INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Efeito do estiramento à frio no aço utilizado na fabricação de rodas avaliado
por propriedades mecânicas e por tensões residuais**

MILTON ALVES ALENCAR

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Materiais**

Orientador:

Prof. Dr. Cristiano Stefano Mucsi

São Paulo

2020

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Efeito do estiramento à frio no aço utilizado na fabricação de rodas avaliado
por propriedades mecânicas e por tensões residuais**

Versão Corrigida

Versão Original disponível no IPEN

MILTON ALVES ALENCAR

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Materiais**

Orientador:

Prof. Dr. Cristiano Stefano Mucsi

São Paulo

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

ALENCAR, M. A. ***Efeito do estiramento à frio no aço utilizado na fabricação de rodas avaliado por propriedades mecânicas e por tensões residuais***. 2020. 82 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

<p>Alencar, Milton Alves Efeito do estiramento à frio no aço utilizado na fabricação de rodas avaliado por propriedades mecânicas e por tensões residuais / Milton Alves Alencar; orientador Cristiano Stefano Mucsi. -- São Paulo, 2020. 82 p.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2020.</p> <p>1. Estiramento. 2. Análise de tensões residuais. 3. Difração de raios X. 4. Correlação de imagens digitais (DIC).</p> <p>I. Mucsi, Cristiano Stefano, orient. II. Título.</p>

RESUMO

ALENCAR, M. A. **Efeito do estiramento à frio no aço utilizado na fabricação de rodas avaliado por propriedades mecânicas e por tensões residuais**. 2020. 82 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, Universidade de São Paulo. São Paulo.

Este estudo tem como objetivo a investigação e análise das propriedades mecânicas antes e depois dos processos de soldagem e estiramento (repuxo por revolução), do aço utilizado na fabricação de rodas para caminhões e ônibus. O estiramento na fabricação de rodas é utilizado para aumentar a largura do componente aro com a redução de espessura, e na conformação do componente disco, que devem atender aos perfis determinados em projeto, de modo a resistir aos esforços de fadiga por ciclagem e de momentos de flexão e torção, alternados. A presente proposta é estudar os efeitos do processo de estiramento no material da roda, pois com o melhor entendimento destes efeitos, pode-se maximizar a otimização da massa da roda, um grande objetivo a ser alcançado para o setor de fabricação de rodas de aço. Os métodos propostos para a identificação dos efeitos do estiramento no aço empregado para a fabricação de rodas foram ensaios de tração, análise metalográfica, análise do comportamento das deformações do material utilizando a técnica de correlação de imagens digitais (DIC), e medidas de tensões residuais por difração de raios X (SAE HS 784, 2003), somados a mapas de dureza, executados no material antes e após o processo de estiramento. As variações dos percentuais de redução de espessuras no processo de estiramento foram correlacionadas com as variações de resistência a tração. Isto para verificação da relação da variação de espessura com a variação dos valores de resistência a tração. E observou-se um aumento na tensão de ruptura a tração a cada aumento de percentual de redução de espessura do material no estiramento, chegando a um aumento de 50% na resistência a tração, numa redução de 55% na espessura da matéria prima, com a consequente perda de deformação. Nas regiões soldadas e afetadas pela solda foram identificadas somente tensões

residuais compressivas, de grande importância para o aspecto funcional do componente.

Palavras-chave: Estiramento, Análise de tensões residuais, Difração de raios X, Correlação de Imagens Digitais (DIC).

ABSTRACT

ALENCAR, M. A. **Cold metal spinning's effect in the steel used to fabricate wheels evaluated by mechanic properties and residual stresses**. 2020. 82 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, Universidade de São Paulo

This research aims investigate and analyze the mechanical properties before and after the welding and spinning process of the steel used in the fabrication of wheels for buses and heavy trucks. The metal spinning process in the manufacturing of the wheels is used to widen the width of the rim, and in working the shape of the disc, that must be in accordance to the design project, in order to be approved in the bending and torsion fatigue testing. The present approach of this research is to better understand of the metal spinning effects, to maximize the optimization of the wheel mass, one of the biggest aims to be achieved by the wheel industries. The methods proposed to identify the metal spinning effects in the wheel's steel were tensile test, metallographic analyses, the material's deformation behavior using digital image correlation (DIC), and the residual stresses measures by X-Ray diffraction (SAE HS 784, 2003), added to hardness maps, executed on the material surface before and after of the metal spinning process. The percentual variations of reduction were correlated to tensile tests results. This was done to verify the relation between the thickness of the raw material and the tensile stress x strain curves behaviour. The results show an increase of 50% in the tensile strength for the raw material reduced 55% in thickness, and consequent loss in the maximum strain. Only compressive residual stresses were observed by DRX residual stress analysis, a desired product's functional aspect.

Key words: Metal spinning, Residual stresses analysis, X-Ray Diffraction, Digital Images Correlation (DIC)

A minha esposa Maria Aparecida, que sempre é minha energia motriz, e minhas filhas Beatriz e Giovana, que nutrem minha eterna vontade de aprender.

AGRADECIMENTOS

Aos professores doutores Cristiano Mucsi, Jesualdo Rossi e Luzinete Barbosa, pelos exemplos de dedicação e ética profissional, pelo apoio na execução deste trabalho e pela oportunidade de participar do grupo de pesquisa.

As instituições como a Fatec Itaquera e o Grupo Maxion, pela colaboração na obtenção e construção do material de pesquisa.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

SUMÁRIO

Página

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. A fabricação de rodas de aço.....	16
2. FINALIDADE, OBJETIVO E JUSTIFICATIVA.....	21
2.1. Finalidade.....	21
2.2. Objetivo.....	21
2.3. Justificativa.....	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1. Estiramento (<i>metal spinning</i>).....	22
3.2. Classificação e características do processo de estiramento.....	23
3.3. Aços carbono.....	27
3.4. Dureza.....	30
3.4.1. Dureza Brinell.....	31
3.4.2. Dureza Rockwell.....	32
3.4.3. Dureza Vickers.....	34
3.5. Tensão residual.....	36
3.5.1. Técnicas de medição.....	37
3.5.2. Difração de raios X (DRX).....	39
3.5.3. Fundamentos do comportamento linear elástico.....	40
3.5.4. A lei de Bragg.....	41
3.5.5. Medição das deformações com DRX.....	42
3.5.6. Cálculo das tensões.....	44
3.6. Correlação de imagem digital (DIC).....	47
3.7. Ensaio de tração.....	48
3.7.1. Ensaio de tração convencional.....	49
3.7.2. Propriedades mecânicas identificadas pelo ensaio de tração convencional.....	49
3.8. Soldagem.....	52
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
4.1. Materiais.....	55
4.2. Métodos.....	55
4.3. Ensaio de tração.....	56
4.4. Correlação de imagens digitais (DIC).....	59

4.5. Microscopia óptica.....	60
Preparação das amostras para análise em microscopia óptica	61
4.6. Difração por raios X.....	63
4.7. Dureza Vickers	65
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
6. CONCLUSÃO	78
REFERÊNCIAS.....	79

LISTA DE TABELAS**Página**

Tabela 1 - Classificação dos aços.....	27
Tabela 2 - Efeito do tamanho de grão austenítico sobre certas características dos aços.....	29
Tabela 3 - Limites aproximados dos elementos na composição química de um aço baixo carbono.....	30
Tabela 4 - Escalas de dureza Rockwell e aplicações típicas.	33
Tabela 5 - Coeficientes para conversão de HR e HB.....	34
Tabela 6 - Comparativo dos métodos de medição de tensão residual.....	38
Tabela 7 - Composição química (% massa) do material do aro	55
Tabela 8 - Composição química (% massa) do material do disco.....	55
Tabela 9 - Corpos de prova do material do disco.....	59
Tabela 10 - Corpos de prova do material do aro	59
Tabela 11 - Comportamento das tensões e deformações no material do ao aro.	67
Tabela 12 - Comportamento das tensões e deformações no material do ao disco...67	

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1 - Exemplos de rodas: (a) de alumínio e (b) de aço, para caminhões e ônibus.....	15
Figura 2 - Esquema do processo de fabricação de discos para rodas de caminhão 15º.....	16
Figura 3 - Exemplo de rodas de aço: a) 5º com câmara e b) 15º sem câmara.	17
Figura 4 - Estiramento de aro.....	17
Figura 5 - Imagem de máquina CNC para estiramento do disco de rodas de aço. ...	19
Figura 6 - Imagem do processo de estiramento.	19
Figura 7 - Desenho esquemático do processo de estiramento.	23
Figura 8 - Estiramento de cisalhamento. Fonte: (MUSIC, ALLWOOD e KAWAI, 2010).	24
Figura 9 - Estiramento convencional.	24
Figura 10 - Estiramento linear.	24
Figura 11 - Relação entre tensões e sentido de avanço do rolete.	25
Figura 12 - Relação entre espessura inicial e final no estiramento de cisalhamento.	26
Figura 13 - Aspecto micrográfico de aço moldado no estado bruto de fusão.....	28
Figura 14 - Aspecto micrográfico de aço duro encruado por martelamento a frio.	29
Figura 15 - Método para obtenção da dureza Brinell.	31
Figura 16 - Sequência esquemática de leitura de dureza Rockwell.	32
Figura 17 - Relação entre impressão Vickers e Brinell.....	35
Figura 18 - Desenho de uma impressão Vickers.....	35
Figura 19 - Emissão de raios X.	40
Figura 20 - Elipsoide da tensão deformação com as unidades utilizadas na análise de tensão por difração de raios X. Fonte: (SAE INTERNATIONAL, 2003)	41
Figura 21 - Representação de raios X sendo difratados pelos planos A-A e B-B'.....	42
Figura 22 - Sistema de coordenadas usado para o cálculo das deformações e tensões.....	43
Figura 23 - Esquema de planos de difração e tensões em uma amostra.	45

Figura 24 - Exemplo de gráfico $\sin 2\psi$ vs. d .	46
Figura 25 - Exemplos de curvas $\sin 2\psi$ vs. d .	46
Figura 26 - Exemplos de pinturas matizadas.	48
Figura 27 - Barra solicitada pela força Q .	49
Figura 28 - Tensão deformação típico de um material metálico.	50
Figura 29 - Princípios da soldagem a topo por centelhamento e suas etapas.	54
Figura 30 - Quadro de caracterização dos métodos adotados para caracterização do material. Fonte: O autor.	55
Figura 31 - Dimensões do corpo de prova, conforme ASTM E8 (<i>sub size</i>).	56
Figura 32 - Detalhe da usinagem dos corpos de prova. Fonte: O autor.	56
Figura 33 - Detalhe da retirada dos corpos de prova da região soldada a topo do aro.	57
Figura 34 - Detalhe da retirada do material para amostras metalográficas.	57
Figura 35 - Minimização da curvatura dos corpos de prova.	57
Figura 36 - Corpos de prova antes e depois da minimização da curvatura.	58
Figura 37 - Máquina universal de ensaios mecânicos INSTRON.	58
Figura 38 - Corpo de prova com pintura. matizada. Fonte: o autor.	60
Figura 39 - Análise de deformações no corpo de prova MDB127.	60
Figura 40 - Detalhe da retirada de amostras para micrografias. Em (a) material do disco e em (b) material do aro. Fonte: O autor.	61
Figura 41 - Detalhamento da localização da retirada do material para micrografias.	62
Figura 42 - Detalhe da identificação das amostras para metalografia.	62
Figura 43 - Equipamento de Difração por raios X.	63
Figura 44 - Detalhe da amostra soldada utilizada para a medição de tensão residual.	64
Figura 45 – Detalhe da amostra sem solda, utilizada para a medição da tensão residual.	64
Figura 46 - Dispositivo para posicionamento de amostras não planas no equipamento Rigaku de medição de tensões residuais por difração de raios X. Fonte: O autor.	64
Figura 47 - Amostra após a medição da dureza.	65
Figura 48 - Análise do comportamento do material na face interna e externa.	70
Figura 49 - Micrografia do material em bruto (200x) Ataque: Nital 3%.	71

Figura 50 - Identificação da face externa nas amostras para micrografias. Fonte: O autor.	71
Figura 51 - Micrografia do material após operação de estiramento Ataque: Nital 3%.	72
Figura 52 - Micrografia do material antes da operação de estiramento Ataque: Nital 3%.	72
Figura 53 - Imagem da amostra do material do aro com a solda a topo.	73
Figura 54 - Micrografia do material do disco (200x) Ataque: Nital 3%.	73
Figura 55 - Detalhe da localização dos pontos de medição das tensões residuais no material do disco.	76
Figura 56 - Detalhe da localização dos pontos de medição das tensões residuais na região da solda no material do aro.	77

1. INTRODUÇÃO

A indústria automobilística pesada, procurando a diminuição de custos e aumento de desempenho de seus produtos, sempre está interessada na redução de peso nos automóveis, caminhões e ônibus. Para isto, um item que pode contribuir de maneira bem eficiente é a roda, Figura 1. Neste caso uma alternativa é a matéria prima, utilizando uma liga de alumínio, ou a redução de espessuras quando a matéria prima é o aço. E além da redução da espessura do aço, há estudos para reduzir as perdas de chapa quando da execução do corte do material para a fabricação dos discos das rodas. Visto que os diâmetros e larguras das rodas estão vinculados ao projeto do veículo. No caso de caminhões, as rodas de alumínio apresentam um custo muito elevado para o consumidor, enquanto o custo de rodas de aço é mais viável, pois uma roda de aço custa aproximadamente um quarto do preço de uma de alumínio.

