

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS  
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO – CDTec  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso

**Estudo de tensão residual através de difração de raios X em  
aço carbono 1020**

Tábata Aires Vieira

Pelotas, RS, Brasil

2018

**Tábata Aires Vieira**

**Estudo de tensão residual através de difração de raios X em  
aço carbono 1020**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dr. Alice Gonçalves Osorio

Pelotas, 2018

**Tábata Aires Vieira**

**Estudo de tensão residual através de difração de raios X em aço carbono  
1020**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

**Data da defesa: 19/12/2018**

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dr. Alice Gonçalves Osorio (Orientadora)**

**Doutora em Ciência e Tecnologia dos Materiais pela Universidade  
Federal Do Rio Grande Do Sul –UFRGS**

**Prof. Dr. Rubens Camaratta**

**Doutor em Ciência e Tecnologia dos Materiais pela Universidade  
Federal Do Rio Grande Do Sul – UFRGS**

**Prof. Ms. Edilson Nunes Pollnow**

**Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal Do Rio  
Grande – FURG**

## RESUMO

AIRES, Tábata. **Estudo de tensão residual através de difração de raios X em aço carbono 1020**. 2018. 36f. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas, 2018.

O aço carbono 1020 é composto por aproximadamente 0,20% em peso de carbono, o que o classifica como “aço doce”, sendo o mais utilizado em metalurgia por suas características de fácil conformação mecânica associado ao baixo custo. Por outro lado, quando estes materiais são trabalhados a frio, é praticamente inevitável o surgimento de tensões residuais devido a formação e movimentação das discordâncias na rede cristalina, provocadas pelo elevado grau de deformação plástica oriundos do processo. Portanto, neste trabalho, propõe o estudo da tensão residual de chapas de aço carbono 1020 que passaram por conformação mecânica em calandra, através da técnica de caracterização de difração de raios X (DRX). Microscopia óptica, metalografia e microdureza Vickers também foram utilizadas para caracterizar o material. A partir das análises de DRX foi possível observar um deslocamento dos picos de difração característicos do aço 1020, este deslocamento indica uma tensão de compressão. Pela análise de microscopia óptica, se observou que a ação do ataque químico foi mais severa na amostra que sofreu deformação plástica, ou seja, o material calandrado. O ensaio de microdureza indicou maiores valores de dureza para o material que foi trabalhado a frio, tanto para análises de seção superficial quanto transversal, associado ao encruamento recorrente do processo.

Palavras-chave: Difração de Raios X, tensão residual, conformação mecânica.

## ABSTRACT

AIRES, Tábata. **Residual stress study by X-ray diffraction in 1020 carbon steel**. 2018. 35f. Graduation in Materials Engineering, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2018.

Carbon steel 1020 is composed of approximately 0.20% by weight of carbon, which classifies it as "sweet steel", being the most used steel in metallurgy due to its characteristics of easy mechanical conformation and low cost. However, when materials are subjected to cold work, it is practically inevitable that residual stress arise as dislocations are created and moved along the crystal lattice. Therefore, in this work, X-ray diffraction analysis (XRD) was used to evaluate the residual stress in a calendared 1020 carbon steel plate. Optical microscope, metallography and Vickers microhardness was also udes to characterize this material. Through the XRD analysis it was possible to observe the dislocation of the peaks characteristic of a 1020 steel, this dislocation indicate a compression stress. Optical Microscopy indicated that the action the chemical etching was more severe in the sample that suffered the plastic deformation. In the microhardness analysis higher hardness values were found for the material that was cold worked, both for the superficial and transversal analyzes, associated to the recurrent hardening of the process.

Keywords: X-Ray Diffraction, residual stress, mechanical conformation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama Fe-C em função da temperatura e da composição.....	14
Figura 2 - Demonstração de ondas construtivas .....	15
Figura 3 - Demonstração de ondas destrutivas .....	15
Figura 4 - Relação entre distância interplanar e ângulo de difração .....	16
Figura 5 - Deslocamento dos picos de difração associados a deformação plástica.....	19
Figura 6 - Picos característicos de difração de raios X do aço AISI 1020 .....	19
Figura 7 - Calandra Calfran CPM 2010 .....	22
Figura 8 - Pontos de medida do material com conformação mecânica em calandra. a) Seção superficial e b) seção transversal .....	24
Figura 9 - Pontos de medida do material sem conformação mecânica em calandra. a) Seção superficial e b) seção transversal .....	24
Figura 10 - Difratoograma de raios X do aço carbono 1020 laminado e conformado .....	25
Figura 11 - Difratoograma de raios X ampliado do aço carbono 1020 laminado e conformado.....	26
Figura 12 - Micrografia da seção superficial do aço carbono 1020. a) Ampliação de 100x e b) ampliação de 200x. Ataque: Nital 3% - 35 s .....	27
Figura 13 - Micrografia da seção transversal do aço carbono 1020. a) Ampliação de 100x e b) ampliação de 200x. Ataque: Nital 3% - 35 s .....	27
Figura 14 - Micrografia da seção superficial do aço carbono 1020 conformado em calandra. a) Ampliação de 100x e b) ampliação de 200x. Ataque: Nital 3% - 35 s.....	28
Figura 15 - Micrografia da seção transversal do aço carbono 1020 conformado em calandra. a) Ampliação de 100x e b) ampliação de 200x. Ataque: Nital 3% - 35 s.....	28
Figura 16 - Gráfico com a média e desvio padrão das medidas de microdureza HV.....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química em percentual do aço carbono AISI 1020.....	22
Tabela 2 - Resultados de microdureza vickers da seção superficial da amostra com conformação mecânica .....	29
Tabela 3 - Resultados de microdureza vickers da seção transversal da amostra com conformação mecânica .....	30
Tabela 4: Resultados de microdureza vickers da seção superficial da amostra sem conformação mecânica .....	31
Tabela 5: Resultados de microdureza vickers da seção transversal da amostra sem conformação mecânica .....	31

