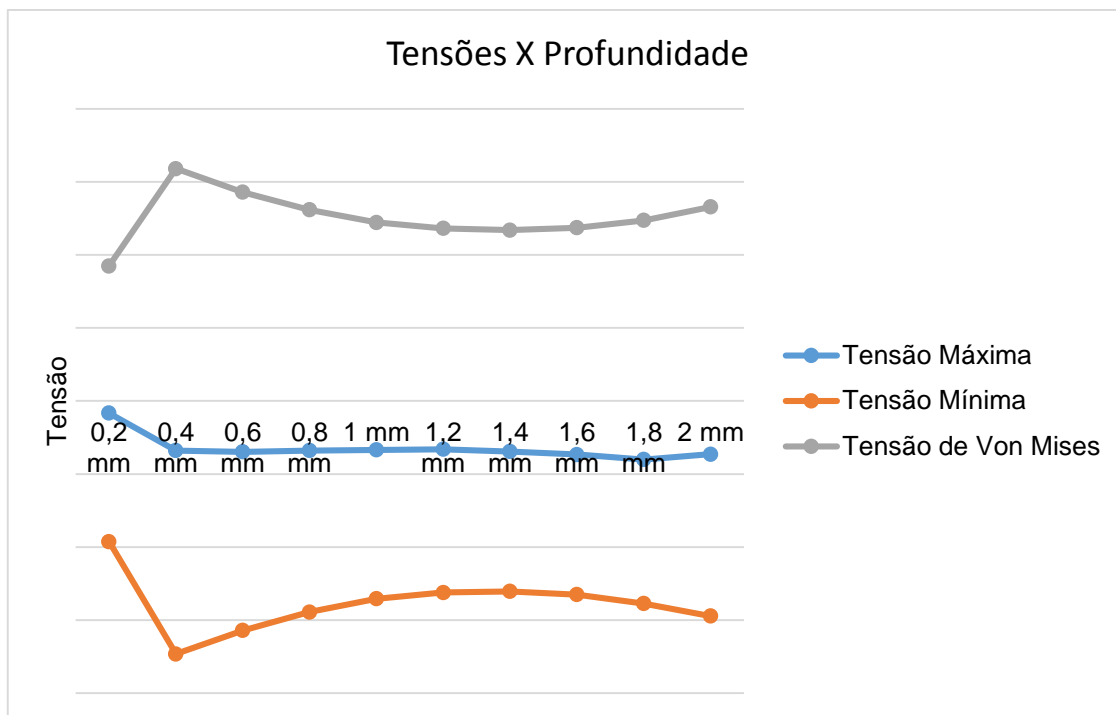
Nota-se que com a diferença nos níveis de pressão, ângulo e distância aplicados, e a quantidade de corpos de prova ensaiados, não foram suficientes para definir o comportamento da variação de rugosidade Rz. E portanto, não sendo possível definir a influência individual dos parâmetros.

#### 4.4 ANÁLISE DA TENSÃO RESIDUAL RESULTANTE DO TRATAMENTO DE *SHOT PEENING*

Antes de discorrer sobre os resultados obtidos, vale ressaltar que, devido a problemas com os extensômetros foi possível realizar apenas o ensaio de furo cego em 4 dentre as 8 amostras jateadas (amostras 3, 5, 7 e 8). Outro fator importante é que os valores de tensões não são apresentados, pois, os mesmos não podem ser trabalhados como valores absolutos e visa-se analisar apenas o comportamento das tensões.

Deixando de lado as limitações técnicas, uma primeira análise possível está em relação a profundidade da medição. Buscou-se relacionar a tensão acumulada máxima, mínima e tensão de Von Mises para cada furo (ponto de medição) em função da profundidade da medição, em intervalos de 0,2 mm até completar 2 mm.