Figura 1 - Exemplos de rodas: (a) de alumínio e (b) de aço, para caminhões e ônibus.
Fonte: Imagem da internet www.ecvv.com

Na fabricação de rodas de aço, têm-se desenvolvido processos, com o objetivo de se reduzir seu peso. Uma opção é a redução das espessuras dos componentes, com a utilização do processo de estiramento (*metal spinning process*), reconhecidamente capaz de proporcionar excepcionais deformações, não atingíveis em processos convencionais (BEDEKARA, PAUSKARA, *et al.*, 2014). Este processo proporciona melhorias de desempenho do produto com reduções estratégicas de espessura. Essa redução por processo de estiramento gera na roda uma geometria de melhor desempenho nos testes de resistência, e causa um efeito benéfico na curva

tensão deformação do aço empregado, ou seja, mesmo utilizando-se um aço de baixo carbono, consegue-se aprovar rodas em testes bem rígidos de resistência à fadiga por ciclagem.

Outra proposta para a redução de custos na fabricação de rodas para caminhão e ônibus, está no processo de fabricação do disco, onde há interesse na possibilidade de se aproveitar as sobras de chapa do primeiro corte de platinas, material inicial a ser estirado no terceiro estágio do processo de fabricação, como mostrado no segundo estágio da Figura 2, que após a soldagem de topo poderiam ser reutilizadas no processo.

Isto também resultaria não só redução de custos como também uma economia de recursos naturais, devido ao melhor aproveitamento da matéria prima, reduzindo gastos de energia para transporte, armazenagem e reprocessamento dos resíduos resultantes do processo de fabricação de rodas.

Figura 2 - Esquema do processo de fabricação de discos para rodas de caminhão 15°. Fonte: o autor.

1.1. A fabricação de rodas de aço

O componente roda

A roda de aço é constituída por dois elementos, o disco e o aro, unidos por um ou mais cordões de solda. O aro é quem recebe o talão do pneu e permite a rolagem do veículo. O disco é responsável pela ligação do conjunto aro mais pneu ao veículo.

Para automóveis leves, as rodas são constituídas apenas por aro e disco, já

para ônibus e caminhões as rodas podem ser constituídas por mais elementos além destes, em formas, larguras e diâmetros que atendam o projeto do veículo e a normas internacionais como a ALAPA, Associação Latino Americana dos Fabricantes de Pneus, Aros e Rodas (ALAPA, 2015).

Para caminhões existem basicamente dois tipos de rodas comercialmente mais utilizadas, as rodas chamadas 5°, para utilização de câmaras de ar, e as rodas 15°, para pneus sem câmaras de ar, Figura 3.

A nomenclatura rodas 5° e rodas 15° têm origem na inclinação da região onde se dá o assentamento radial do pneu. O que também exige um formato específico para a região de retenção axial do pneu, de nomenclatura flange, para cada inclinação da região do assentamento do pneu.

Figura 3 - Exemplo de rodas de aço: a) 5° com câmara e b) 15° sem câmara.
Fonte: Imagem da internet www.ecvv.com

(a)

(b)

As rodas 15° se constituem de aro e disco. Enquanto as rodas de 5°, são compostas por aro, disco e anel, componente com a função de flange dianteiro, e desmontável para possibilitar a retirada do pneu, sem equipamentos especiais, para reparos ou troca da câmara de ar ou pneu. Nas rodas de 5° o disco é produzido em operações de repuxo e corte em estamparia, somados a operações de usinagem. Enquanto para rodas de 15° utiliza-se uma combinação de operações de estamparia, estiramento e usinagem.

Atualmente a maior fatia do mercado de rodas utiliza rodas 15°, em virtude de seu menor peso comparado à roda 5°, pois já são uma evolução das rodas 5°.

O processo de estiramento está envolvido no processo de fabricação de ambas, em componentes diferentes, nas rodas 5º o processo de estiramento é utilizado no aro, enquanto nas rodas 15º ele é utilizado na produção do disco e aro, Figura 4.

Figura 4 - Estiramento de aro.
Fonte: Imagem da internet DENN USA Metal Forming.

Estiramento (*metal spinning process*)

O processo de estiramento (*metal spinning*), foi introduzido no processo de fabricação de rodas com a finalidade de substituir o processo de repuxo profundo, utilizado para a produção de componentes ocios, geralmente nas formas cilíndrica ou cônica, ou com a combinação destas duas formas. No caso do estiramento também pode-se produzir peças côncavas ou convexas.

As vantagens do processo de estiramento em comparação com o processo de repuxo profundo são:

1. Menor investimento de capital.
2. Custos menores de ferramental e energia.
3. Menores tempos de ajustes.
4. Maior velocidade nas implementações de modificações de projeto de produto.
5. Habilidade de combinar operações num mesmo ciclo de produção.
6. Menores esforços que os necessários em outros processos, devido ao trabalho localizado.
7. Flexibilidade em processar qualquer material deformável à frio.
8. Melhora nas propriedades mecânicas.

Como desvantagem deve-se ressaltar, que quando necessário, para atender tolerâncias dimensionais muito restritas, em profundidade e formato de borda, será preciso operações secundárias de usinagem, complementares ao processo de

estiramento.

O advento da utilização de linguagem CNC, em equipamento mais modernos e a automatização do processo, permitiu a conformação do componente mais precisa do que com os equipamentos copiadores, que utilizam gabaritos de forma. O equipamento utilizado no processo de fabricação de rodas se assemelha a um torno, onde a matéria prima para a produção do componente é pressionada contra um mandril, que possui o formato da parte interna do disco da roda a ser fabricada. Este material, que tem a forma de um disco com um determinado diâmetro, e mandril, giram em alta rotação. Em seguida o material é pressionado hidraulicamente por roletes, que o obrigam a tomar a forma do mandril, Figura 5 e Figura 6.

O estiramento na fabricação de rodas 5º (que utilizam câmara de ar) é utilizado para aumentar a largura do aro e aumentar sua resistência.

Figura 5 - Imagem de máquina CNC para estiramento do disco de rodas de aço.
Fonte: Imagem da internet - MJC Engineering and Technology Inc.

Figura 6 - Imagem do processo de estiramento.
Fonte: (BYLIA, KHISMATULLIN, *et al.*, 2018).

Na fabricação de rodas 15º (sem câmara de ar), ele é usado para a conformação do disco ou aro, que deve atender o perfil determinado em projeto, de modo a resistir

os testes de fadiga por ciclagem e de momentos de flexão e torção, alternados. Estes testes visam garantir a segurança, quanto à durabilidade e resistência a trincas do componente, e são regidos por normas da montadora.

Durante o processo de estiramento do disco, sua espessura varia no perfil, com a finalidade de proporcionar ao disco uma geometria que resista aos testes de resistência à fadiga. Como consequência desta operação se identifica um aumento na resistência do aço, de acordo com a variação do processo e forma do estiramento.

2. FINALIDADE, OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

2.1. Finalidade

Sabe-se que o estiramento causa algumas alterações nas propriedades mecânicas e na tensão residual do material do aro, no caso das rodas 5^o, e nos discos e aros, no caso das rodas 15^o. A presente proposta de estudo é analisar os efeitos desta operação. Isto de modo a entender estes efeitos, para se otimizar a utilização do aço empregado no processo de estiramento na obtenção de rodas.

2.2. Objetivo

Conhecer os efeitos do processo de estiramento no material utilizado na fabricação dos componentes das rodas de aço para caminhões e ônibus, na região com solda e sem solda.

2.3. Justificativa

Esta pesquisa tem sua justificativa na busca da melhor compreensão do processo de estiramento, quanto aos seus efeitos no aço de baixo carbono, utilizado na fabricação de rodas para caminhão e ônibus, de maneira a se conseguir o ótimo desempenho do produto, com garantia de segurança ao usuário.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Estiramento (*metal spinning*)

O processo de repuxo por revolução, doravante denominado estiramento neste estudo, devido a não normalização das terminologias utilizadas nesta área de conformação mecânica (MUSIC, ALLWOOD e KAWAI, 2010), é classificado como um processo de conformação dedicado a produção de objetos de volume definido pela revolução de uma geratriz sobre um eixo de simetria, cuja matéria prima é uma chapa metálica.

Este processo pode ser utilizado para a produção de componentes para a área automotiva e aeroespacial, objetos de arte, instrumentos musicais e utensílios de cozinha. Como exemplos pode-se citar partes de rodas para automóveis, refletores para radares, componentes para turbinas, narizes cônicos para satélites etc.

Existem outros processos de produção que podem executar estes mesmos componentes, porém, comparados com o estiramento, dispendem mais energia e recursos financeiros para se alcançar um resultado final de qualidade não tão satisfatória como no processo de estiramento (MUSIC, ALLWOOD e KAWAI, 2010).

Este método consiste na fixação do material necessário para a produção do componente, sobre um modelo denominado mandril, em um equipamento semelhante a um torno, por uma contra ponta, e da sua conformação pela ação de roletes que descrevem uma trajetória controlada por um sistema CNC em equipamentos mais modernos; ou copiada de um gabarito de forma, nos equipamentos mais antigos. O processo pode ser executado em uma única operação, ou em mais de uma operação, conforme nos mostra a Figura 7.

Este processo de fabricação pode produzir objetos com diâmetros que variam de 3 mm a 10000 mm, com espessuras de 0,4 a 25mm (BROWN, 1998), e se apresenta como uma alternativa ao processo de fabricação estampagem no repuxo de objetos que apresentem um volume simétrico a um eixo, com vantagens em relação a este processo, como a possibilidade de uma maior flexibilidade do processo devido a não necessidade de ferramentais exclusivos, para alguns produtos. Além de atingir um alto padrão de acabamento superficial e resultar numa melhora da característica da propriedade de resistência mecânica da matéria prima, devido ao encruamento resultante dos deslocamentos dos arranjos cristalinos, e variações em sua granulometria, provocados pela grande deformação plástica durante a operação (BEDEKARA, PAUSKARA, *et al.*, 2014).

Figura 7 - Desenho esquemático do processo de estiramento.
 Fonte: (WONG, DEAN e LIN, 2003).

Estas características levaram diversos pesquisadores a estudarem este processo, utilizando modelos para se prever de forma experimental e analítica as forças de conformação, formação de rugas e os limites do processo quanto ao acabamento superficial, ressaltando a importância do tipo e viscosidade de lubrificantes utilizados no processo para o alcance de qualidade superficial no produto final (SLATER, 1979).

Variando a temperatura da pré-forma com o objetivo de analisar sua influência nas propriedades mecânicas do produto, com o objetivo de equilibrar a resistência e ductilidade alcançadas em função dos parâmetros do processo e das modificações estruturais resultantes no tratamento térmico utilizado na pré-forma (PODDER, MONDAL e YADAV, 2012).

Somados à revisões detalhadas na literatura quanto as ferramentas e máquinas utilizadas neste processo, onde se estuda a influência da forma do mandril no grau de flexibilidade do processo de estiramento para determinados componentes, sendo até possível a dispensa do mandril e a adoção de outros roletes para conformação das extremidades de tubos estirados, e alternativas para produção de peças não simétricas (SPUR e STÖFERLE, 1985).

3.2. Classificação e características do processo de estiramento

O estiramento é classificado como convencional quando o material depois de conformado não sofre variação de espessura, Figura 9, de cisalhamento quando se produz componentes de forma cônica ou que provoque um deslocamento oblíquo da espessura do material, Figura 8, o que resulta na variação de espessura, e linear,

específico para produção de componentes de forma cilíndrica tubular, onde também há a variação da espessura com o aumento do comprimento do componente, Figura 10.

Figura 9 - Estiramento convencional.
Fonte: (MUSIC, ALLWOOD e KAWAI, 2010).

Figura 8 - Estiramento de cisalhamento.
Fonte: (MUSIC, ALLWOOD e KAWAI, 2010).

Figura 10 - Estiramento linear.
Fonte: (MUSIC, ALLWOOD e KAWAI, 2010).

A literatura, que trata do estudo dos mecanismos de deformações envolvidos nos processos de estiramento, não define uma separação clara entre estiramento convencional e de cisalhamento. Isto devido a semelhança da primeira passada, quando da fabricação de um componente em mais de uma operação de estiramento, com o estiramento de cisalhamento, e as demais passadas como estiramentos convencionais, fato demonstrado experimentalmente e por modelagem analítica e numérica (QUIGLEY e MONAGHAN, 2001).

Já os mecanismos de deformações no estiramento linear não possuem similaridades com os mecanismos de deformações dos processos de estiramento convencional e de cisalhamento, o que o distingue destes dois processos. (MUSIC, ALLWOOD e KAWAI, 2010). Devido a esta diferenciação existem estudos dedicados, buscando entender especificamente a influência nas propriedades do material, parâmetros do processo, encruamento etc. Sendo o encruamento considerado o item principal na determinação do limite de conformação neste processo. (BYLIA, KHISMATULLIN, *et al.*, 2018). O sentido de avanço do rolete no processo de estiramento convencional, determina os tipos de tensões que são geradas, se o sentido

for em direção as bordas do material, as tensões geradas serão de tração radial e de compressão circunferencial, que se equilibram mantendo a espessura do material praticamente constante.

Quando o sentido de avanço do rolete é da borda do material para o contra ponta, as tensões são de compressão radial e de compressão circunferencial, devido ao acúmulo de material diante do rolete, durante sua trajetória, como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Relação entre tensões e sentido de avanço do rolete.
Fonte: (MUSIC, ALLWOOD e KAWAI, 2010) modificada pelo autor.