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

C	Carbono
Cu	Cobre
DRX	Difração de Raios X
F	Fósforo
Fe	Ferro
Mn	Manganês
MO	Microscopia Ótica
S	Enxofre
Si	Silício
$\mu\text{m}$	Micrômetro
$\Delta$	Delta
$\lambda$	Lambda
$\theta$	Theta
Å	Angstrom

## SUMÁRIO

RESUMO.....	4
ABSTRACT .....	5
LISTA DE FIGURAS .....	6
LISTA DE TABELAS .....	7
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	8
1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVO .....	11
2.1 Objetivo geral.....	11
2.2 Objetivo específico.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
3.1 Aço carbono.....	12
3.1.1 Aços com baixo teor de carbono .....	13
3.1.2 Aços com médio teor de carbono .....	13
3.1.3 Aços com alto teor de carbono .....	13
3.2 Aço carbono AISI 1020 .....	13
3.3 Difração de raios X (DRX).....	14
3.4 DRX para análise de tensão .....	17
3.5 Tensão em função da conformação mecânica.....	19
3.6 Conformação na calandragem .....	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	22
4.1 Materiais .....	22
4.2 Métodos .....	22
4.3 Análise de DRX.....	23
4.4 Preparação metalográfica .....	23
4.5 Análise de microdureza Vickers.....	23
5. RESULTADOS .....	25
5.1 Análise de DRX.....	25
5.2 Análise de imagem por MO.....	26
5.3 Análise de microdureza Vickers.....	29
6. CONCLUSÕES.....	33
7. REFERÊNCIAS.....	34

## 1. INTRODUÇÃO

O aço carbono 1020 é um material de fácil conformação mecânica, devido sua característica de alta ductilidade. Por também ser um material de baixo custo é muito utilizado industrialmente, sendo considerado o de maior aplicação em metalúrgicas em confecção de grandes peças. Entre os aços de baixo carbono, este é o de maior aplicação, e isso o torna interessante pelo ponto de vista de pesquisa, visando constante desenvolvimento em áreas industriais. As características citadas são atribuídas a sua microestrutura, composta pelas fases perlita mais ferrita (ARAÚJO, 2010; JÚNIOR, 2017).

Quando um material é submetido a conformações mecânicas, a sua microestrutura é modificada, fazendo com que acarrete na movimentação e formação de discordância na rede cristalina e por consequência, eleve sua dureza. Tal fenômeno nem sempre é favorável, podendo comprometer o desempenho deste componente por meio de pequenas trincas no interior do mesmo (SOUSA, 2012).

Um dos grandes desafios no setor de engenharia é a fabricação de novos componentes metálicos sem comprometer de forma nociva as características mecânicas dos materiais utilizados. Ao passar por processos como por exemplo, de conformação mecânica, o material se deforma plasticamente, mudando de forma permanente suas propriedades originais, e conseqüentemente, atribuindo tensões residuais para o mesmo (TURIBUS, 2014).

Portanto, uma forma eficiente de detectar tensões residuais de materiais muito utilizados industrialmente, é utilizando o método de difração de raios X, que através da Lei de Bragg, possibilita calcular e identificar a tensão atribuída ao material, através do deslocamento do pico de difração (TURIBUS, 2014).

Sendo assim, este trabalho visa analisar as tensões residuais por análise de difração de raios X e o encruamento ao passar por conformação mecânica provocada pelo processo de calandragem em aço carbono 1020 por meio ensaio de microdureza e análise de imagem por microscopia óptica.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo geral**

Desenvolver uma metodologia experimental de análise de tensões residuais proveniente do processo de calandragem em aço carbono 1020 por meio de difração de raios X (DRX), análise de microscopia ótica (MO) e microdureza Vickers.

### **2.2 Objetivo específico**

Analisar via DRX o deslocamento dos picos de difração do aço carbono 1020 sem deformação plástica e com deformação plástica proveniente de processo de calandragem.

Analisar a mudança da microestrutura do aço carbono 1020 via MO do material sem deformação plástica e do mesmo conformado em calandra.

Comparar o encruamento do aço carbono 1020 que passou por deformação plástica por conta do processo de calandragem e do mesmo sem esta deformação via análise de microdureza Vickers.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Aço carbono

Os aços ganham cada vez mais espaço no setor de engenharia e isso se deve a sua gama de aplicações e possibilidades de trabalho por um baixo custo. Tais materiais continuam com pesquisas em progresso para que seja obtido as melhores propriedades possíveis, levando a máximos resultados em serviço (SILVA, 2010).

Aços podem ser definidos como ligas de ferro-carbono com pequenos percentuais de outros elementos, tais como, Enxofre (S), Manganês (Mn), Silício (Si) e Fósforo (P), que são empregados durante o processo de fabricação em alto forno e até cerca de 2% de carbono (CHIAVERINI, 1997; COLPAERT, 2008).

As propriedades mecânicas dos aços está atribuída principalmente ao percentual de carbono, podendo assim, ser classificado como baixo, médio e alto carbono (CALLISTER, 2008). Esta classificação é de extrema importância para compradores e produtores destes materiais, visto que através de informações da composição química se dispõe informações de como é a melhor forma de aplicá-los (SILVA, 2010).

Além da classificação por composição química, também é importante que se conheça aspectos como temperabilidade, propriedades mecânicas, propriedades físicas, entre outros, assim, selecionado materiais para uma aplicação adequada (SILVA, 2010).