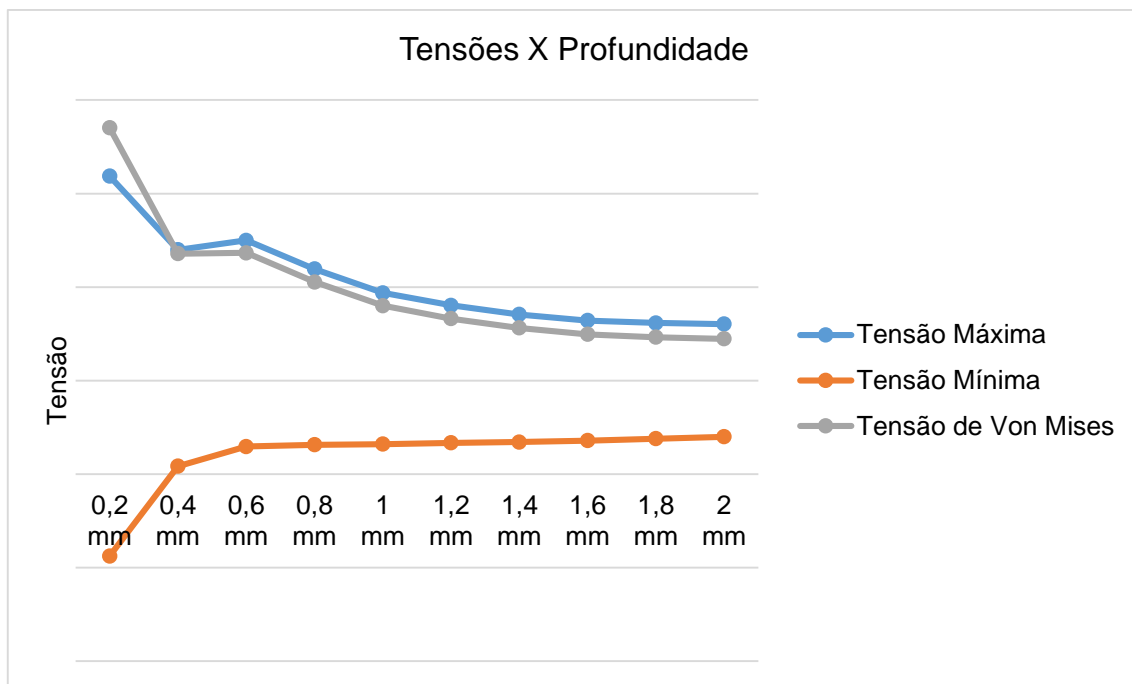
A Figura 29 apresenta o comportamento da tensão máxima, mínima e de Von Mises em função da profundidade do furo na região não jateada.



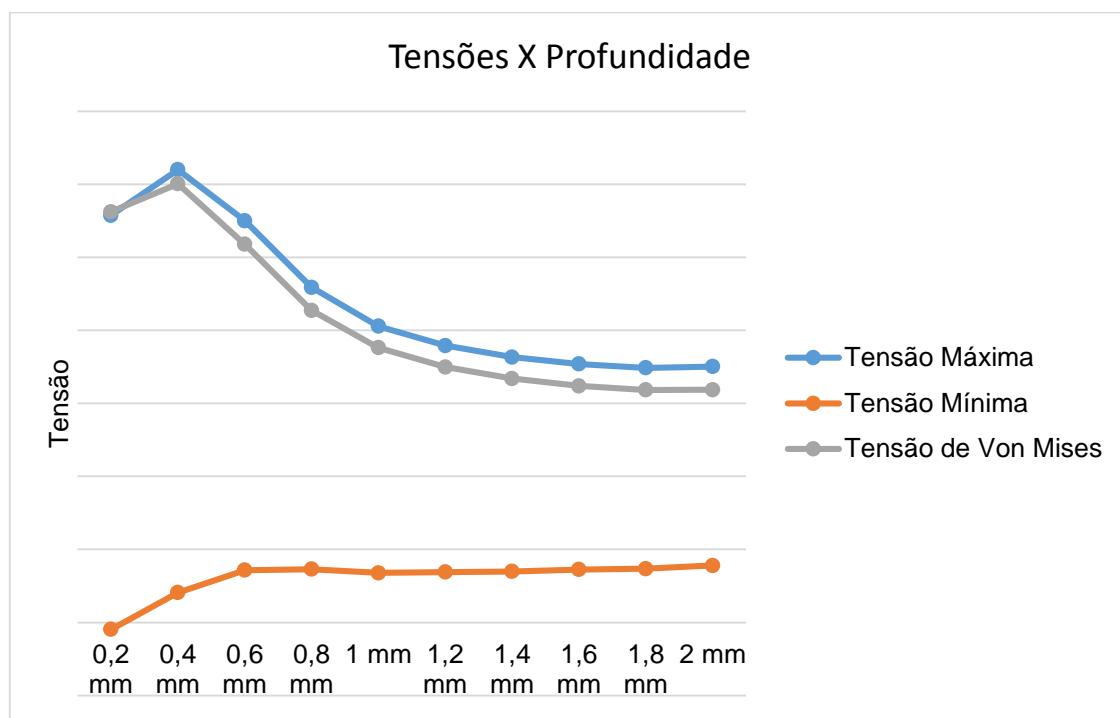
**Figura 29 - Gráfico que apresenta o comportamento das tensões em função da profundidade do furo na superfície não jateada da amostra 7.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Vale lembrar que esses valores foram obtidos no ensaio de furo cego na amostra 7, no entanto, devido a metodologia aplicada, todas as amostras devem apresentar os mesmos valores na superfície não jateada. Deste modo, serão usados como base estes valores para as regiões não jateadas de todas as amostras. Principalmente os valores da Tensão de Von Mises, uma vez que esta relaciona as tensão máximas e mínimas.