Estes eventos devem ser equilibrados no processo de estiramento para se evitar os defeitos mais comuns nos componentes fabricados, que são: enrugamentos e rupturas radiais. Ao contrário do estiramento convencional, no estiramento de cisalhamento a espessura do material é reduzida, obedecendo a relação entre a lei do seno do ângulo de inclinação do produto e a espessura inicial do material.

Esta relação entre espessura final t_1 e a inicial t_0 deve ser $t_1 = t_0 \sin \alpha$, mostrada na Figura 12, pois um desvio destas proporções pode acarretar defeitos de fabricação como enrugamentos ou deformações na borda do produto, pois no processo de estiramento de cisalhamento as tensões internas durante a operação permanecem concentradas na região abaixo do rolete. Além de alterar os tipos de tensões radiais e circunferenciais no produto, pois uma relação $t_1 > t_0 \sin \alpha$, denominada de sub-

redução de espessura, o material é empurrado para parte interna, o que pode ocasionar o dobramento do flange na direção do rolete com o aparecimento do enrugamento.

Figura 12 - Relação entre espessura inicial e final no estiramento de cisalhamento.
Fonte: (MUSIC, ALLWOOD e KAWAI, 2010) modificada pelo autor.

Enquanto que se a relação for $t_1 < t_0 \sin \alpha$, denominada de super redução, o material durante a operação de estiramento se acumulará diante do rolete, o pode dobrar o flange no sentido de avanço do rolete, com a formação irregular da borda do produto.

Uma limitação do processo de estiramento por cisalhamento é a necessidade de uma região central plana no produto, para possibilitar a fixação do material inicial no equipamento, pelo contra ponta, o que diminui a flexibilidade deste processo. O foco deste estudo está nos processos de estiramento convencional e de cisalhamento, executados a frio, por esta razão não se detalhou os demais processos e métodos existentes.

Há literaturas específicas que tratam de processos de estiramento para atender produtos que não possuam uma região central plana, ou com formas não simétricas e que por ventura necessitem de fonte de calor como facilitador de conformação, como por exemplo (KITAZAWA, WAKABAYASHI, *et al.*, 1994) e (SHIMA, KOTERA e MURAKAMI, 1997) etc., que demonstram e estudam processos alternativos de estiramentos.

3.3. Aços carbono

Os aços conhecidos como comuns, são os que em sua composição química não possuem elementos de liga, além de ferro e carbono, porém contém alguns elementos, em pequena quantidade, como manganês e silício, por exemplo, inevitáveis, e em algumas aplicações desejáveis, e de acordo com o sistema de classificação adotado pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) são denominados aços carbono. Quanto às impurezas e inclusões, impossíveis de serem eliminadas no processo normal de fabricação, devem ser mantidas em proporções que não prejudiquem as características e desempenho do aço.

A ABNT segue as classificações mais utilizadas, que consideram a composição química na designação do aço, como as da AISI (*American Iron and Steel Institute*) e da SAE (*Society of Automotive Engineers*). Nesta classificação os dois primeiros algarismos indicam o tipo de aço, e os demais o percentual de carbono ou outros elementos na liga. (CHIAVERINI, 1990). Então, se os dois primeiros algarismos na designação são o 10, o aço é simplesmente ao carbono, se forem 40 o aço é ao molibdênio, com 0,25% de molibdênio, assim por diante. A Tabela 1 contém algumas designações adotadas pelos sistemas AISI, SAE e ABNT NBR NM 87:2000.

Tabela 1 - Classificação dos aços.
Fonte: (CHIAVERINI, 1990) modificada pelo autor.

DESIGNAÇÃO	TIPOS DE AÇO
10XX	Aços comuns ao carbono
11XX	Aços de usinagem fácil, com alto S
12XX	Aços de usinagem fácil, com P e S
15XX	Aços com manganês acima de 1,00%
13XX	Aços com 1,75% de manganês médio
40XX	Aços com 0,25% de molibdênio médio
41XX	Aços com 0,40 a 1,10% de Cr e 0,08 a 0,35% de molibdênio
43XX	Aços com 1,65 a 2,00% de Ni, 0,40 a 0,90% de Cr e 0,20 a 0,30 de molibdênio
46XX	Aços com 0,70 a 2,00% de Ni, 0,15 a 0,30% de molibdênio
47XX	Aços com 1,05% de Ni, 0,45% de cromo e 0,20 % de molibdênio
48XX	Aços com 3,25 a 3,75% de Ni, 0,20 a 0,30% de molibdênio
51XX	Aços com 0,70 a 1,10% de Cr

As propriedades mecânicas dos aços carbono são consequência principalmente da composição química e microestrutura.

Quanto a microestrutura, se o aço for resfriado normalmente, com a consequente transformação total da austenita, o principal elemento na liga será o carbono, que em função de sua quantidade em massa, será responsável por um maior

limite de resistência à tração, maior limite de escoamento e maior dureza, e em contrapartida tornará pior as características ligadas a ductilidade e tenacidade, como o alongamento, estrição e a resistência ao impacto; já os elementos residuais, devem ser mantidos dentro das faixas onde não prejudiquem o desempenho funcional do aço.

Com respeito a microestrutura, esta será influenciada pela condição de fabricação, ou seja, se o aço foi fundido, trabalhado a quente ou a frio, do tamanho do grão, e das condições de resfriamento. Se o aço for fundido, sua granulação se apresentará mais grosseira, com uma estrutura dendrítica, devido ao resfriamento lento dos moldes, mostrado pela Figura 13.

Figura 13 - Aspecto micrográfico de aço moldado no estado bruto de fusão. Parte da estrutura é acicular e parte é rendilhada.

Fonte: (CHIAVERINI, 1990).

A Tabela 2 lista as influências do tamanho do grão austenítico nas propriedades mecânicas do aço.

Quando o aço passa por um processo de trabalho a quente como o de laminação a quente, ou é forjado, em temperatura onde o aço se apresenta na fase austenítica, há a homogeneização da estrutura, com a eliminação da estrutura dendrítica, e a reorientação das segregações e inclusões originadas durante o resfriamento dos moldes de fundição. Outra consequência do processamento a quente é a redução do tamanho do grão, dependendo da temperatura final do processamento (CHIAVERINI, 1990).

Enquanto em um aço que sofra um trabalho a frio, como martelamento a frio, mostrado na Figura 14, ocorrerá o encruamento que aumentará a resistência mecânica e a dureza, e diminuirá a ductilidade com o decréscimo do alongamento e estrição.

Tabela 2 - Efeito do tamanho de grão austenítico sobre certas características dos aços.
Fonte: (CHIAVERINI, 1990).

PROPRIEDADE	TENDÊNCIAS NOS AÇOS TEMPERADOS	
	Aços de Austenita Grosseira (nº 5 e acima)	Aços de Austenita Fina (mais fina do que nº 5; de 5 a 8)
Endurecibilidade	Endurecimento mais profundo	Endurecimento menos profundo
Tenacidade à mesma dureza	Menos tenazes	Mais tenazes
Empenamento	Maior	Menor
Fissuras de têmpera	Mais frequentes	Geralmente ausentes
Fissuras de retificação	Mais susceptíveis	Menos susceptíveis
Tensões residuais	Maiores	Menores
Austenita retida	Mais	Menos
NOS AÇOS RECOZIDOS E NORMALIZADOS		
Usinabilidade	(Desbaste) melhor	(Desbaste) inferior
Usinabilidade (casos especiais)	(Acabamento fino) inferior	(Acabamento fino) melhor
Trabalhabilidade (casos especiais)	Superior	Inferior

Figura 14 - Aspecto micrográfico de aço duro encruado por martelamento a frio.
Ataque: reativo de Nital. Aumento: 200 vezes.
Fonte: (CHIAVERINI, 1990).

O encruamento é explicado como resultado das interações entre discordâncias, ou entre as discordâncias e outras barreiras que impeçam sua movimentação (SOUZA, 1982).

Os aços ditos ao carbono atendem a maioria das necessidades e aplicações práticas da indústria e sociedade. E os estados normais de fornecimento destes materiais são o fundido ou trabalhado. Os componentes fundidos recebem um

tratamento térmico de normalização ou recozimento para alívio de tensões geradas na fase de solidificação, e para a homogeneização da microestrutura. Já os componentes trabalhados podem ser utilizados diretamente em suas aplicações, a não ser quando for necessário eliminar o efeito do encruamento, quando trabalhado a frio.

Neste trabalho, o material de estudo é aço carbono em chapa, laminado a quente, caracterizado pela ductilidade e facilidade de conformação. Os requisitos do aço carbono fornecido em chapas são:

- Elevada trabalhabilidade
- Boa soldabilidade.
- Superfície sem defeitos.
- Baixo custo.

Para ser considerado chapa, o material deve obedecer a uma relação largura espessura. A ABNT estabelece que o material é considerado chapa grossa se sua espessura for superior a 5,00 mm e largura igual ou superior a 300 mm.

A composição química de um aço baixo carbono, também conhecido como aço doce, segue aproximadamente os limites mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Limites aproximados dos elementos na composição química de um aço baixo carbono.
Fonte: (CHIAVERINI, 1990).

Carbono	0,03 a 0,12%
Manganês	0,20 a 0,60%
Fósforo	0,04% (máx)
Silício	0,15% (máx)
Outros elementos	Tão baixos quanto possível

3.4. Dureza

Embora o conceito de dureza seja amplamente utilizado em diversas áreas do conhecimento, existem diferenças no conceito físico em cada área, cuja conceituação é função da experiência de cada indivíduo envolvido no estudo (DIETER, 1961).

Devido à dificuldade de se estabelecer uma definição que atenda a todos os conceitos das diversas áreas que utilizam o termo dureza, serão considerados somente os principais tipos por penetração.

Nas áreas de metalurgia e mecânica os tipos mais utilizados e comuns são os por penetração: Brinell, Rockwell e Vickers.

3.4.1. Dureza Brinell

A dureza Brinell, mostrada pela Figura 15, é a mais utilizada na área de engenharia mecânica, criada por J.A. Brinell em 1900, e consiste na aplicação de uma carga Q sobre uma superfície, através de uma esfera de aço de diâmetro D , por um intervalo de tempo t , que imprimirá uma calota esférica de diâmetro d , que é medido por intermédio de um micrômetro eletrônico (microscópio ou lupa graduados) após a remoção da carga. O valor de d é a média de duas medidas, executadas a 90° uma da outra. A unidade da dureza Brinell é N/mm² (ou kgf/mm²), e é o resultado da equação (1):

$$HB = \frac{Q}{S_c} = \frac{Q}{\pi \cdot D \cdot p} = \frac{2D}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

Onde S_c é a área superficial da impressão da calota e p é a profundidade da calota, Q a carga de 3000 kgf, D o diâmetro da esfera igual a 10 mm e o tempo t de 30 segundos. Grande parte das tabelas que fornecem o valor da dureza Brinell pelo valor de d estão baseadas nestes valores.

Figura 15 - Método para obtenção da dureza Brinell.
Fonte: (SOUZA, 1982).

Com desenvolvimento do processo foram desenvolvidas regras e procedimentos para atender a medição de peças de diversos materiais e dimensões, adequando o método as condições exigidas, como por exemplo a variação do diâmetro D da esfera para 1,2,5 e 10 mm, seu material também é alterado quando da medida de materiais cuja dureza supere 500 kgf/mm², para carboneto de tungstênio, para que não

sofra deformações durante a aplicação das cargas (SOUZA, 1982) , além de distâncias mínimas da borda da peça, e entre impressões. Tudo respeitando as condições de Q/D^2 constante, e que os diâmetros d das impressões permaneçam entre $0,25D - 0,5D$, sendo considerado o valor ideal $0,375D$, segundo Meyer (SOUZA, 1982).

3.4.2. Dureza Rockwell

Esse outro sistema de medição de dureza por penetração foi criado e patenteado por Hugh M. Rockwell e Stanley P. Rockwell em 1922. O método está fundamentado num diferencial de profundidade de penetração, ocasionado pela aplicação de uma pré-carga menor e depois a aplicação de uma carga maior, por um intervalo de tempo, e depois essa carga maior é retirada e a leitura do valor da dureza é lido diretamente numa escala apropriada de acordo com o tipo de penetrador e à carga, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Sequência esquemática de leitura de dureza Rockwell.
Fonte: (SOUZA, 1982) modificada pelo autor.

Essas características do método o tornaram muito vantajoso em relação ao método Brinell, devido a velocidade para a obtenção do resultado e da isenção do erro humano. Outra vantagem é a utilização de penetradores pequenos, que geram impressões menores, não prejudicando a peça ensaiada, e possibilitando a leitura de pequenas diferenças de dureza na mesma região da peça (SOUZA, 1982). Daí a razão prática para a adoção deste sistema em linhas de produção e laboratórios para a conferência de tratamentos térmicos ou de superfície.

Os penetradores para dureza Rockwell podem ser esféricos (esferas de aço temperado) ou cônicos (cone de diamante, chamados de penetrador Brale, tendo 120° de conicidade), de modo a possibilitar a medição de toda a gama de durezas das mais baixas as mais altas.

As escalas de dureza Rockwell, são independentes e cobrem todos os tipos de metais, conforme mostra a Tabela 4. A indicação da dureza Rockwell é o valor lido no equipamento mais as letras HR seguidas pela letra da escala utilizada, por exemplo 60HRC indica uma dureza Rockwell de 60 na escala C.

Tabela 4 - Escalas de dureza Rockwell e aplicações típicas.
Fonte: (SOUZA, 1982).