A aplicação destes materiais é tão abrangente quanto os diferentes tipos que temos no mercado. Esta variação ocorre também entre aços de baixo percentual carbono, ou também chamados de “aços doces”, que são muito utilizados na indústria para processos que careçam de conformação mecânica, como por exemplo, estampagem. Aços de médio e alto carbono, com uma aplicação voltada para ferramentas, engrenagens e outros produtos em que resistência ao desgaste seja mais exigido (VAN VLACK, 1973).

### **3.1.1 Aços com baixo teor de carbono**

São os aços produzidos em maior quantidade, com um percentual de carbono geralmente menor que 0,25%p. Não aceitam tratamento térmico para aumentar sua resistência, sendo assim, tal propriedade é conseguida por meio de trabalho a frio. Possuem baixa dureza, característico de sua microestrutura perlítica e ferrítica, implicando em boa usinabilidade e soldabilidade (CALLISTER, 2008).

### **3.1.2 Aços com médio teor de carbono**

Possuem um percentual de C geralmente entre 0,25 e 0,60%p. São aços que podem ser tratados termicamente para melhorar suas propriedades mecânicas. Possuem microestrutura de martensita revenida, implicando em uma ductilidade e tenacidade menor quando comparado aos aços de baixo carbono, mas com uma melhor resistência a abrasão (CALLISTER, 2008).

### **3.1.3 Aços com alto teor de carbono**

São aços em que na sua composição possuem um percentual de C entre 0,6 e 1,4%. São mais duros e resistentes se comparados aos aços baixo e médio C. Como consequência dessas propriedades, suas aplicações são voltadas a aplicações onde se necessita de uma maior resistência ao desgaste, como: parafusos, virabrequins, facas, engrenagens, entre outros (CALLISTER, 2008).

## **3.2 Aço carbono AISI 1020**

São aços com aproximadamente 0,2% C em peso, com sua microestrutura sendo formada pelo resfriamento da austenita em uma temperatura de 875°C e nucleando a fase ferrita no contorno de grão durante um resfriamento lento, até atingir 775°C. Ao atingir uma temperatura abaixo da linha

eutetóide, a fase austenita restante se transforma em perlita (JUNIOR, 2017; COLPAERT, 2008). O diagrama Ferro-Carbono (Fe-C) da Figura 1, ilustra em função de temperatura e composição química este processo.

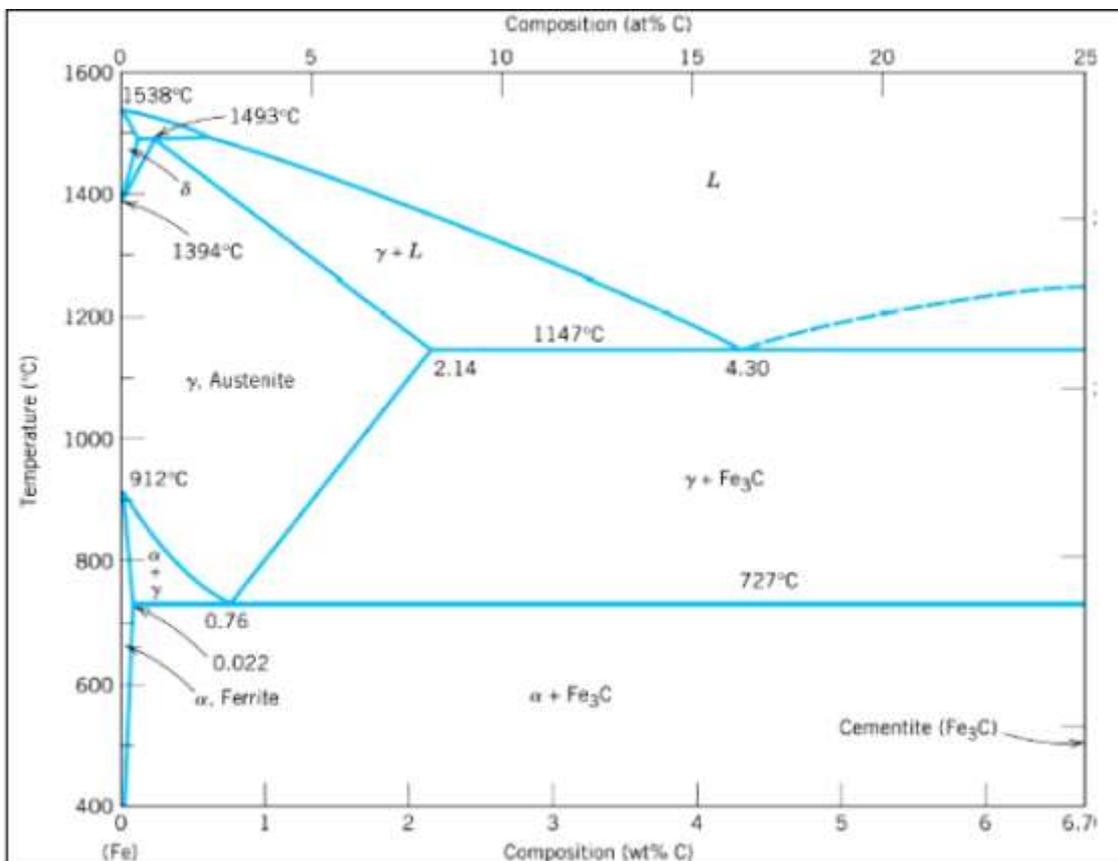


Figura 1 - Diagrama Fe-C em função da temperatura e da composição

Fonte: CALLISTER (2008, p.190)

A sua microestrutura é aproximadamente composta de 20% de perlita e 80% ferrita. A perlita atribui características de resistência ao aço, sendo assim, quanto maior for a área de lamelas, maior a sua dureza. A ferrita proporciona características de ductilidade para o mesmo (MONTEIRO, 2011).