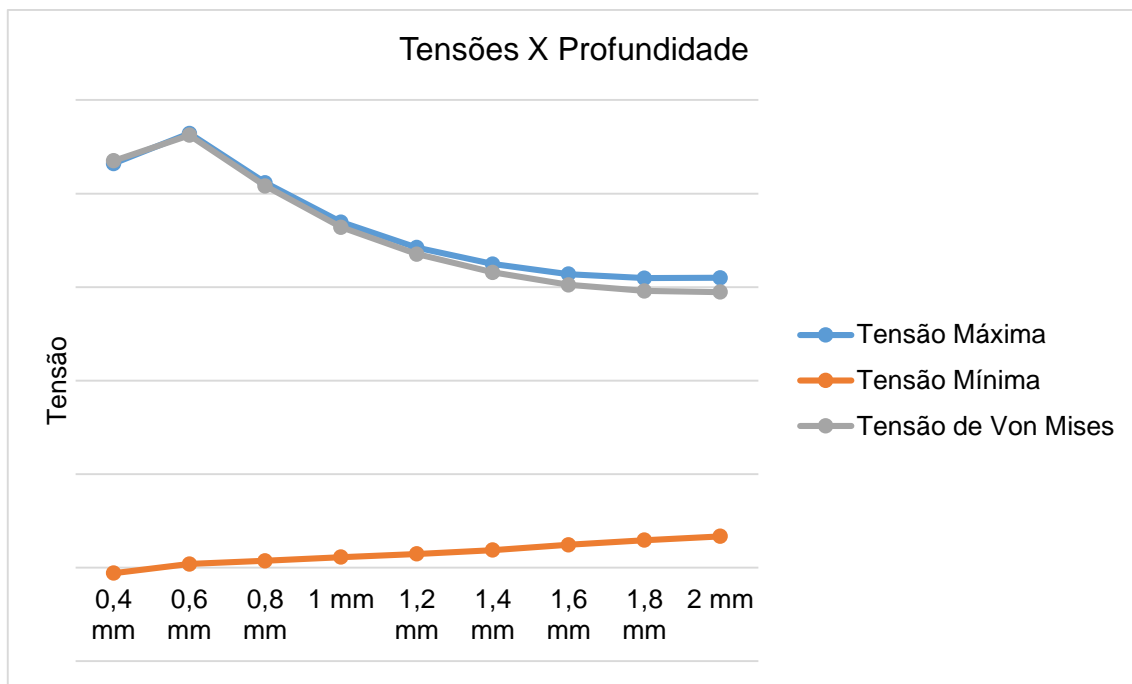
Nas Figuras 30, 31, 32 e 33 a seguir, é apresentado o comportamento de cada tensão em função da profundidade do furo na superfície submetida ao tratamento de *Shot Peening*, amostras 3, 5, 7 e 8 respectivamente.