Símbolo de escala	Penetrador	Carga maior (kgf)	Cor da escala	Aplicações das escalas
B	Esfera de Ø1,59 mm	100	Vermelha	Ligas de cobre, aços moles, ligas de alumínio, ferro maleável etc.
C	Diamante	150	Preta	Aço, fofo duro, fofo maleável perlítico, titânio, aço endurecido e outros metais mais duros que HRB=100
A	Diamante	60	Preta	Carbonetos cementados, aço fino, e aços endurecidos de baixa camada de endurecimento.
D	Diamante	100	Preta	Aplicações de aços com camada de endurecimento entre os dois casos acima mencionados, fofo maleável perlítico.
E	Esfera de Ø3,17 mm	100	Vermelha	Fofo, ligas de Al e Mg, metais para mancais.
F	Esfera de Ø1,59 mm	60	Vermelha	Ligas de Cu recozidas, chapas finas de metais moles.
G	Esfera de Ø1,59 mm	150	Vermelha	Fofo maleável, liga Cu-Ni-Zn, cuproníqueis. Aplicações até HRG=92 para evitar achatamento da esfera.
H	Esfera de Ø3,17 mm	60	Vermelha	Alumínio, zinco, chumbo.
K	Esfera de Ø3,17 mm	150	Vermelha	Metais para mancais e outros metais muito moles ou finos. Usar a menor esfera e a maior carga possíveis.
L	Esfera de Ø6,35 mm	60	Vermelha	
M	Esfera de Ø6,35 mm	100	Vermelha	
P	Esfera de Ø6,35 mm	150	Vermelha	
R	Esfera de Ø12,7 mm	60	Vermelha	
S	Esfera de Ø12,7 mm	100	Vermelha	
V	Esfera de Ø12,7 mm	150	Vermelha	

O valor da dureza Rockwell é adimensional, e é calculado pela equação(2):

$$HR = C_1 - C_2 \cdot \Delta p \quad (2)$$

Onde C_1 e C_2 são constantes do material e Δp é a variação da profundidade do penetrador quando da aplicação da carga menor e carga maior.

Estas constantes são tabeladas em função das escalas Rockwell, e são utilizadas para o cálculo da relação aproximada entre a dureza Rockwell e dureza Brinell, utilizando a equação (3):

$$HR = C_1 - C_2 \frac{\Delta Q}{\pi D(HB)} \quad (3)$$

Tabela 5 - Coeficientes para conversão de HR e HB.
Fonte: (SOUZA, 1982) adaptada pelo autor.

Escala	C_1	C_2
B	130	500
C	100	500
A	100	500
D	100	500
E	130	500
F	130	500
G	130	500
15-N	100	1000
30-N	100	1000
45-N	100	1000
15-T	100	1000
30-T	100	1000
45-T	100	1000

Na Tabela 6 o coeficiente C_1 é adimensional e a unidade de C_2 é mm^{-1} .

3.4.3. Dureza Vickers

É o sistema de medição de dureza que utiliza um penetrador em forma de uma pirâmide com base quadrada, de diamante, com um ângulo de 136° entre faces opostas, que obedece a mesma proporção utilizada na dureza Brinell quando a razão

entre os diâmetros d das impressões permanecerem entre $0,25D - 0,5D$, sendo considerado o valor ideal $0,375D$, conforme mostrado pela Figura 17. Foi criado por Smith e Sandland em 1925 (SOUZA, 1982), e recebeu esta denominação devido a companhia que fabricou as máquinas mais utilizadas para este tipo de medição.

Figura 17 - Relação entre impressão Vickers e Brinell.
Fonte: (SOUZA, 1982) modificada pelo autor.

Ângulo das tangentes à esfera,
para a relação $d/D = 0,375$
na dureza Brinell.

A valor da dureza Vickers, com a designação HV, é função da carga Q utilizada, que pode variar de 1 a 120kgf de modo a conseguir uma impressão regular, com o formato de um quadrado com as diagonais de comprimento médio L utilizado para o cálculo do valor da dureza pela equação (4):

$$HV = \frac{\text{carga}}{\text{área da superfície piramidal}} = \frac{2Q \sin \frac{136}{2}}{L^2} = \frac{1.8544 Q}{L^2} \quad (4)$$

Onde L é igual a média $\frac{L_1 + L_2}{2}$, dimensionados conforme a Figura 18.

Figura 18 - Desenho de uma impressão Vickers.
Fonte: (SOUZA, 1982) modificada pelo autor.

A dureza Vickers oferece uma escala continua para cada carga utilizada, e devido a possibilidade de a dureza variar com a utilização de cargas pequenas, há a necessidade mencionar a carga utilizada nestes casos. Após a aplicação da carga por

um intervalo de aproximadamente 18 segundos e sua retirada, a medição das diagonais da impressão é realizada por intermédio de um microscópio acoplado ao equipamento, com a precisão de 0,001 mm.

O método de medição de dureza Vickers é demorado e exige uma boa preparação da superfície para garantia da nitidez da impressão, o que o torna mais viável para a área de pesquisa, para medição de camadas de proteção superficial, de profundidade de descarbonetação nos aços. Com a vantagem de não inutilizar o corpo de prova analisado, devido as diminutas dimensões da impressão.

3.5. Tensão residual

Tensões residuais são aquelas contidas no componente, geradas naturalmente ou propositadamente durante o processo de fabricação, a primeira como consequência e a última para melhoria de características das propriedades mecânicas como resistência a tração (NOYAN e COHEN, 1987), e permanecem no componente em equilíbrio, ou seja, o resultado das forças e momentos atuantes é nula, garantia para sua estabilidade (WHITERS e BHADESHIA, 2001).

As tensões residuais podem ter sido geradas mecanicamente pelos processos de fabricação envolvidos na produção do componente, como usinagem, laminação, trefilação, soldagem, jateamento etc. Que causam deformações e mudanças de volume pela retirada de material ou por conformação mecânica. Também podem ter sua origem em tratamento térmicos, devido aos processos de aquecimento e resfriamento e a consequente variação dos coeficientes térmicos das diferentes fases ou dos elementos presentes na liga do componente.

Outra causa de tensões residuais pode ser processos químicos como nitretação, cementação, tratamentos de superfície como PVD (*Physical Vapour Deposition*), deposição física de vapor, ou CVD (*Chemical Vapour Deposition*), deposição química em vapor, que causam mudanças de volume pelas transformações de fase, precipitações, reações químicas, que resultam em mudanças na estrutura cristalina superficial.

As tensões residuais podem ser trativas ou compressivas, e são classificadas por tipos, sendo as do tipo I denominadas de macroscópicas, que apresenta deformações uniformes por um grande número de grãos (KESAVAN, RAVISANKAR, *et al.*, 2005), do tipo II denominadas de microscópicas, concentradas em um grão ou em parte dele, e finalmente as do tipo III, ditas submicroscópicas ou microtensões localizadas, estudadas na escala interatômica.

Visto isto, um componente mecânico em seu processo de produção não está livre de tensões residuais, e, portanto, quando analisamos a possibilidade da causa de falha ou de melhora no desempenho do componente, devemos ter consciência de que ela pode ser resultado da somatória das tensões residuais mais as tensões resultantes de trabalho. Há estudos que demonstram a influência das tensões residuais trativas e compressivas nos testes de fadiga por ciclagem. Onde a presença de tensões trativas podem ser a causa inicial para o surgimento de trincas no material, e as tensões compressivas sendo benéficas dificultando o surgimento delas, principalmente quando localizadas próximas a superfície do material (WHITERS e BHADESHIA, 2001).

O que corrobora para a importância de se conhecer as tensões residuais presentes no componente para seu correto dimensionamento, como questão de segurança.

3.5.1. Técnicas de medição

A partir da conscientização da existência de tensões residuais, foram desenvolvidos métodos para o atendimento das demandas de laboratórios e da indústria, dividindo este universo em técnicas destrutivas e não destrutivas (LU, 1996).

A tensão por ser uma propriedade extrínseca (PRECÉY, 1986), não pode ser dimensionada diretamente, então utilizamos um método indireto de dimensionamento, através de outras propriedades intrínsecas, como área, força, ou deformações, de modo a se conhecer a tensão atuante.

As técnicas de medição de tensão residual ditas destrutivas, baseiam-se na retirada de material da região tensionada, por usinagem ou por ação de um meio químico, o que ocasiona relaxamento local, e consequente movimentação do material, que pode ser medida por extensômetros padrões, posicionados criteriosamente. Os dados colhidos são tratados pela teoria da elasticidade, com a utilização de equações de compatibilidade e equilíbrio para a definição das tensões residuais. As principais técnicas destrutivas são a de furo cego, de remoção de camadas, e seccionamento, que dimensionam tensões residuais do tipo I, ou seja, macroscópicas. (MACHERAUCH e KLOSS, 1986). A técnica do furo cego, consiste na usinagem de um furo não passante, cego, na região em estudo, com diâmetro de 1 a 4 mm e profundidade proporcional ao diâmetro adotado, e se acompanha as deformações resultantes no entorno, com o auxílio de extensômetros, a técnica de remoção de camadas, consiste na remoção de uma fina camada do material, por processo químico, isto provoca uma perturbação nos momentos e forças do equilíbrio estático do componente, que na busca

de um novo equilíbrio estático, se deforma, e assim a variação da deflexão pode ser relacionada com a tensão residual de superfície que ali existia (FLAVENOT, 1996). E a técnica do seccionamento voltada para a análise de tensões residuais no campo tridimensional, onde o objeto de estudo é seccionado sucessivamente, e as deformações resultantes do relaxamento das tensões são controladas durante essa operação, e os dados são utilizados para a estimativa da distribuição das tensões antes do seccionamento (UEDA, 1996).

Já as técnicas não destrutivas são as de difração de raios X, uma das mais utilizadas atualmente, difração de nêutrons, ultrassom e magnética, que abrangem a medição dos tipos de tensão residual conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparativo dos métodos de medição de tensão residual.
Fonte: (LU, 1996) adaptada pelo autor.

Técnica	Furo-cego	Deflexão	Seccionamento	Difração de raios X	Difração de Nêutrons	Ultrassom	Magnética
Hipóteses Básicas	Tensões biaxiais uniformes na superfície do furo	Tensões biaxiais uniformes em um retângulo cuja largura e comprimento são suficientemente grandes em relação a duas vezes a espessura do material.	Campo tridimensional de tensões	Material isotrópico, homogêneo, policristalino e de granulometria fina	Material isotrópico, homogêneo e policristalino	Material isotrópico, homogêneo, tensões uniformes na trajetória acústica, entre o transmissor e receptor	Material ferromagnético
Tipo de tensão residual analisado	Tipo I	Tipo I	Tipo I	Tipo I e Tipo II ou Tipo III	Tipo I e Tipo II	Tipo I + Tipo II + Tipo III	Tipo I + Tipo II + Tipo III
Informação obtida na medição	Deformação superficial ou deslocamento	Deformação ou deflexão	Deformação superficial ou deslocamento	Variação das distâncias entre planos cristalinos	Variação das distâncias entre planos cristalinos	Variação na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	Amplitude do ruído de Barkhausen ou Permeabilidade magnética
Porção mínima de material analisado	0,5 mm ²	1000 mm ² se for medida a deflexão e 100mm ² se extensômetros forem utilizados	100 mm ²	0,5 mm ²	4 mm ³	De 0,1 mm ² para o método de alta frequência e 30 mm ² para o método convencional	1 mm ² para o método do ruído de Barkhausen e 100 mm ² para o método de permeabilidade magnética
Profundidade Mínima	20 µm	20 µm	1 a 2 mm	De alguns até dezenas de microns	1 mm	15 µm até 300 µm	100 µm
Portabilidade	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Tempo médio para obter a primeira medição e estabelecer um perfil de tensões, respectivamente	40 min. e 2 horas	30 min. e 8 horas	40 min. E entre 5 e 20 horas	20 min. e 8 horas	2 horas e uma semana	Alguns minutos e 20 minutos	Instantaneamente e 10min.
Incerteza em situações normais	± 20MPa	± 30MPa	± 10MPa	± 20MPa	± 30MPa	10 a 20 Mpa	10 a 20 MPa
Profundidade de inspeção	0,02 a 15 mm	0,1 a 3 mm	Todas acima de 1 mm	1 a 50 µm	2 a 50 mm	0,015 a 3 mm	0,1 a 1 mm

As técnicas de difração de raios X e de difração de nêutrons medem a distância entre planos cristalinos da estrutura cristalina do material, as principais diferenças são a profundidade maior de penetração e maior custo do equipamento da técnica de difração de nêutrons. A técnica de ultrassom funciona como para a detecção de trincas e descontinuidades em materiais, utilizando a diferença de velocidade de duas ondas ortogonais polarizadas que atravessam o material tensionado, para a obtenção da constante acústico elástica, para de forma indireta se determinar as tensões residuais. As técnicas magnéticas baseiam-se nas mudanças dimensionais no corpo da amostra, ocasionadas pelas movimentações das paredes de domínio magnético, cujas intensidades são os ruídos de Barkhausen, devido a exposição do corpo estudado a campos magnéticos (TIITTO, 1996).

Não é o objetivo deste trabalho a meticulosa explanação sobre os processos de medição de tensões residuais, o que o leitor pode encontrar na literatura específica. Nosso foco foi a compreensão do sistema de medição por difração de raios X, que se utiliza da teoria do comportamento linear elástico para o cálculo das tensões.