O aço baixo carbono 1020 é o mais utilizados dentre os demais aços, por suas características de alta ductilidade, baixo custo e resistência razoável. Empregado em confecções de grandes peças e tubulações, ganham destaque nos setor de engenharia, apesar de não serem fáceis de tratar termicamente, é facilmente conformado, aumentado sua resistência por meio de trabalho a frio (ARAÚJO, 2010).

### 3.3 Difração de raios X (DRX)

O fenômeno de difração ocorre quando um feixe de raio X é desviado ao passa por uma barreira ou uma pequena abertura. Esses raios transmitem energia em forma de comprimentos de ondas, que podem ser somados ou anulados quando duas ondas de mesmo comprimento se encontram. A Figura 2, representa a interferência construtiva, ocorrendo um aumento da amplitude da onda resultante. A Figura 3, representa uma interferência destrutiva, havendo a anulação dessas ondas (CALLISTER, 2008).

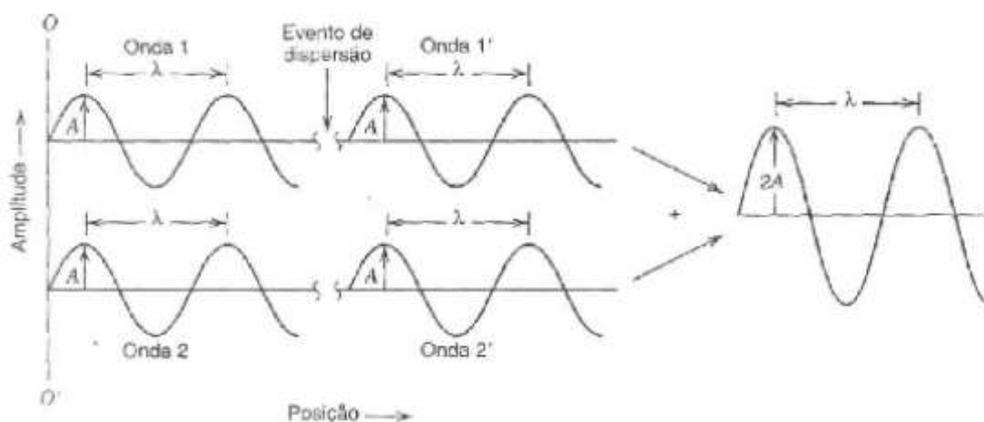


Figura 2 - Demonstração de ondas construtivas

Fonte: CALLISTER (2008, p. 50)

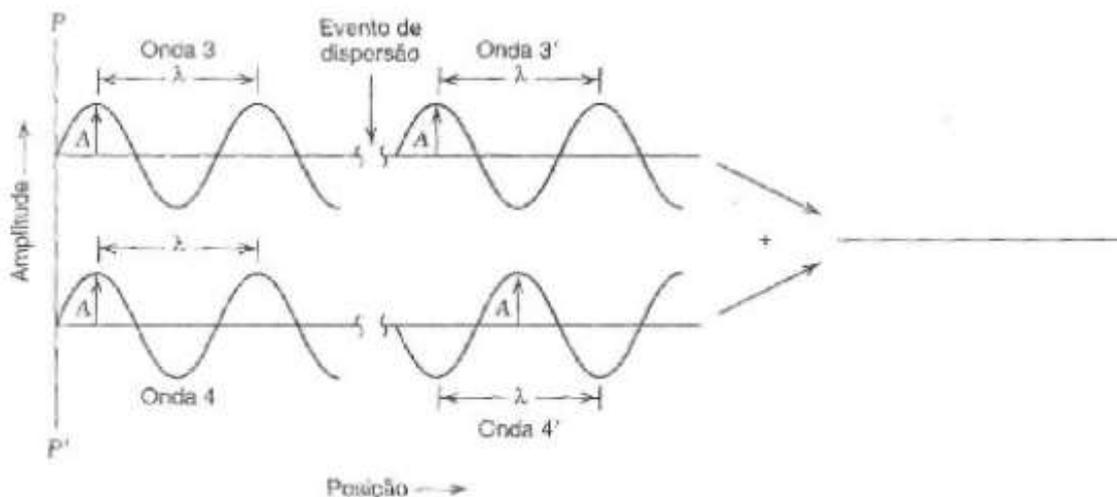


Figura 3 - Demonstração de ondas destrutivas

Fonte: CALLISTER (2008, p. 50)

Quando o feixe de raios X entra em contato com o material, parte do mesmo é absorvido e parte é refratada em uma certa direção e com uma variação de ângulo. Para que ocorra a difração de raios X de maneira construtiva,

a Lei de Bragg, representada abaixo na equação 1, deve ser satisfeita (SOUSA, 2012).

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (1)$$

Onde:

n: ordem da difração

$\lambda$ : comprimento de onda do raio X

d: distância interplanar dos cristais

Sendo assim, quando temos uma condição onde se tem um aumento da distância interplanar, por consequência o ângulo de difração diminui, fazendo com que o pico do difratograma se desloque para a direita e para situações em que esta distância entre os planos diminui, o ângulo de difração aumenta, com o pico se deslocando para a esquerda quando comparado com o difratograma do mesmo material sem a influência de deformação plástica (SOUSA, 2012). A Figura 4, ilustra esta relação. Tal deslocamento é proporcional a tensão residual presente neste material (TURIBUS, 2014).