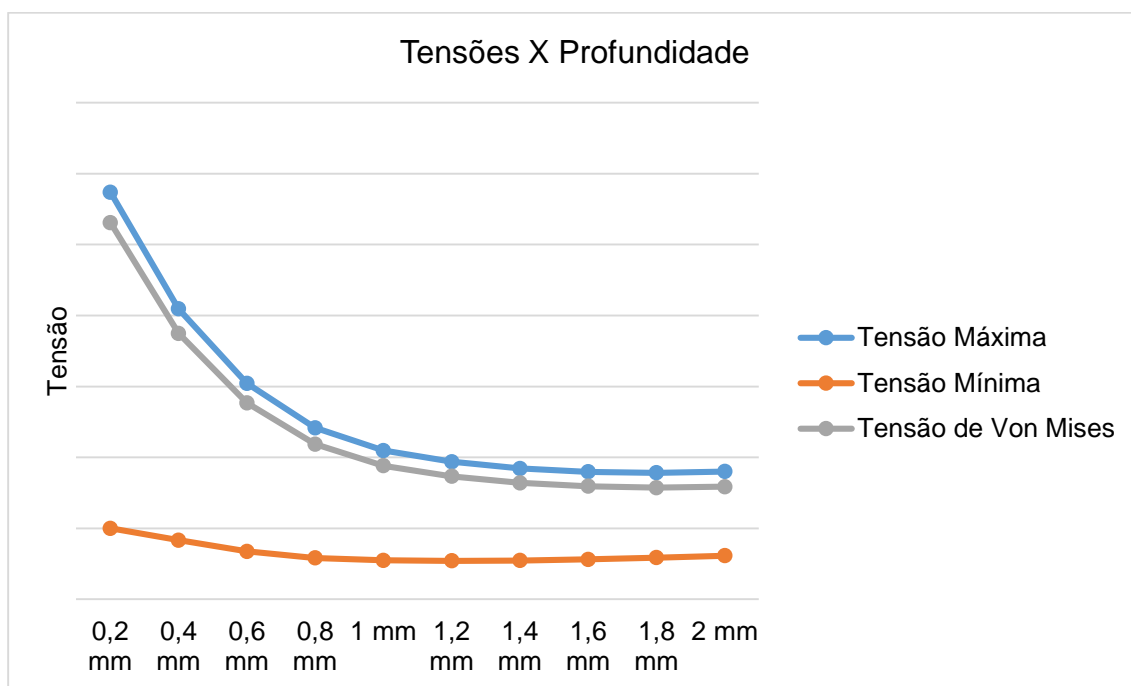
**Figura 30 - Gráfico que apresenta o comportamento das tensões em função da profundidade do furo na superfície jateada da amostra 3.**  
 Fonte: Autoria própria.



**Figura 31 - Gráfico que apresenta o comportamento das tensões em função da profundidade do furo na superfície jateada da amostra 5.**  
 Fonte: Autoria própria.



**Figura 32 - Gráfico que apresenta o comportamento das tensões em função da profundidade do furo na superfície jateada da amostra 7.**  
 Fonte: Autoria própria.



**Figura 33 - Gráfico que apresenta o comportamento das tensões em função da profundidade do furo na superfície jateada da amostra 8.**  
 Fonte: Autoria própria.

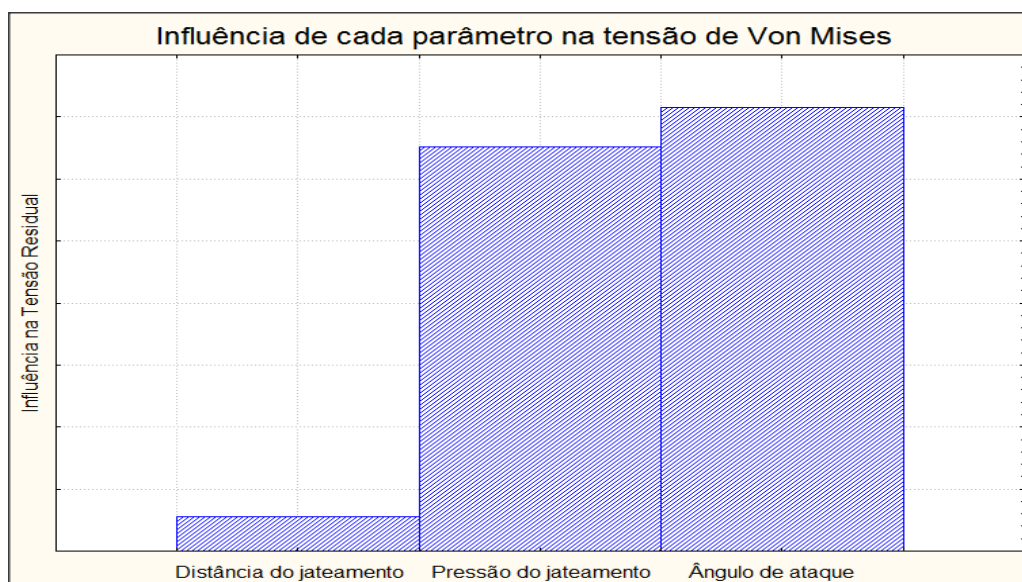
É notável através das figuras anteriormente apresentadas que quanto maior a profundidade, menores são os valores da tensão de Von Mises. Isso se

justifica uma vez que, quanto maior a profundidade, mais distante essa camada está da região que sofreu o jateamento, e conseqüentemente menor será a sua intensidade (em módulo).