3.5.2. Difração de raios X (DRX)

Segundo (EISBERG e RESNICK, 1979) raios X são radiações eletromagnéticas com comprimento de onda menor que 1,0 nm e com propriedades como polarização e interferência semelhantes a ondas, e difração semelhante ao que apresenta a luz. Os raios X são resultado da desaceleração dos elétrons constituintes de um forte feixe emitido por uma fonte, atuando sobre as subcamadas internas de elétrons do material alvo. Para que haja esta desaceleração, os elétrons do feixe, cedem energia cinética aos elétrons das subcamadas, o que provoca um desequilíbrio energético das subcamadas pelo arrancamento destes elétrons dos átomos, deixando-os em estado de alta excitação, e para que estes átomos atinjam o estado de equilíbrio fundamental, emitem um conjunto de fótons de alta energia e frequência, devido a diferença de energia, mostrada esquematicamente na Figura 19, resultante da mudança de nível dos elétrons mais energizados para níveis que exigem uma menor quantidade de energia. Gerando espectros discretos típicos do material alvo.

E o mesmo material alvo pode gerar diversos espectros discretos, úteis em diferentes áreas da tecnologia (BLEICHER e SASAKI, 2000). Como por exemplo quando do estudo de um material alvo, pode-se determinar sua estrutura cristalina, executar análises químicas qualitativas e quantitativas, dimensionar as tensões residuais, e dimensionar cristallitos.

Figura 19 - Emissão de raios X.
 Fonte: Site Hipermidia (TÉCNICO EM RADIOLOGIA).

A medição de tensões por difratometria de raios X data do início do século passado, tornando-se uma rotina nas indústrias nuclear e aeronáutica no final da década de 70, na análise de fadiga e corrosão sob tensão, em ligas de níquel, tungstênio, assim como em alumínio e aços. Esta técnica consiste na medição do espaçamento entre os planos da rede cristalina do material, que sofreu alguma deformação, por intermédio de feixe de raios X e a lei de Bragg, considerando que esta distorção obedece ao regime linear elástico (PRECÉY, 1986). A difração de raios X é uma técnica não destrutiva, de pequena penetração, de aproximadamente $10\mu\text{m}$.

3.5.3. Fundamentos do comportamento linear elástico.

Em um meio isotrópico o tratamento das tensões pode ser feito com a utilização de um elemento esférico de volume unitário, mostrado pela Figura 20 (SAE INTERNATIONAL, 2003). Onde as principais tensões ou deformações com o sentido paralelo em relação aos eixos ortogonais obedecem a equação (5):

$$\frac{x^2}{\varepsilon_1} + \frac{y^2}{\varepsilon_2} + \frac{z^2}{\varepsilon_3} = 1 \quad (5)$$

E as deformações normais a qualquer ponto na superfície do elipsoide, doravante denominadas $\varepsilon_{\phi,\psi}$, com o valor aproximadamente igual ao vetor raio, podem ser calculadas pela equação (6):

$$\varepsilon_{\phi,\psi} = \varepsilon_1 \alpha_1^2 + \varepsilon_2 \alpha_2^2 + \varepsilon_3 \alpha_3^2 \quad (6)$$

Figura 20 - Elipsoide da tensão deformação com as unidades utilizadas na análise de tensão por difração de raios X. Fonte: (SAE INTERNATIONAL, 2003)

E para calcular o vetor com o valor da tensão normal $\sigma_{\phi\psi}$, é utilizada a equação (7)

$$\sigma_{\phi\psi} = \sigma_1 \alpha_1^2 + \sigma_2 \alpha_2^2 + \sigma_3 \alpha_3^2 \quad (7)$$

Onde $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ são os cossenos diretores. A utilidade do vetor deformação é o cálculo da tensão residual, já que esta não pode ser medida diretamente. E a relação entre as deformações em uma direção qualquer ($\phi\psi$) e as tensões principais, pode ser calculada pela equação (8):

$$\epsilon_{\phi\psi} = \frac{1 + \nu}{E} (\sigma_1 \alpha_1^2 + \sigma_2 \alpha_2^2 + \sigma_3 \alpha_3^2) - \frac{\nu}{E} (\alpha_1^2 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (8)$$

Onde E é o módulo de elasticidade do material e ν seu coeficiente de Poisson. Considerando um estado plano de tensões a tensão σ_3 é nula, então pode-se assumir que a deformação $\epsilon_{\phi\psi}$ nessa situação pode ser calculada pela equação (9):

$$\epsilon_{\phi\psi} = \frac{1 + \nu}{E} (\sigma_1 \alpha_1^2 + \sigma_2 \alpha_2^2) - \frac{\nu}{E} (\alpha_1^2 + \sigma_2) \quad (9)$$

3.5.4. A lei de Bragg

Os fundamentos básicos da teoria da difração de raios X estão alicerçados na lei de Bragg, expressão deduzida por W. L. Bragg (1890-1971) que define as condições necessárias para que a difração seja construtiva. (FITZPATRICK, FRY, *et al.*, 2005). A difração é definida como construtiva se os comprimentos dos caminhos percorridos pelos feixes incidente $\overline{SQ}$ e difratado $\overline{QT}$ forem iguais a um número inteiro n de comprimentos de onda λ . (CALLISTER, 2007)

Figura 21 - Representação de raios X sendo difratados pelos planos A-A e B-B'.
Fonte: (CALLISTER, 2007).

Então,

$$n\lambda = \overline{SQ} + \overline{QT} \quad (10)$$

Onde $\overline{SQ}$ é igual a $\overline{QT}$, e trigonométricamente igual a $d_{hkl}\sin\theta$, logo:

$$n\lambda = d_{hkl}\sin\theta + d_{hkl}\sin\theta \quad (11)$$

Onde:

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \quad (12)$$

Essa equação é conhecida como Lei de Bragg, que relaciona o comprimento de onda dos raios X e o espaçamento interatômico ao ângulo do feixe que sofreu difração de natureza construtiva (CALLISTER, 2007). Que possibilita o cálculo das tensões em função dos ângulos das difrações e das distâncias entre planos cristalinos d_{hkl} .

3.5.5. Medição das deformações com DRX

O equipamento utilizado para a medição das deformações com difração de raios X, em materiais com matriz cristalina, com os arranjos distribuídos aleatoriamente, é o difratômetro, de tipos e estruturas diversas.

O material alvo é posicionado de forma a ser escaneado por um feixe de raios X, emitido por uma fonte e captado por um detector que descreve uma trajetória circular, cujo centro é o material alvo, para possibilitar a leitura dos cristais que difratam os raios X de forma construtiva, o que possibilitará a determinação das distâncias entre planos cristalinos (d_{hkl}) pela lei de Bragg. Alterações no comprimento de onda dos

feixes de raios X, deformações e alongamento da matriz cristalina do material, e alteração das distâncias entre planos cristalinos, resultam em alterações nos padrões de difração do material.

Por intermédio das difrações pode-se medir as distâncias entre os planos cristalinos com precisão, o que nos proporciona a dedução das deformações sofridas pelo material, para o cálculo das tensões residuais pela teoria linear elástica. Para se fazer esta medição é necessário o estabelecimento de um sistema de coordenadas ortogonais como mostrado pela Figura 22.

Figura 22 - Sistema de coordenadas usado para o cálculo das deformações e tensões.
Fonte: (FITZPATRICK, FRY, *et al.*, 2005) adaptada pelo autor.

Para os cálculos das tensões, é assumido um estado plano de tensões devido à pouca penetração do feixe de raios X em materiais metálicos e cerâmicos, ou seja σ_3 é igual a zero, mas a deformação ε_z , normal a superfície da amostra não é zero, pois pode ser medida na posição de pico igual a 2θ , utilizando a equação (12) para um valor d_n , e conhecendo o valor d_0 do material sem deformação, com a equação (13) pode-se calcular:

$$\varepsilon_z = \frac{d_n - d_0}{d_0} \quad (13)$$

Tensões de compressão são distribuídas de forma perpendicular aos planos cristalinos paralelos à superfície, gerando picos de difração à ângulos inferiores de incidência (SAE INTERNATIONAL, 2003) e o espaçamento entre os planos cristalinos aumentam. Com o rastreamento das inclinações dos feixes de raios X difratados,

executado pelo difratômetro, pode-se medir a distância entre os planos cristalinos à um determinado ângulo ψ e calcular a deformação ε_ψ pela equação (14):

$$\varepsilon_\psi = \frac{-d_0}{d_0} \quad (14)$$

3.5.6. Cálculo das tensões

Utilizando a lei de Hooke, que leva em consideração as relações entre as deformações e as tensões, mostrada na equação(15):

$$\sigma_y = E \varepsilon_y \quad (15)$$

E considerando um corpo tracionado, que por consequência sofre uma deformação longitudinal no sentido do eixo x (ε_x) acompanhada por uma deformação transversal no sentido do eixo y (ε_y), em um estado plano de tensões, portanto as tensões são biaxiais. E a razão entre as deformações longitudinais e transversais, denominada módulo de Poisson (ν), pode ser definida como:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = -\nu \varepsilon_z = \frac{-\nu \sigma_y}{E} \quad (16)$$

Então na superfície do material onde a medição por difração de raios X é feita, assumindo σ_z igual a zero, tem-se:

$$\varepsilon_z = -\nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y) = \frac{-\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \quad (17)$$

Combinando as equações (13) e (17) temos:

$$\frac{d_n - d_0}{d_0} = \frac{-\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \quad (18)$$

De posse da equação (18) e do valor da distância entre planos cristalinos d_n pode-se calcular a soma das tensões principais. Para se calcular uma tensão $\sigma_\emptyset$ em determinada direção na superfície estudada, exemplificada como m_3 na Figura 22, a

teoria da elasticidade para um corpo sólido isotrópico mostra que a deformação $\varepsilon_{\phi\psi}$ ao longo de uma linha inclinada é:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{1 + \nu}{E} (\sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi) \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (19)$$

E com os valores das deformações e das distâncias entre planos cristalinos pode-se utilizar a equação (20):

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{(1 + \nu) \sin^2 \psi} \left(\frac{d_{\psi} - d_0}{d_0} \right) \quad (20)$$

Então com esta equação pode-se calcular a tensão em qualquer direção, bastando a medição de duas distancias entre planos cristalinos, executados em um plano normal a superfície e em um plano com a direção da tensão que se deseja calcular, conforme mostrado na Figura 23.

O método $\sin^2 \psi$ é o mais utilizado para a determinação das tensões. Consiste na construção de um gráfico, a partir de um determinado número de medições do feixe de raios X, em diferentes inclinações ψ , dos espaços entre planos cristalinos, ou da posição dos picos de difração σ_{ϕ} . A Figura 24 mostra uma curva construída pelo método supra citado.

Figura 23 - Esquema de planos de difração e tensões em uma amostra.
Fonte: (FITZPATRICK, FRY, *et al.*, 2005) adaptada pelo autor.

Planos de difração paralelos à superfície $d_{\perp}$ e a um ângulo $d_{\phi\psi}$.

Nota: as tensões σ_1 e σ_2 são coplanares a superfície da amostra.

Figura 24 - Exemplo de gráfico $\sin^2\psi$ vs. d .
 Fonte: (FITZPATRICK, FRY, *et al.*, 2005) modificado pelo autor.

Deste gráfico pode-se calcular a tensão assumindo que a tensão é zero quando $d = d_n$, sendo d o intercepto do eixo y quando $\sin^2\psi$ igual a zero como mostrado na Figura 24. Nesta situação a tensão é dada pela equação (21):

$$\sigma_\phi = \left(\frac{E}{1 + \nu} \right) m \quad (21)$$

Onde m é o coeficiente angular da curva do gráfico $\sin^2\psi$ vs. d .

A condição para a utilização deste gráfico é que ele demonstre um comportamento regular. Se a curva se comportar de forma como mostrado na Figura 25, haverá a necessidade de meios mais complexos para a resolução dos cálculos, inclusive com a possível utilização de programas de computador dedicados.

Figura 25 - Exemplos de curvas $\sin^2\psi$ vs. d
 Fonte: (FITZPATRICK, FRY, *et al.*, 2005) modificada pelo autor.

No exemplo mostrado na Figura 25 em (a), a curva é regular, no exemplo mostrado na Figura 25 em (b) mostra-se uma curva dividida mostrando $\psi > 0$ e $\psi < 0$, no exemplo na Figura 25 em (c) mostra-se uma oscilação da curva indicando prováveis tensões e deformações não homogêneas dentro do material.

3.6. Correlação de imagem digital (DIC)

A correlação de imagens digitais pertence a uma classe de métodos de medição sem contato, onde se registra imagens digitais do objeto de estudo em determinados intervalos de tempo, e a partir da análise destas imagens se extrai dados, como medições de deformações ou movimentos. Para possibilitar a obtenção destes dados por imagens sucessivas, são utilizados vários métodos, como execução de linhas, grades ou marcas distribuídas de forma randômica no objeto de estudo, sendo o último o mais utilizado atualmente. (SUTTON, ORTEU e SCHREIER, 2009), de modo a se correlacionar as posições destas marcas antes e depois de alterações de forma ou movimentação do objeto de estudo.

As primeiras aplicações desta tecnologia, foi o reconhecimento de estruturas orgânicas microscópicas, nas áreas de medicina e radiologia, e fotogrametria aérea. Sendo sua aplicação em engenharia para medições de forma ou deformações muito rara, devido ao desenvolvimento das tecnologias utilizando laser, e a dificuldade de pós processamento dos dados colhidos das medições gravadas fotograficamente.

A consequência disto foi o desenvolvimento de algoritmos para a extração e análise dos dados de imagens gravadas digitalmente, pelas quais se consegue quantificar rotações e deformações em sólidos com apurada precisão, principalmente para a área de engenharia, que exige altas resoluções devido as minúsculas deformações e alterações de forma durante os ensaios de tração, por exemplo.