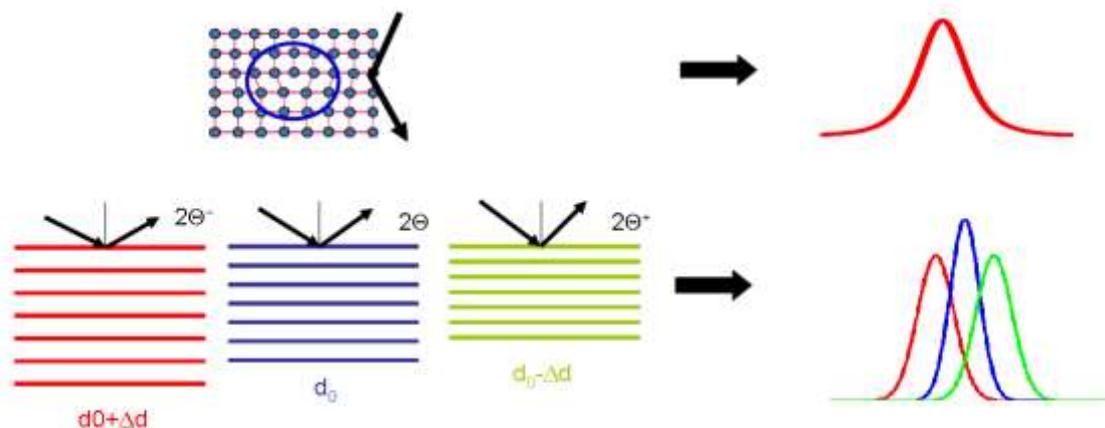


Figura 4 - Relação entre distância interplanar e ângulo de difração

Fonte: OSÓRIO, 2009

A difração de raios X pode ser aplicada para identificar fases, estrutura cristalina, composição química, reconhecer materiais amorfos ou cristalinos,

permite calcular células unitárias em materiais cristalinos e determinar tamanho e forma de cristalitos (SANTOS, 2012).

Leva-se em consideração três parâmetros ao analisar os picos de difração. A posição do pico se refere a composição química do material, a sua intensidade, podemos relacionar com o tipo de rede cristalina e o seu formato se atribui a microestrutura do material (OSÓRIO, 2009).

### **3.4 DRX para análise de tensão**

Se torna cada vez mais importante analisar e monitorar peças que sofrem conformação mecânica e por sua vez, possuem mais tensões residuais. Este monitoramento é fundamental para a manutenção e substituição destas. Com isso, o DRX se mostra a melhor opção para este tipo de estudo por ser uma técnica não destrutiva (SOUSA, 2012). O uso desta análise se estende à indústria, que veem uma forma de medida rotineira, afim de preservar o bom funcionamento de equipamentos e produtos, sendo eles cerâmicos, compósitos intermetálicos ou metais (SANTOS, 2012).

Uma das aplicabilidades da DRX, é a determinação da estrutura cristalina e do espaçamento entre os planos de um material através da posição dos picos de difração, e sua intensidade é correspondente ao arranjo dos átomos na célula unitária (CALLISTER, 2008).

Para que seja possível determinar tensões residuais em uma amostra, a análise é feita por meio da inclinação entre o ângulo de varredura e de uma função linear, sendo assim, possível obter o espaçamento interplanar. Tais tensões são representadas pelo deslocamento dos picos, onde quanto maior o deslocamento, maior a tensão atribuída a este material (TURIBUS, 2014; SOUSA, 2012).

A Lei de Bragg relaciona o comprimento de onda, distância interplanar e ângulo onde ocorre a maior intensidade de feixe difratado. Sendo assim, quando um material é submetido a deformações em forma de compressão, o mesmo sofre alterações na distância desses planos, fazendo com que este espaço

diminua (TURIBUS, 2014). A distância entre os planos pode ser calculada através da equação 2, levando em consideração os índices de Miller (h k l) e parâmetros da rede cristalina (CALLISTER, 2008).

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2)$$

Sendo:

d: Distância interplanar

hkl: Índices de Miller

a: Parâmetro da rede cristalina

Sendo  $d$  a distância interplanar de um material, podemos calcular por meio da equação 3, a variação desta deformação em materiais que passaram por uma deformação plástica, por consequência levando a uma estrutura cristalina deformada por compressão ou tração (TURIBUS, 2014).

$$\Delta d = d - d_0 \quad (3)$$

Onde  $d$  é a nova distância interplanar após passar por processo de deformação plástica e  $d_0$  a distância interplanar inicial.

Quando é feita uma comparação entre um mesmo material que não sofreu conformação mecânica e um que sofreu, os picos se mostram diferentes. Podemos inferir que para ângulos maiores, temos um  $d$  menor, característico de materiais que sofreram compressão. Para ângulos menores e um  $d$  maior, podemos atribuir a uma deformação plástica por tração (SOUSA, 2012). A Figura 5, ilustra o deslocamento dos picos de difração.

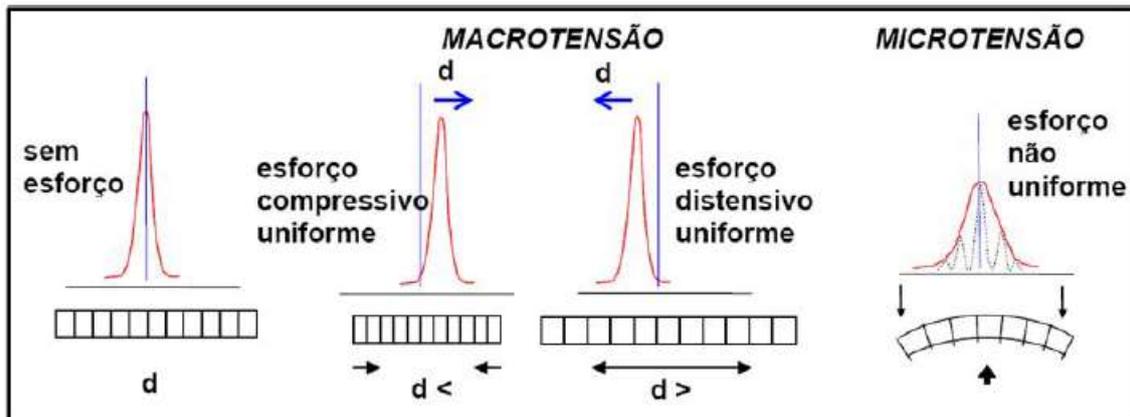


Figura 5 - Deslocamento dos picos de difração associados a deformação plástica

Fonte: SOUSA, 2012

A Figura 6, apresenta os picos do difratograma característicos do aço AISI 1020.