É possível perceber também que nas camadas próximas a 0,4 mm de espessura aconteceu em todos os ensaios uma mudança significativa de comportamento. Porém, como os valores obtidos no ensaio não podem ser considerados como absolutos, não pode-se afirmar com clareza que tipo de mudança houve, mas sim, que retrata apenas a profundidade onde cada amostra apresenta uma variação brusca de acúmulo de tensão.

Nota-se também que independente dos parâmetros utilizados durante o *Shot Peening* (ângulo, pressão e distância) este decréscimo no acúmulo de tensão acontece, variando apenas a intensidade do comportamento. Deste modo, a seguir foram elaborados gráficos que permitem verificar a influência individual destes parâmetros.

A Figura 34 adiante, obtida com o auxílio do software STATISTICA 7.0, visa demonstrar a influência de cada variável do tratamento de *Shot Peening* na tensão residual.

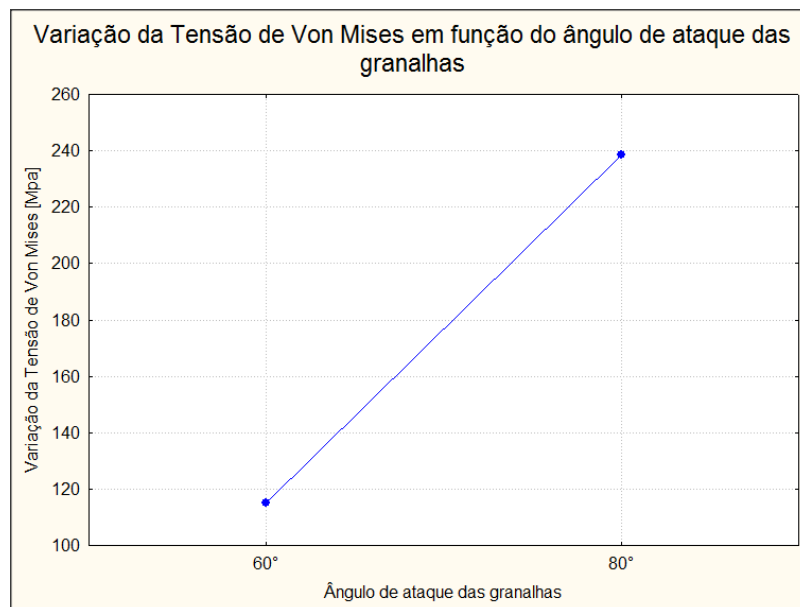


**Figura 34 - Gráfico que apresenta a influência de cada variável na tensão residual.**  
Fonte: Autoria própria.

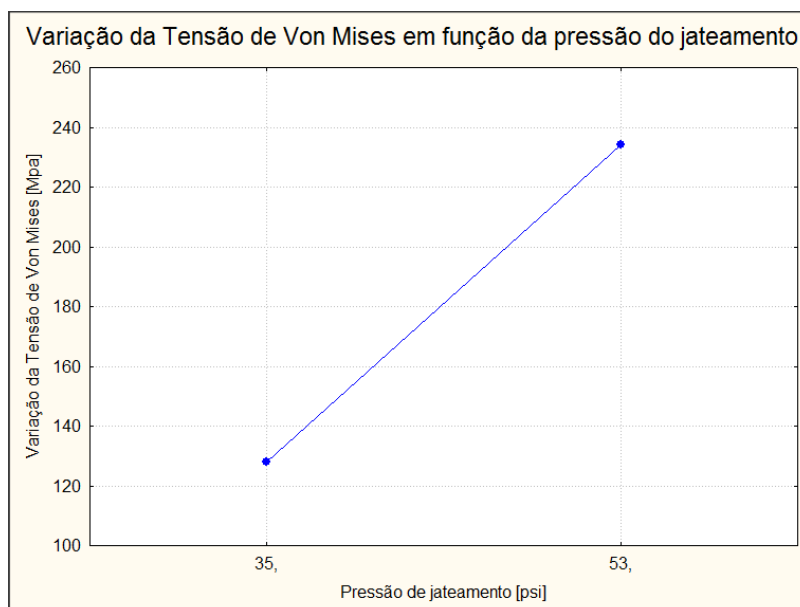
A seguir serão apresentados gráficos referente a variação da tensão de Von Mises em função de cada um dos parâmetros do *Shot Peening*. Figuras 35, 36 e 37.