Com o desenvolvimento desta tecnologia, que começou no universo bidimensional, hoje o controle e dimensionamento de componentes também é feito tridimensionalmente, com a utilização de programas computacionais que possibilitam a análise das imagens e extração dos dados de interesse do pesquisador.

Isto fez dessa tecnologia uma das mais promissoras (BORNERT, BREMAND, *et al.*, 2008) para análise e avaliação das mudanças que ocorrem na superfície de um corpo de prova, durante o intervalo em que este corpo de prova é submetido à atuação de algum carregamento.

No caso deste estudo as marcas utilizadas para a utilização do programa computacional disponível foi uma pintura matizada de forma randômica, com boa aderência a superfície da amostra, para a garantia de sua deformação acompanhar de forma fiel a deformação da superfície, para a garantia de sua correlação com a superfície, mesmo que a superfície em análise sofra grandes translações e deformações, sendo a forma recomendada para se evitar erros na determinação vetorial de elementos ortogonais a estrutura, que marcações como linhas ou grades podem ocasionar. (SUTTON, ORTEU e SCHREIER, 2009).

Figura 26 - Exemplos de pinturas matizadas.
Fonte: (SUTTON, ORTEU e SCHREIER, 2009).

Outra característica chave de uma textura matizada, é a grande quantidade de informações em toda a superfície, permitindo o uso de uma pequena porção de área para os padrões de combinações, denominados subgrupos ou janelas.

3.7. Ensaio de tração

O ensaio de tração é um ensaio destrutivo que consiste na aplicação de um esforço crescente no sentido longitudinal, em um corpo de prova, executado com o material retirado da peça ou na própria peça quando a retirada do material necessário para a execução do corpo de prova não for possível, de maneira a alongá-lo, tendo as deformações medidas com o auxílio do extensômetro, e os esforços ou cargas controladas pelo próprio equipamento, no caso a máquina de ensaios. Este corpo de prova deve ser executado na forma e com as dimensões em acordo com as normas técnicas estabelecidas pelas associações de normalização reconhecidas internacionalmente, como ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e ASTM (*American Society for Testing and Materials*), por exemplo. O ensaio de tração devido a sua reprodutibilidade é um dos mais importantes no estudo das propriedades mecânicas de um material de acordo com (SOUZA, 1982).

3.7.1. Ensaio de tração convencional

A denominação ensaio de tração convencional vem do método de cálculo da tensão, que não leva em consideração a diminuição da área da seção do corpo de prova, durante as deformações resultantes das solicitações dos esforços axiais crescentes gerados pela máquina de ensaio, até a ruptura do corpo de prova. Essa tensão média, é calculada pela equação ((22), e sua unidade é força por unidade de área.

$$\sigma = \frac{Q}{S_0} \quad (22)$$

Onde σ é a tensão média, já que a própria estrutura do material acarreta uma não uniformidade microscópica na distribuição das solicitações, além da anisotropia presente num metal policristalino, e Q é o esforço exercido no sentido longitudinal e normal a superfície com a área S_0 . A tensão σ também provoca a deformação ε , longitudinal do corpo de prova, causando um acréscimo ΔL no comprimento útil L_0 , como mostra-se na Figura 27. Então a deformação média é calculada pela equação (23), e é uma grandeza adimensional.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (23)$$

Figura 27 - Barra solicitada pela força Q .
Fonte: o Autor.

3.7.2. Propriedades mecânicas identificadas pelo ensaio de tração convencional

No ensaio de tração é possível construir o gráfico tensão deformação, com as medidas das tensões ou cargas e deformações tiradas diretamente na máquina de ensaio, características que crescem de forma contínua até o ponto do início do

fenômeno da estricção. Na Figura 28 trecho $\overline{OA}$ representa o comportamento elástico do material, o que significa que uma vez retirada a carga de tração, o material voltará a situação inicial sem nenhuma deformação permanente, isto devido a este trecho representar um deslocamento que não afeta o posicionamento das discordâncias, então quando cessa o esforço de tração, o material volta a sua posição inicial, respeitando a lei de Hooke, tendo E como constante de proporcionalidade, denominada módulo de Young ou módulo de elasticidade, conforme a equação (24):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (24)$$

Figura 28 -Tensão deformação típico de um material metálico.
Fonte: (SOUZA, 1982).

Também na Figura 28 o ponto A' é o ponto a partir do qual a relação de proporcionalidade entre tensão e deformação não mais existe, onde se retirada a carga haverá uma deformação permanente no material, como exemplificado na Figura 28 com o ponto B, onde houve um descarregamento, resultando o segmento $\overline{BC}$ paralelo ao segmento $\overline{OA}$, evidenciando a deformação gerada na zona plástica, mostrada pelo segmento $\overline{OC}$. Quanto à posição do ponto A' há dificuldade em se determiná-la devido as características de cada material, e como parâmetro para se determinar o final da zona elástica adota-se a deformação residual de 0,001% (SOUZA, 1982). Outro fato é que a partir do final da zona elástica, há o fenômeno do escoamento, uma transição heterogênea, caracterizada pelo aumento da deformação com uma pequena variação de carga. Quando a fase de escoamento é bem caracterizada, nota-se a carga superior

de escoamento e a carga de escoamento inferior. Para a execução do cálculo da tensão de escoamento, utiliza-se a carga inferior de escoamento, pela equação (25):

$$\sigma_e = \frac{Q_{ei}}{S_0} \quad (25)$$

Onde σ_e é a tensão de escoamento, Q_{ei} é a carga de escoamento inferior e S_0 é a área inicial da secção útil do corpo de prova, a unidade é carga por unidade de área.

O ponto que determina o final deste fenômeno em alguns materiais é imperceptível, causa da adoção de valores convencionados n como limite de escoamento para determinados grupos de materiais, sendo 0,2% para aços carbono, 0,5 para cobre e suas ligas e 0,1% para materiais muito duros (SOUZA, 1982). O final deste fenômeno marca o início da fase plástica do material, tendo o encruamento como primeiro estágio desta fase até o ponto onde se inicia a estricção, que é o início mais evidente da diminuição da área S_0 , e a distribuição das solicitações não é mais uniforme, já que a força Q também não é mais perpendicular a secção transversal do corpo de prova. Este evento indica o final da fase plástica do material, e o início de sua ruptura. Neste instante a tensão é o limite de resistência calculado pela equação (26):

$$\sigma_r = \frac{Q_r}{S_0} \quad (26)$$

Onde σ_r é o limite de resistência do material, Q_r é a carga máxima atingida, e S_0 é a secção inicial na região útil do corpo de prova. Quando Q_r é atingida a estricção do material se dá segundo a dureza do material, sendo a diminuição da área da secção muito maior para materiais mais dúcteis. As propriedades estricção e alongamento do material são estipuladas em porcentagem de acordo com a equação (27) para a estricção e pela equação (28) o alongamento.

$$\varphi = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100 \quad (27)$$

$$A = \frac{L_0 - L}{L_0} \cdot 100 \quad (28)$$

Além das tensões, alongamento e estrição, pode-se com os dados do ensaio de tração calcular o módulo de resiliência, que é um indicador da capacidade do material absorver energia na fase elástica e liberá-la quando da retirada da carga de tração, utilizando a fórmula (29):

$$U_r = \frac{\sigma_p^2}{2E} \quad (29)$$

Onde σ_p é o limite de proporcionalidade, substituível pelo limite n ou limite de escoamento, com a possibilidade de se averiguar o erro por estas substituições. O E é o módulo de Young.

Também pode-se calcular o coeficiente de Poisson (ν), que expressa a relação entre a deformação lateral e longitudinal do material, ocorrido durante o ensaio de tração, definida pela equação (30):

$$\nu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \quad (30)$$

Onde ε' é a deformação lateral e ε é a deformação longitudinal.

A característica final que nos interessa é o encruamento, definido como o endurecimento causado pela deformação do material, e justificado pela dificuldade de movimentação das discordâncias e por suas interações. Então um material deformado a frio, possui um maior número de discordâncias, necessitando de mais energia para suas movimentações.

3.8. Soldagem

Se duas superfícies metálicas ideais, ou seja, perfeitamente limpas e atômicamente planas, fossem colocadas em perfeito contato, se uniriam espontaneamente pelas forças interatômicas, que determinariam o espaço entre estas superfícies pelo equilíbrio destas forças. Mas como as superfícies metálicas oxidam, não são perfeitamente limpas e não são atômicamente planas, há a necessidade de meios para a execução das junções metalúrgicas, como calor, pressão, formas de deformação, ou outro meio de promover a interação das superfícies.

Existem diversas formas de se unir componentes na área mecânica, mas as que mais se destacam são as que envolvem processos de soldagem. Os processos de soldagem são utilizados para a união materiais similares ou não, de forma permanente

e localizada. Este processo se divide em dois grandes grupos, o que utiliza uma fonte de calor para o aquecimento e fusão dos materiais envolvidos, soldagem no estado líquido. E o grupo que utiliza a deformação e aquecimento abaixo do ponto de fusão localizados, denominado processo de soldagem no estado sólido.

Dentre alguns processos de soldagem no estado sólido podemos listar:

Já entre os processos de soldagem no estado líquido, podemos listar:

O processo de soldagem de interesse neste trabalho é o de topo por resistência, por centelhamento (*Flash-Butt welding*).

Este processo utiliza um equipamento com dois mordentes, um fixo e um móvel, que fixam e forçam as partes a serem soldadas após a temperatura ideal para o forjamento das partes ser alcançada, pela aplicação de uma corrente elétrica, alternada ou contínua entre as partes. O sistema mantém um espaçamento constante entre as faces a serem soldadas, de modo a iniciar uma profusão de arcos voltaicos, que causa o aumento da temperatura, e a fusão do material, que sai desta região na forma de centelhas, e então os mordentes juntam as partes forjando a união. Isto provoca a expulsão das impurezas da junção, garantindo uma boa soldagem, conforme mostrado na Figura 29. Após a soldagem, o cordão de solda é desbastado, laminado e escovado, de modo a manter a espessura do material, igual à do material base.

Figura 29 - Princípios da soldagem a topo por centelhamento e suas etapas.
Fonte: (HOULCROFT, 1990), modificada pelo autor.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Os componentes de onde foram retiradas as amostras para a confecção dos corpos de prova, foram executados dentro das instalações da empresa do grupo Maxion, rodas de aço, em Guarulhos e Cruzeiro, durante o processo contínuo de fabricação, para a garantia de que não haja variação na obtenção do material a ser estudado, pois o objetivo é o estudo das influências deste processo de fabricação no material rotineiramente usado.

O material utilizado neste trabalho foi o aço ABNT 1015, conforme NBR NM 87:2000, laminado a quente, cujas composições químicas estão listadas na Tabela 7, pertencente ao material do componente aro e Tabela 8 pertencente ao material do disco.

Tabela 7 - Composição química (% massa) do material do aro
Fonte: Certificado do material Companhia Siderúrgica Nacional (CSN)

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn	Al	N	Nb	V	Ti	B	Ca
0,099 0,164	0,3590	0,0180	0,009	0,008	0,011	0,009	0,018	0,001	0,001	0,023	0,0044	0,001	0	0,001	0,0001	0,0001

Tabela 8 - Composição química (% massa) do material do disco
Fonte: Certificado do material da ARCELORMITTAL BRASIL S.A.

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	Sn	Al	N	Nb	V	Ti	B	Ca
0,15	0,486	0,013	0,0044	0,014	0,008	0,004	0,016	0,001	0,001	0,035	0,0016	0,0001	0,001	0,001	0,0001	0,000

4.2. Métodos

O método proposto para o estudo dos efeitos do processo de estiramento, de cisalhamento e linear, executados à frio, no aço utilizado na fabricação de discos das rodas 15° e nos aros 5°, foram ensaios de tração, por serem normalmente adotados como simulação física para a análise das deformações características do processo de estiramento, de acordo com (SUTTNER e MERKLEIN, 2017), análise de correlação de

Figura 30 - Quadro de caracterização dos métodos adotados para caracterização do material.
Fonte: O autor.

imagens digitais (DIC), medidas de tensões residuais, análise metalográfica óptica, somados a análise de dureza, conforme quadro de caracterização mostrado na Figura 30.

4.3. Ensaios de tração

Para os ensaios de tração, foram usinados corpos de prova com dimensões reduzidas de acordo com a norma ASTM E8 (ASTM, 2001) conforme mostrado na Figura 31 e Figura 32, de modo a minimizar o uso de materiais e permitir ensaios mecânicos em máquinas de laboratório.

Os corpos de prova foram usinados a partir do material de discos e aros estirados com variações de espessura, sendo os corpos de prova do material dos aros, retirados da região da solda a topo por resistência, conforme mostrado na Figura 33.

Deste material também foram retiradas amostras para a metalografia óptica, conforme mostrado na Figura 34.

O objetivo destes experimentos foi identificar quais as mudanças entre o material não processado, e o material depois de processado. Também foram preparadas amostras para a análise das tensões residuais por difração de raios X (SAE INTERNATIONAL, 2003).

Figura 31 - Dimensões do corpo de prova, conforme ASTM E8 (*sub size*).
Fonte: (ASTM, 2001) .

Figura 32 - Detalhe da usinagem dos corpos de prova. Fonte: O autor.

Figura 33 - Detalhe da retirada dos corpos de prova da região soldada a topo do aro.
Fonte: O autor.

Figura 34 - Detalhe da retirada do material para amostras metalográficas.
Fonte: O autor.