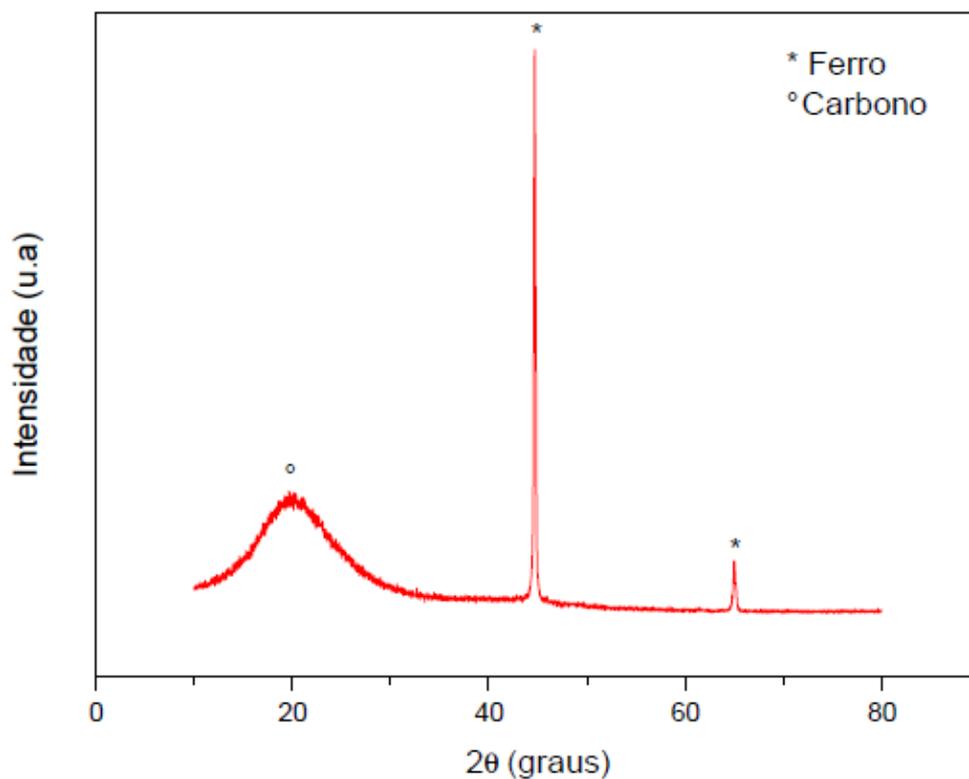


Figura 6 - Picos característicos de difração de raios X do aço AISI 1020

Fonte: ARAÚJO, 2010

### 3.5 Tensão em função da conformação mecânica

Ao passo em que um material é trabalhado a frio, passando assim a sofrer uma deformação plástica, o mesmo transita de um estado mais dúctil para mais duro, aumentando suas discordâncias em função da deformação (CALLISTER, 2008).

Ao passar por processos de conformação mecânica, é inevitável que o material apresente tensões residuais, sejam elas pelas cargas atribuídas ao processo ou temperatura, fazendo com que estas tensões permaneçam mesmo que seja retirado o esforço causador. Sendo assim, suas propriedades são comprometidas pela alteração de microestrutura (TURIBUS, 2014; BRITO, et al., 2017).

A resistência mecânica destes materiais é modificada quando submetido a conformações, fazendo com que pequenas tensões residuais, como por exemplo, a presença de defeitos ou trincas se propaguem durante o processo. Tal ocorrência é mais difícil de acontecer em materiais de maior ductilidade, pois a sua distribuição de tensões é mais uniforme (CALLISTER, 2008).

As tensões residuais por conformação mecânica são do tipo macroscópicas, onde essas tensões abrangem grande parte do volume do material se comparado ao seu tamanho de grão, tendo deformação praticamente uniforme para a maior parte deles e com variação ao longo da peça (SOUSA, 2012; SANTOS, 2012).

### **3.6 Conformação na calandragem**

Aço destinados para conformação mecânica, em sua maioria, são de baixo teor de carbono por seu baixo custo e boa formabilidade. Além destes fatores, algumas características também devem ser levadas em consideração, como a resistência mecânica, deformação uniforme e inclusões metálicas (SILVA, 2010).

A calandra é constituída de três ou mais cilindros rotativos onde passam as chapas a serem conformadas, podendo assim, produzir tubos ou peças curvas (POLL, 2008).

Por conta do encruamento atribuído ao processo, a microestrutura é modificada, fazendo com que os grãos do material fiquem alongados em direção preferencial da tensão aplicada, atribuindo em uma resistência maior neste sentido (ASKELAND, 2015).

Neste tipo de processamento o material é trabalhado a frio, o que faz com que ocorram mudanças em suas propriedades. Na proporção em que o material é deformado acontece encruamento, ou seja, sua dureza aumenta e sua ductilidade diminui. Se o material a ser calandrado não for bem trabalhado, como por exemplo em casos de deformações exorbitantes, pode ocorrer trincas antes que seja atingido o dimensionamento ideal da peça (SILVA, 2010).