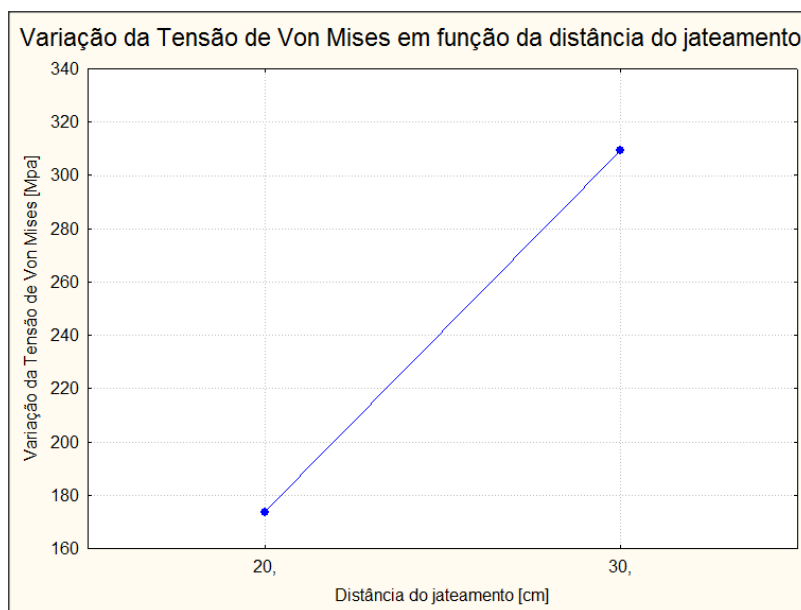
É importante ressaltar que o eixo das ordenadas trata-se dos valores de tensão de Von Mises da superfície jateada menos os valores da superfície não jateada de cada uma das amostras.



**Figura 35 - Gráfico que apresenta a influência do ângulo de ataque na tensão de Von Mises.**  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 36 - Gráfico que apresenta a influência da pressão de jateamento na tensão de Von Mises.**  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 37 - Gráfico que apresenta a influência da distância do jateamento na tensão de Von Mises.**

**Fonte: Autoria própria.**

Conforme os gráficos anteriores, é possível perceber que os parâmetros que mais influenciaram foram pressão do jateamento e ângulo de ataque das granalhas, enquanto que a variável distância apresentou uma significância muito inferior.

Visto que foi possível efetuar apenas a leitura de 4 diferentes amostras, não há como definir um índice de confiabilidade dos resultados, como foi feito nos tópicos anteriores. Porém, nota-se de acordo com as Figuras 35, 36 e 37 que a intensidade da tensão de Von Mises aumenta conforme aumenta o ângulo de ataque, pressão do jateamento e até mesmo a distância do tratamento.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de *Shot Peening* se mostrou capaz de promover diversas alterações na superfície das chapas. Sendo que neste trabalho foi estudado a influência de cada um dos parâmetros, pressão, ângulo e distância do jateamento na dureza superficial, rugosidade e tensão residual do aço.

No tocante a variação de massa das amostras, percebeu-se que com as condições de tratamento aplicadas, não houve variação significativa em nenhum dos corpos de prova.

Em relação a microdureza, foi evidente que houve acréscimo significativo na dureza superficial após o jateamento, sendo que o fator que mais influenciou no endurecimento superficial foi o ângulo de ataque. Notou-se que 80° foi o suficiente para que houvesse perda na eficiência do tratamento, tornando 60° mais efetivo.

Para rugosidade, o parâmetro que apresentou maior significância na rugosidade média Ra foi a pressão do jateamento. Convém ressaltar que o ângulo de ataque e distância do jateamento não apresentaram influência significativa no resultado da rugosidade Ra. Enquanto que para rugosidade Rz, nenhum dos parâmetros influenciou.

No ensaio de furo cego, para mensurar a tensão residual, foi possível concluir que houve um decréscimo da intensidade da tensão de Von Mises em função do aumento da profundidade do furo, independente dos parâmetros de *Shot Peening* aplicados. Outra conclusão pertinente, que a distância do jateamento foi a que menos influenciou na tensão de Von Mises, enquanto que a pressão e ângulo de ataque afetaram na mesma intensidade.