Depois de usinados, os corpos de prova retirados dos aros, foram manualmente endireitados em uma morsa, para se minimizar a curvatura do produto gerada no processo de fabricação do componente aro, conforme nos mostra a Figura 35 e Figura 36 .

Figura 35 - Minimização da curvatura dos corpos de prova.
Fonte: O autor.

Figura 36 - Corpos de prova antes e depois da minimização da curvatura.
Fonte: O autor.

Figura 37 - Máquina universal de ensaios mecânicos INSTRON.
Fonte: o autor.

Após a preparação dos corpos de prova, foram executados três ensaios de tração de cada grupo, ordenados de acordo com suas espessuras finais após o processo de estiramento. E organizados conforme mostrado na Tabela 9 e Tabela 10, do material dos discos e dos aros respectivamente. Na máquina universal de ensaios INSTRON, mostrada pela Figura 37, no laboratório de materiais, nas instalações do IPEN, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, a temperatura ambiente com a velocidade constante do travessão de 1 mm/min, conforme norma (ASTM, 2001), para todas as amostras.

Depois de realizados os ensaios de tração, foram executados todos os gráficos tensão-deformação, para uma análise dos resultados. Neste universo de resultados, foram feitos os gráficos das médias de cada grupo, e foram estes gráficos das médias, os utilizados para as análises. Inclusive foram feitas análises cruzadas

entre os materiais do aro e do disco, com a finalidade de observar alguma tendência entre componente (aro/disco) ou processos de estiramento, linear para o aro, e de cisalhamento para o disco.

Tabela 9 - Corpos de prova do material do disco
Fonte: O autor

Material do Disco				
Espessura Inicial (mm)	Espessura Estirada(mm)	% de Redução	Identificação do corpo de prova	Quantidade
12,7	7	45%	MD05	3
12,7	6,5	49%	MD02	3
12,7	6,3	50%	MD04	3
12,7	5,9	54%	MD03	3
12,7	5,7	55%	MD01	3
12,7	12,7	0%	MDB127 (amostra ref.)	3

Tabela 10 - Corpos de prova do material do aro
Fonte: O autor

Material do Aro				
Espessura Inicial (mm)	Espessura Estirada (mm)	% de Redução	Identificação do corpo de prova	Quantidade
12	7,7	36%	MA09	3
12	8	33%	MA05	3
12	8,3	31%	MA02	3
12	8,5	29%	MA06	3
12	9,5	21%	MA11	3
12	9	25%	MA10	3
12	12	0%	MAB12 (amostra ref.)	3

4.4. Correlação de imagens digitais (DIC)

Para as análises com o DIC, técnica de correlação de imagens digitais, a superfície dos corpos de prova foi pintada de forma matizada, como mostrada na Figura 38, para a criação de diversos pontos com distribuição estocástica, de fundamental importância para a correta utilização do programa de computador necessário para as análises.

E todos os ensaios de tração foram filmados com uma câmera Cannon com resolução de imagem de 1920x1080 pixels, para garantir a melhor qualidade possível do vídeo, para o processamento do software *GOM Correlate*, utilizado como ferramenta de análise de deformações durante o ensaio de tração. De modo a melhor compreender os deslocamentos resultantes das deformações no ensaio, na região da estricção do material, conforme mostra a Figura 39.

Figura 38 - Corpo de prova com pintura matizada. Fonte: o autor.

Figura 39 - Análise de deformações no corpo de prova MDB127. Fonte: O autor.

4.5. Microscopia óptica

Para a análise metalográfica do material, foram retiradas amostras do material bruto, das diversas espessuras estiradas, do material do disco e do material do aro, na região soldada por resistência a topo, com os parâmetros normais utilizados na linha de produção do componente, antes e depois da operação de estiramento, de modo a se conseguir estudar as influências da solda a topo no material.

O procedimento para o preparo das amostras para a metalografia foi planejado de modo a se conseguir a análise das durezas e estrutura do material, em bruto, estirado, e soldado e estirado, sem provocar alterações nas microestruturas.

O material do disco foi retirado no sentido radial do produto, já o material do aro foi retirado de fatias retiradas de um aro de vinte e quatro polegadas, conforme mostrado na Figura 40, onde as setas em negrito indicam o sentido de estiramento.

Figura 40 - Detalhe da retirada de amostras para micrografias. Em (a) material do disco e em (b) material do aro. Fonte: O autor.

Deste material foram cortadas fatias no sentido transversal a região soldada, perpendiculares ao sentido de estiramento no material do aro, e fatias paralelas ao sentido de estiramento do material do disco. De modo a analisar o comportamento do material de acordo com o sentido do estiramento.

A microscopia ótica foi utilizada na fase preliminar de análise da microestrutura da amostra, para definir o método é adequado como meio de observação e análise. Como base para o procedimento da preparação destas amostras foram utilizadas as normas ASTM E3-01 (ASTM, 2004) e ASTM E 407 (ASTM, 2004).

Preparação das amostras para análise em microscopia óptica

- Selecionou-se amostras com a região soldada e sem solda. Cortadas no sentido transversal em relação a solda à topo no material que passou pelo processo de estiramento e no material que não foi estirado na região do friso, como mostrado na Figura 41.
- Cortou-se as extremidades das respectivas amostras, numa serra comum, diminuindo suas dimensões o suficiente para possibilitar seu manuseio, embutimento e identificação, conforme mostrado na Figura 42.

Figura 41 - Detalhamento da localização da retirada do material para micrografias.
Fonte: O autor.

- A sequência de lixamento, para a eliminação de imperfeições ou alterações na superfície nas fases anteriores, seguiu a ordem das lixas: 100;240;320.400,600,1200,2400, utilizando água para a refrigeração. Cada etapa de lixamento, foi executada, girando a amostra de 45° a 90°, longe do centro da lixa. Lavando a amostra e disco da politriz entre as mudanças de lixa.
- Após o lixamento, foi executado o polimento das amostras utilizando pastas diamantadas de granulometria 6 μm para desbaste, e para o acabamento do polimento foi utilizada pasta com granulometria de 1 μm .
- A execução do polimento foi feita movimentando a amostra, em círculos contra a rotação do disco da politriz.
- Entre as etapas de polimento as amostras foram lavadas com água, detergente e álcool etílico 90%, e depois secas com ar quente. Então foram levadas ao microscópio para observação da superfície, para a decisão sobre a etapa seguinte do polimento.

Figura 42 - Detalhe da identificação das amostras para metalografia.
Fonte: O autor.

Quando atingida a condição ideal de polimento, as amostras foram atacadas com a solução Nital com a concentração de 3%, e levadas ao microscópio para observação e gravação das micrografias, das regiões de interesse.

4.6. Difração por raios X

Para a execução das medições por difração de raios X, foram recortadas partes do disco e do aro, mostradas pelas Figura 44 e Figura 45, de modo adequar o material as limitações de dimensões do equipamento Smartlab SE da marca Rigaku utilizado, mostrado na Figura 43, instalado no laboratório de ensaios no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN.

O método utilizado para as medições foi a geração dos gráficos $\sin^2\psi$, que se apresentaram ideais para esta finalidade conforme (FITZPATRICK, FRY, *et al.*, 2005), ou seja, sem oscilações na sua forma.

Nesta oportunidade foi desenvolvido um dispositivo, conforme mostrado na Figura 46, para auxiliar a localização e posicionamento das amostras côncavas, no equipamento, já que amostras com algum tipo de deformação na superfície como cordões de solda, ou desníveis localizados, consumiam muito tempo para o correto posicionamento no equipamento.

Figura 43 - Equipamento de Difração por raios X.
Fonte: O autor.

Figura 44 - Detalhe da amostra soldada utilizada para a medição de tensão residual.
Fonte: O autor.

Figura 45 – Detalhe da amostra sem solda, utilizada para a medição da tensão residual.
Fonte: O autor.

Figura 46 - Dispositivo para posicionamento de amostras não planas no equipamento Rigaku de medição de tensões residuais por difração de raios X. Fonte: O autor.

4.7. Dureza Vickers

Para a execução dos mapas de dureza, foi adotada a dureza Vickers, com uma carga de 3kg, aplicada por 15 segundos, em pontos igualmente espaçados, em uma distância maior que 2,5 vezes a medida da diagonal da endentação, entre pontos e das bordas da amostra, de acordo com a norma E-384 (ASTM, 2004). Conforme mostrada na Figura 47.

Figura 47 - Amostra após a medição da dureza.
Fonte: o autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos ensaios de tração ficou evidenciado que houve um aumento médio de 50% na tensão de ruptura a tração máxima suportada pelas amostras, com a consequente queda de aproximadamente 70% na deformação. O que foi evidenciado nos diversos gráficos comparativos que foram executados com os dados colhidos nos ensaios de tração, como exemplificado no Gráfico 1 e Gráfico 2. Confirmando o exposto por (CHIAVERINI, 1990), demonstrando que o aumento da resistência à tração é função do percentual de redução em relação a espessura inicial do material.

Gráfico 1 - Comparativo Tensão x Deformação material do Disco.
Fonte: O autor.

Gráfico 2 - Comparativo Tensão x Deformação material do Aro.
Fonte: O autor.

Tabela 11 - Comportamento das tensões e deformações no material do ao aro.
Fonte: O autor.

Material do Aro						
Espessura Inicial (mm)	Espessura Estirada (mm)	% de Redução	Identificação do corpo de prova	Quantidade	Tensão máxima (kgf/mm ²)	Deformação (%)
12	7,7	36%	MA09	3	58	4,4
12	8,3	31%	MA02	3	55,3	4,1
12	9	25%	MA10	3	55,3	4,5

Tabela 12 - Comportamento das tensões e deformações no material do ao disco.
Fonte: O autor.

Material do Disco						
Espessura Inicial (mm)	Espessura Estirada (mm)	% de Redução	Identificação do corpo de prova	Quantidade	Tensão máxima (kgf/mm ²)	Deformação (%)
12,7	5,7	55%	MD01	3	61,8	5,1
12,7	6,3	50%	MD04	3	62,1	5,9
12,7	7	45%	MD05	3	60,4	6,2

A diferença no comportamento dos valores das deformações entre o material do aro e do disco, mostrada nos gráficos 1 e 2, e na Tabela 11 e Tabela 12, pode ser resultado da presença da solda a topo no material do aro, já que o material utilizado para ambos é o mesmo aço baixo carbono, o processo estiramento também é o mesmo, porém o aro é resultado de estiramento linear e o disco de estiramento de cisalhamento, conforme (WONG, DEAN e LIN, 2003). Outra forma de demonstrar isto está no Gráfico 3

Gráfico 3 - Tensão x Deformação material do aro. Fonte: O autor.

3, que compara o comportamento do material do disco (MD05) e do aro (MA09) na máxima proporção de redução, em relação a espessura da matéria prima de cada um.

O Gráfico 5 compara o material do aro das amostras MA09 e MA10, e o Gráfico 4 compara o material do disco das amostras MD01 e MD05, com aproximadamente as mesmas proporções de redução (11% e 10%), onde as curvas demonstram que nestas condições a perda de deformação no material do aro é maior que a perda de deformação do material do disco, outra indicação de que a forma de estiramento ou a presença da solda a topo pode ter influenciado neste resultado.

Gráfico 5 - Comparativo Tensão x Deformação material do Aro.
Fonte: O autor.

Gráfico 4 - Tensão X Deformação material do disco.
Fonte: O autor.

No Gráfico 6 observa-se que a variação da deformação do material do aro e do material disco em uma diferença de aproximadamente 10% entre suas reduções de espessura, são semelhantes, e que apesar da menor redução na espessura do material do aro, este material apresentou a maior perda na deformação. Então o percentual de redução pode não ser a razão da redução da deformação no material do aro.

Gráfico 6 – Comparação Tensão x Deformação material do disco e material do aro.
Fonte: o autor.

Na análise do deslocamento do material durante o ensaio de tração, feita com o auxílio do programa de computador GOM *Correlate*, foi possível acompanhar na linha do tempo do ensaio o momento do início do deslocamento, e quadro a quadro acompanhar as deformações resultantes entre pontos determinados sobre a superfície do corpo de prova,

Devido a isto, foi possível analisar o deslocamento de pares de pontos durante o ensaio, o que demonstrou um comportamento diferente entre a face interna e externa do material estirado, quando analisado na espessura, como mostrado na Figura 48. Esta análise sugere que a diferença do comportamento do material do aro em relação ao material do disco, é a diferença do tamanho do grão da face interna em relação do tamanho do grão da face externa, tendo como base o modelo de Hall-Petch, que demonstra a relação no ganho de resistência e aumento na tensão de escoamento do material, com a redução do tamanho do grão, conforme (WHANG, 2011). Então o

Gráfico 7 (esquemático), apresenta a possível razão para a perda de deformação no material do aro.

Gráfico 7 - Gráfico esquemático.
Fonte; O autor.

Figura 48 - Análise do comportamento do material na face interna e externa.
Fonte: O autor.

Figura 49 - Micrografia do material em bruto (200x) Ataque: Nital 3%.
Fonte: o autor.

A metalografia do material em bruto, mostrada na Figura 49, confirmou o aspecto normal de um aço baixo carbono, compatível com a composição de um aço hipoeutetóide, de acordo com (CHIAVERINI, 1990). Nas micrografias do material após processado por estiramento, foram mapeadas regiões identificadas como externa, que estiveram em contato com os roletes de estiramento, e interna que estiveram em contato com o mandril durante o processo de estiramento, como mostrado na Figura 50. Nestas micrografias nota-se a presença de grãos mais refinados na face externa do estirado (b), onde houve o contato direto dos roletes de estiramento, enquanto na face em contato com o mandril (a), os grãos se apresentam maiores, como mostrado na Figura 51.