O aumento da resistência mecânica a partir de conformação a frio se deve as discordâncias provocadas na microestrutura. Ao aplicarmos uma tensão superior ao limite de escoamento, o material se deforma plasticamente, sendo assim, quando retirada a tensão ele não volta para a sua forma original. Passado este estado, e aplicando mais tensão, o material se rompe (ASKELAND, 2015).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

O material utilizado foi uma chapa de aço carbono AISI 1020 cedida por uma metalúrgica local. Abaixo, na Tabela 1, é apresentada a composição química do mesmo.

Tabela 1- Composição química em percentual do aço carbono AISI 1020

Material	%C	%Mn	% P máx	% S máx
<b>SAE/AISI 1020</b>	0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,030	0,050

Fonte: Manual de aços Gerdau

Disponível em:

[http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo\\_acos\\_gerdau.pdf](http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf). Acesso em: 16 Nov. 2018

### 4.2 Métodos

Para a conformação mecânica da chapa de aço carbono 1020, foi utilizada uma calandra de 3 rolos, ilustrada na Figura 7, modelo Calfran CPM 2010.



Figura 7 - Calandra Calfran CPM 2010

Fonte: Próprio autor

### **4.3 Análise de DRX**

Para análise de difração de raios X foi utilizado o equipamento de marca Bruker D8 modelo Advanced. Foi submetido a análise amostra que passou por conformação mecânica em calandra e amostra de referência sem conformação mecânica proveniente do processo de calandragem. As medidas foram realizadas na faixa angular de  $10^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  com passo de 0.05 e tempo de 1s.

### **4.4 Preparação metalográfica**

As amostras foram lixadas manualmente para remoção de óxidos superficiais, sob refrigeração em lixadeira manual utilizando papéis abrasivos de granulometria crescente seguindo a ordem 80, 180, 220, 400, 600 e 1000. Posteriormente, as amostras foram polidas utilizando alumina em suspensão de granulometria média de 1  $\mu\text{m}$  como abrasivo fazendo o uso de uma Politriz da marca Aerotec. A fim de revelar a microestrutura, as amostras foram atacadas com Nital 3%, uma mistura de ácido nítrico e álcool etílico na proporção de 3:100, durante 35 segundos. Após o ataque, imagens da microestrutura das amostras foram obtidas por microscópio ótico (MO) Olympus BX41M e posteriormente avaliadas.

### **4.5 Análise de microdureza Vickers**

Para análise de microdureza Vickers, foi utilizado o microdurômetro da marca Futuretech, modelo FM700. Foram analisadas amostras de chapa de aço carbono 1020 que passou pelo processo de conformação mecânica em calandra da sua seção superficial e transversal, onde os pontos de análise são ilustrados na Figura 8. Para a chapa de aço que não sofreu conformação mecânica por calandragem também foi medida a dureza da seção superficial e transversal. Os pontos de medida são ilustrados na Figura 9.

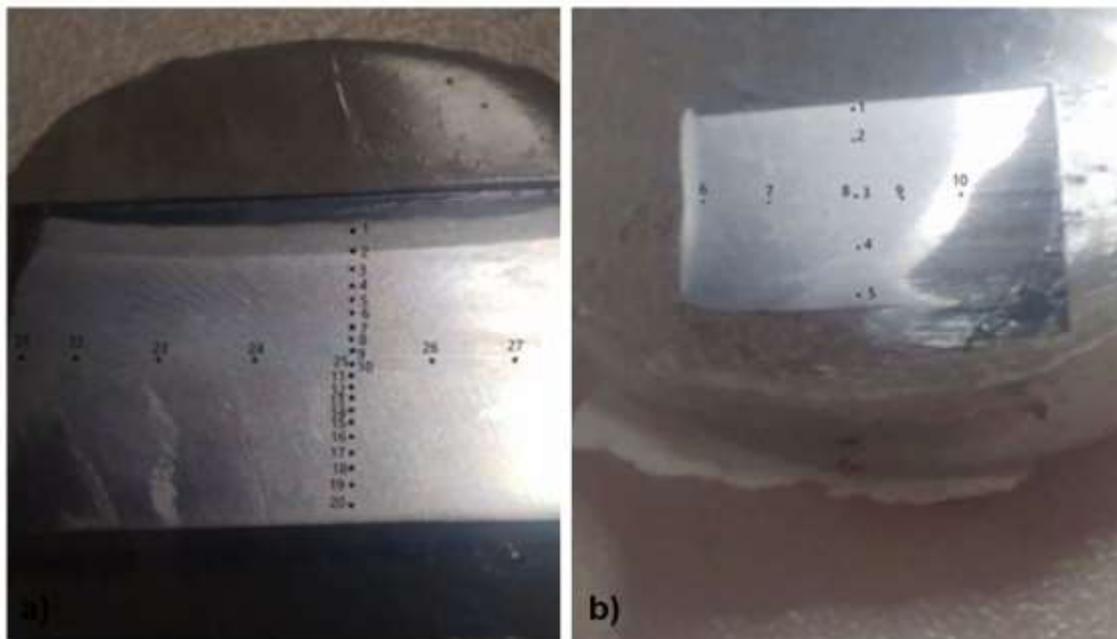


Figura 8 - Pontos de medida do material com conformação mecânica em calandra. a) Seção superficial e b) seção transversal