## 6 REFERÊNCIAS

ALLENSTEIN, Ângela Nardelli. **Estudo da resistência à cavitação do aço inoxidável Martensítico CA6-NM Nitretado por plasma.** 2007.

ASTM A 743/A 743M – 98aε1. **Standard Specification for Castings, Iron-Chromium, Iron-Chromium-Nickel, Corrosion Resistant, for General Application.**

BARBOSA, Bruno Roberto de; TEODÓSIO, Joel Regueira; NETTO, Theodoro Antoun. **Evolução do estado de tensões residuais introduzidas por Shot Peening em aços inoxidáveis martensíticos.** 2003

BLODGETT, Mark P.; NAGY, Peter B. **Eddy current assessment of near-surface residual stress in shot-peened nickel-base superalloys.** Journal of Nondestructive Evaluation, v. 23, n. 3, p. 107-123, 2004.

BRASIBRAS. **Jateamento.** Disponível em: <<http://www.brasibras.com.br>>. Acesso em: 17 jan. 2014.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** 6ª Ed. São Paulo: ABM, 1990.

CHUVAS, T. C. Cindra Fonseca, M. P. PARDAL, Juan Manuel. MAINIER, Fernando. **Influência do tratamento de Shot Peening nas tensões residuais de justas soldadas de aços bifásicos e IF.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011, Caxias do Sul. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011.

CLÁUDIO, R. A. et al. **Fatigue life prediction of shot peened components.** Ciência & Tecnologia dos Materiais, v. 20, n. 1-2, p. 99-105, 2008.

CMV. **Shot Peening.** 2014. Disponível em: <<http://www.cmv.com.br>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

COFIÑO, Rachel Cristina, **Análise das tensões residuais em uma junta soldada em condição overmatch.** São Bernardo do Campo, 2010.

COSTA, Midori Yoshikawa Pitanga et al. **Evaluation of Shot Peening on the fatigue strength of anodized Ti-6Al-4V alloy.** Mat. Res. (online). 2006, vol.9, n.1, pp. 107-

109. ISSN 1516-1439. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392006000100020>>. Acesso em: 02 jan 2014.

DONATO, Gustavo H. B. **Efeitos de Heterogeneidades Mecânicas sobre Forças Motrizes de Trinca em Juntas Soldadas: Determinação Experimental de Tenacidade e Extensão de Metodologias de Avaliação de Criticidade de Defeitos**. 2008. 284 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FOLKHARD, Erich; RABENSTEINER, Günther; PERTENEDER, Ernst. ***Welding metallurgy of stainless steels***. New York, NY: Springer-Verlag, 1988.

GOOCH, T. G. ***Heat Treatment of Welding 13%Cr-4%Ni Martensitic Stainless Steel for Sour Service***. Welding Research Supplement. July, 1995, p 213-222.

GOUVEIA, Ruimar R. de. **A influência da temperatura de interpasse na tenacidade do metal de solda na soldagem multipasse do aço inoxidável martensítico CA6NM pelo processo TIG**. 2008.

GRACIOSO, José Francisco Fadel. **Efeito das condições de têmpera na microestrutura e propriedades mecânicas de um aço inoxidável martensítico fundido CA6NM**. 2003.

HIGOUNENC, Olivier. ***Correlation of Shot Peening parameters to surface characteristic***. Schulze, V. and Niku-Lari, A.(eds). *Shot Peening and other Mechanical Surface Treatments*, IITT-International, Marne la Vallee, v. 28, 2005.

HERNANDEZ, A. F. **Estudo da Influência da Criogenia na Resistência ao Desgaste Abrasivo do Aço ASTM 743 Tipo CA6NM**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília DF, 2009.

INFOMET, **Informações britadas, fundidas e laminadas**. Disponível em: <[www.infomet.com.br/](http://www.infomet.com.br/)>. Acesso em: 20 Dez. 2013

KOCKELMANN, H. E., SCHWARZ, T. ***Die Bohrlochmethode—ein für viele Anwendungsbereiche optimales Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen***, *Messtechnische Briefe von HBM*, 29(2), pp. 33–38, 1993

LU, J. ***Handbook of Measurement of Residual Stresses***, 1 ed., Senlis, France, Society for Experimental Mechanics - Inc., 1996.

MARIANO, Neide Aparecida et al. **Caracterização da temperabilidade e das curvas de transformação de fases de aços inoxidáveis martensíticos do tipo FeCrNi.** *Rem: Rev. Esc. Minas* [online]. 2007, vol.60, n.1, pp. 163-167. ISSN 0370-4467.