Figura 50 - Identificação da face externa nas amostras para micrografias.
Fonte: O autor.

A razão provável para esta diferença na granulometria é a diferença na velocidade de resfriamento causada pelo sistema de refrigeração, que atinge somente a face externa na peça, durante o processo de conformação. Fato evidenciado na Figura 52, que mostra a micrografias das mesmas regiões da peça antes da conformação.

Figura 51 - Micrografia do material após operação de estiramento Ataque: Nital 3%.
Face interna (a), face externa (b) (200x).
Fonte: o autor.

Figura 52 - Micrografia do material antes da operação de estiramento Ataque: Nital 3%.
Face externa (a), face interna (b) (200x).
Fonte: O autor.

Estas micrografias foram executadas com o material do aro, com as amostras sendo cortadas no sentido perpendicular em relação ao cordão de solda a topo.

Figura 53 - Imagem da amostra do material do aro com a solda a topo.

O formato do grão nestas regiões não apresenta a mesma deformação notada na micrografia do material do disco no sentido longitudinal, mostrado na Figura 54 em (a), onde a micrografia nos mostra o formato do grão mais alongado, resultado do processo de conformação. As micrografias mostradas na Figura 54, foram feitas com as amostras retiradas no sentido longitudinal (a) e transversal (b) do material do disco, em relação a direção do estiramento.

Figura 54 - Micrografia do material do disco (200x) Ataque: Nital 3%.
Sentido longitudinal (a), sentido transversal (b).
Fonte: o autor.

A análise do comportamento da dureza no material antes do estiramento, mostrado no Gráfico 8, no sentido da largura, se apresenta estável quando analisado como distribuído em linhas de dureza na espessura.

Gráfico 8 - Comportamento da dureza Vickers no sentido da largura no material em bruto, antes da operação de estiramento. Fonte: o autor.

O

Gráfico 9 mostra o comportamento de dureza na espessura do material em bruto, devido ao encruamento em ambas as faces, resultado de um laminador com os cilindros atuando simultaneamente nas duas faces, durante seu processamento na usina, e ocasionando o aumento da dureza quando as medições se aproximam das faces da chapa, fato mostrado pela curva das médias.

Gráfico 9 - Comportamento da dureza Vickers no sentido da largura na espessura do material em bruto do aro, antes da operação de estiramento. Fonte: o autor.

No Gráfico 10 pode-se observar a distribuição da dureza no sentido da espessura numa amostra do material do aro, que passou por estiramento, a partir da face interna, que esteve em contato com o mandril durante o processo.

Gráfico 10 - Comportamento da dureza na espessura de uma amostra do material do aro, estirada. Fonte: o autor.

O comportamento da dureza se apresentou como ascendente, provavelmente devido a variação do tamanho do grão ser menor onde houve um resfriamento mais rápido devido a refrigeração do processo ser executado pelo lado externo do componente. Já o tamanho do grão na face interna do componente tem sua velocidade de resfriamento mais lenta, pois o sistema de refrigeração não atua nesta face, como mostrada na Figura 51.

Os resultados das medições das tensões residuais por difração de raios X, demonstraram que existem somente tensões compressivas nas amostras do material soldado e sem solda, tanto no sentido paralelo ao estiramento, mostrado na Figura 55 e Figura 56, quanto no sentido perpendicular, o que se mostra vantajoso do ponto de vista funcional do componente roda, já que este fato colabora para a melhora da performance do componente nos testes de fadiga, e dificulta a propagação de trincas superficiais, de acordo com (WHITERS e BHADESHIA, 2001). E estas tensões na amostra com solda, no sentido perpendicular ao estiramento, se comportaram como mostra o Gráfico 11. Já no sentido paralelo ao estiramento a média da tensão residual ficou em $-160,44 \pm 7,65$ MPa.

Isto indica que o processo de estiramento eliminou qualquer tensão trativa que porventura tenha surgido do processo de soldagem a topo.

No material do disco foram dimensionadas tensões residuais compressivas de $-122,8 \pm 5,25$ Mpa aproximadamente, no sentido paralelo ao estiramento, e no sentido perpendicular ao estiramento $-101,52 \pm 1,73$ Mpa, semelhantes as dimensionadas no material do aro, como o material do aro é um estiramento linear e o disco um de cisalhamento, conforme a definição de (WONG, DEAN e LIN, 2003), denota que o processo não influencia nas tensões residuais resultantes no produto final.

Gráfico 11 - Tensão residual na largura da região soldada, perpendicular ao estiramento.
Fonte: O autor.

Figura 55 - Detalhe da localização dos pontos de medição das tensões residuais no material do disco.
Fonte: A autor

Figura 56 - Detalhe da localização dos pontos de medição das tensões residuais na região da solda no material do aro.
Fonte: A autor.

6. CONCLUSÃO

Os resultados alcançados neste trabalho indicaram a possibilidade de que o método utilizado para se executar o componente roda de aço para caminhão e ônibus, se estiramento linear ou de cisalhamento, ou a presença da solda a topo no material, influenciará em seu desempenho, no que tange ao comportamento da resistência mecânica do material, se este material for o aço aqui estudado e a característica analisada for o deformação.

E constatam que o comportamento do aço utilizado para a fabricação de rodas de ônibus e caminhão, utilizando o processo de estiramento, adquirem as propriedades mecânicas necessárias para a garantia do atendimento dos requisitos de segurança, impostos pelas condições de utilização destes produtos nos veículos para os quais forem destinados, devido ao ganho na resistência à fadiga pela tensão residual compressiva, de aproximadamente -160 ± 7 Mpa, e ao ganho de resistência a tração pelo encruamento, com valores próximos a 62 kgf/mm^2 , intrínsecos no processo de estiramento utilizado. Fatores que também colaboram para dificultar a propagação de trincas superficiais, melhorando o desempenho dos componentes nas ciclagens nos ensaios de fadiga. O que possibilita a otimização do projeto do componente, pela redução da espessura utilizada.

Outra característica importante é a eliminação de tensões residuais trativas, inexistentes nas amostras estiradas, soldadas e estiradas, o que indica a possibilidade de otimização de aproveitamento de matéria prima, no início do processo de fabricação, para componentes com menores exigências funcionais no veículo, como rodas estepe, para baixa rodagem, a velocidade controlada, o que resultaria em significativa redução de custos e economia de recursos ambientais no manuseio e produção da matéria prima utilizada.

Para a confirmação de que estes efeitos têm o mesmo comportamento em outros materiais, utilizados nesta forma de fabricação de componentes, há a necessidade de mais pesquisas dedicadas a este tema. Ficando este trabalho como sugestão de protocolo para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- ALAPA. **Associação Latino Americana dos Fabricantes de Pneus, Aros e Rodas**. 1ª. ed. [S.l.]: [s.n.], 2015.
- ASTM. **E 8M Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. Pennsylvania: [s.n.], v. 03.01, 2001.
- ASTM. **E 407 Test Methods for Microetching Metals and Alloys**. [S.l.]: [s.n.], v. 3.11, 2004.
- ASTM. **E3-01 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens**. Pennsylvania: [s.n.], v. 3.01, 2004.
- ASTM. **E-384 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. Pennsylvania: [s.n.], v. 3.01, 2004.
- ASTM. **E3-92 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials**. Pennsylvania: [s.n.], v. 3.01, 2004.
- BEDEKARA, V. et al. Microstructure and texture evolutions in AISI 1050 steel by flow forming. **11th International Conference on Technology of Plasticity**, Nagoya, Japan, October 2014.
- BLEICHER, L.; SASAKI, J. M. **Introdução à difração de raios X em cristais**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2000.
- BORNERT, M. et al. Assessment of Digital Image Correlation Measurement Errors: Methodology and Results. **Society for Experimental Mechanics**, 25 Dezembro 2008. 353-369.
- BROWN, J. **Advanced Machining Technology Handbook**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1998.
- BYLIA, O. I. et al. The effect of elasto-plastic properties of materials on their formability by flow forming. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 252, p. 34-44, 2018.
- CALLISTER, W. D. **Ciencia e Engenharia de materiais: Uma Introdução**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Grupo GEN, 2007.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6ª. ed. São Paulo: ABM, 1990.
- DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. New York: McGraw Hill, 1961.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica**. 23ª. ed. [S.l.]: Campus, 1979.
- FITZPATRICK, M. E. et al. Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction. **Measurement Good Practice Guide**, Teddington, v. 52, 2005.
- FLAVENOT, J. F. Layer Removal Method. In: MECHANICS, S. F. E. **Handbook of measurement of residual stresses**. Senlis: Fairmont Press, 1996. Cap. 3, p. 35-48.
- HOULCROFT, P. **Which process**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 1990. 53-55 p.

- KESAVAN, K. et al. Nondestructive Evaluation of Residual Stresses in Welded Plates Using the Barkhausen Noise Techniques. **Experimental Techniques**, v. 29, n. Sept/Out, p. 17-21, 2005.
- KITAZAWA, K. et al. Incremental sheet metal forming method for producing the shell components having sharp components. **Journal of JSTP**, v. 35, n. 406, p. 1348-1353, 1994.
- LU, J. Introduction. In: MECHANICS, S. F. E. **Handbook of measurement of residual stresses**. Lilburn: Fairmont Press, 1996. Cap. 1, p. 1-5.
- MACHERAUCH, E.; KLOSS, K. H. **Origin Measurements and Evaluation of Residual Stress**. Proceedings of the International Conference on Residual Stress. Germany:Garmisch: Partenkirchen. 1986. p. 3-26.
- MUSIC, O.; ALLWOOD, J. M.; KAWAI, K. A Review of the Mechanics of Metal Spinning. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 1, p. 3-23, Janeiro 2010.
- NOYAN, I. C.; COHEN, J. B. **Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation**. 1^a. ed. [S.I.]: Springer Verlag, 1987.
- PODDER, B.; MONDAL, C.; YADAV, K. R. K. D. R. Effect of preform heat treatment on the flow formability and mechanical properties of AISI4340 steel. **Materials and Design**, 9 January 2012. 174-181.
- PRECÉY, P. S. **X-ray Diffraction Residual Stress Techniques**. Metals Handbook. Ohio: American Society for Metals. 1986. p. 380-392.
- QUIGLEY, E.; MONAGHAN, J. **Using a finite element model to study plastic strains in metal spinning**. 9th International Conference on Sheet Metal. Leuven: [s.n.]. 2001. p. 255-262.
- ROSENFELD, A. From Image Analysis to Computer Vision. **Computer Vision and Image Understanding**, Maryland, v. 84, p. 298-324, November 2001.
- SAE INTERNATIONAL. **Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction HS-784/2003**. [S.I.]: [s.n.], 2003.
- SHIMA, S.; KOTERA, H.; MURAKAMI, H. Development of flexible spin-forming method. **Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity**, v. 440, n. 38, p. 814-818, 1997.
- SLATER, R. A. C. **A review of analytical and experimental investigations of the Spin-forging of sheet metal cones**. 1st International Conference on Rotary Metal-working Processes. UK: [s.n.]. 1979. p. 33-60.

SOUZA, S. A. D. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos Fundamentos Teóricos e Práticos**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1982.

SPUR, G.; STÖFERLE, T. **Handbuch der Fertigungstechnik "Umformen und Zerteilen"**. Munich: Carl Hanser, v. 2/3, 1985.

SUTTNER, S.; MERKLEIN, M. A new approach for the determination of the linear elastic modulus from uniaxial tensile tests of sheet metals. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 64-72, 2017.

SUTTON, M. A.; ORTEU, J.-J.; SCHREIER, H. W. **Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements**. 1^a. ed. New York: Springer, 2009.

TÉCNICO EM RADIOLOGIA.

<http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/index.php/radiologia-convencional/tecnologia-e-funcionamento-dos-equipamentosrx/tubo-de-raios-x/interacoes-no-anodo#raios-x-de-freamento>. **Hipermidia**. Acesso em: 14/10/19 Outubro 2019.

TIITTO, S. Magnetic Methods. In: MECHANICS, S. F. E. **Handbook of Measurement of Residual Stresses**. Senlis: Fairmont Press, 1996. Cap. 8, p. 179-225.

UEDA, Y. Sectioning Methods. In: MECHANICS, S. F. E. **Handbook of Measurement of Residual Stresses**. Senlis: Fairmont Press, 1996. Cap. 4, p. 49-71.

WHANG, S. H. Nanostructured metals and alloys. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2011. p. 299-328.

WHITERS, P. J.; BHADSHIA, H. K. D. H. Engineering Applications of Residual stress Part2: Nature and origins. **Material Science and Technology**, Bethel, v. 17, p. 366-375, 2001.

WHITERS, P. J.; BHADSHIA, H. K. D. H. Engineering Applications of Residual stress Part 1: Measurement Techniques. **Material Science and Technology**, Bethel, v. 17, p. 355-365, 2001.

WONG, C. C.; DEAN, T. A.; LIN, J. A review of spinning, shear forming and flow forming processes. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 43, p. 1419 - 1435, 2003.

YAMAGUCHI, I.; MORIMOTO, Y.; TAKASHI, M. Automatic evaluation of mixed-mode stress intensity factors utilizing digital image correlation and nonlinear least-squares. **Journal of Japanese Society for Non-Destructive Inspection**, v. 51, n. 10, p. 667-673, 2002.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada
à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela
Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do
Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.**