MODENESI, Paulo J. **Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico.** 2008. Dissertação – Universidade Federal de Minas Gerais, Pampulha, 2008. Disponível em: <[http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/tensao\\_residual.pdf](http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/tensao_residual.pdf) >. Acesso em 15 dez. 2013.

NASCIMENTO, Alexandre Gomes. **Avaliação da resistência à fadiga de aços CA6NM submetidos a tratamento criogênico e nitretação iônica.** 2012.

NÚCLEO INOX, **Guia Brasileiro do Aço Inox**, 2001.

OLIVEIRA, A.S.D. Notas de aula sobre aços inoxidáveis da UFPR. 2004. Em slides.

OLIVEIRA, R. R. de. et al. **Avaliação da tensão residual em alumínio 7050 conformadas pelo processo *Peen Forming*.** 2011

PADILHA, A. F.; GUEDES, L.C. **Aços inoxidáveis Austeníticos: Microestruturas e Propriedades**, Hemus Editora Limitada, S.P, 1994.

PEDROSA, P. D. **Variação do Estado de Tensões Residuais Introduzidas por *Shot Peening* em Aço Duplex uns 31803 Durante Ciclos de Fadiga.** 2007. 188p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2007.

PUKASIEWICZ, MGA. **Propagação de trincas por fadiga em juntas soldadas do aço inoxidável martensítico tipo CA6NM–.** 2002. Tese de Doutorado. Dissertação de mestrado, Curitiba.

REGO, Ronnie Rodrigo. **Influência do uso de Distribuição Bimodal de Classes de Granalha no Processo de *Shot Peening* sobre o Perfil de Tensões Residuais de Engrenagens.** SENAI Cimatec. Salvador, 2011.

RIBEIRO, J. E.; VAZ, M. A. P.; PILOTO, P. A. G. **Medição de campos de tensões residuais: estudo preliminar.** 2003.

ROCHA, A.S.; NUNES, R.M and HIRSCH, T.K.. **Comparação entre difração de raios X e "método do furo cego" para medição de tensões residuais em barras cilíndricas.** *Matéria* (Rio J.) (online). 2009, vol.14, n.3, pp. 965-976. ISSN 1517-7076.

RODRIGUES, L.D., **Medição de tensões residuais em tubos visando a determinação de esforços em dutos enterrados,** Dissertação M.Sc, DEM, PUC-Rio, abril 2007.

ROHWEDER, Anderson, et al. **Shot Peening jateamento por granalha.** Centro universitário Católica de Santa Catarina, Curso de Engenharia mecânica ciência e tecnologia dos materiais, 2011. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/91647086/Shot-Peening-Jateamento-por-Granalha-Ciencia-e-Tecnologia-dos-Materiais>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

SCURACCHIO, Bruno Geoffroy. **Tensões residuais induzidas por Shot Peening e durabilidade de molas em lâmina.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SOARES, A.C.C. **Avaliação dos efeitos da plasticidade na medição de tensões residuais pela técnica do furo cego.** Rio de Janeiro, 2003. 236p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

SOUZA, Erich Douglas de. **Análise do efeito da tensão média sobre a resistência à fadiga do aço astm a743 ca6nm.** 2012.

SPM, Shot peening. **Course about structural failure and cases study.** Curso Sobre Ruína de Sistemas e Estudo de Casos, 2001.

STRAUBE, H. **Developments for Additional Improvement of Low Carbon Martensitic Cr-Ni Stainless Steels.** Conference on Materials Development in Turbo Machinery Design. Cambridge, UK, Set. p 12-14, 1988.

TECGAL. **Acabamentos Superficiais.** Disponível em:<<http://www.tecgal.com>>. Acesso em: 17 dez. 2013.

THIBAUT, D. Bocher P, Thomas M. **Residual stress and microstructure in welds of 13%Cr-4%Ni martensitic stainless steel.** *J Mater Process Tech.* 2009;209:2195-02.

VALENTE, T. et al. ***Implementation and development of the incremental hole drilling method for the measurement of residual stress in thermal spray coatings.*** Journal of thermal spray technology, v. 14, n. 4, p. 462-470, 2005.

WINCK, Licurgo Borges. **Influência da nitretação a plasma no comportamento em fadiga do aço ASTM 743 tipo CA6NM.** 2011.