Fonte: Próprio autor

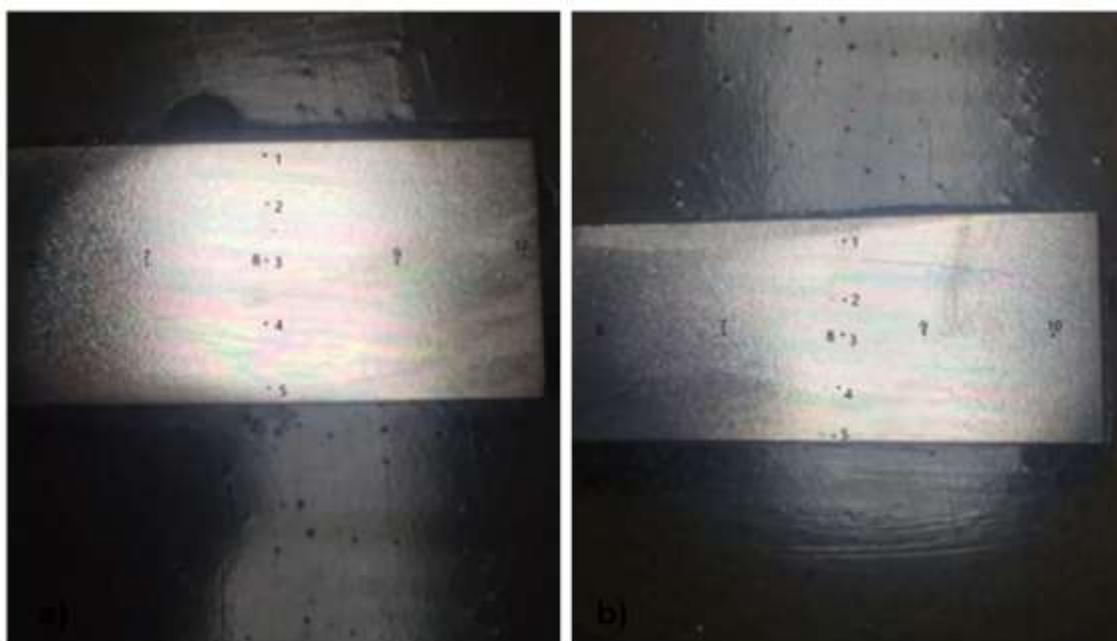


Figura 9 - Pontos de medida do material sem conformação mecânica em calandra. a) Seção superficial e b) seção transversal

Fonte: Próprio autor

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Análise de DRX

Os difratogramas da Figura 10, são referentes a chapa de aço carbono 1020, com os picos característicos deste material. Em preto, a amostra que não sofreu processo de conformação mecânica em calandra e em vermelho, a amostra passada em calandra.

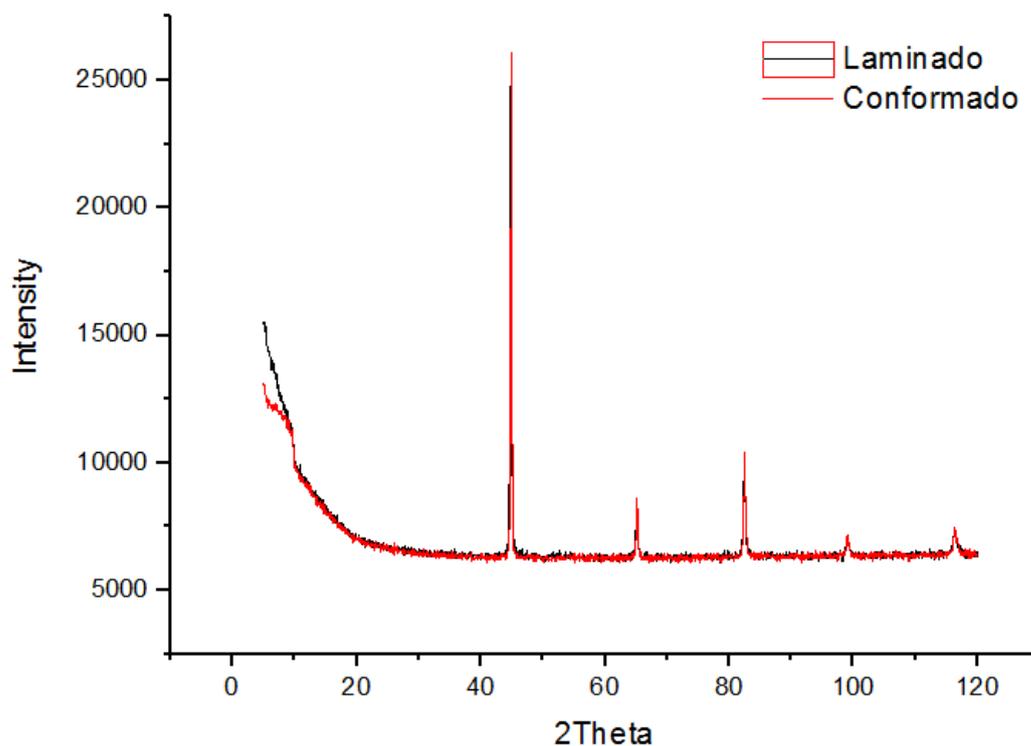


Figura 10 - Difratograma de raios X do aço carbono 1020 laminado e conformado

Fonte: Próprio autor

A partir do difratograma do aço 1020, pode-se observar picos em 43, 63 e 81 2theta, característicos deste material, segundo ficha de cadastro JCPDS número 89-7194 e 74-2329.

Fazendo uma análise mais detalhada destes picos, observa-se que os mesmos estão com alguns graus de deslocamento, que pode ser observado na Figura 11 para o pico em 22,405  $\theta$ . Comparando os valores de  $\theta$  para ambas as amostras, se verifica que passou de 22,405  $\theta$  para a amostra sem calandragem, para 22,455  $\theta$  na amostra calandrada. Considerando que o comprimento de onda

( $\lambda$ ) dos raios X utilizados foi de 1,54Å (Cu), e utilizando a lei de Bragg, se observou uma mudança de 2,020 para 2,016 no valor do espaçamento interplanar (d). Observou-se então que o deslocamento do pico ocorreu para a direita, indicando uma compressão dos planos, resultado de um esforço de compressão. Esta indicação pôde ser confirmada com o cálculo do d.

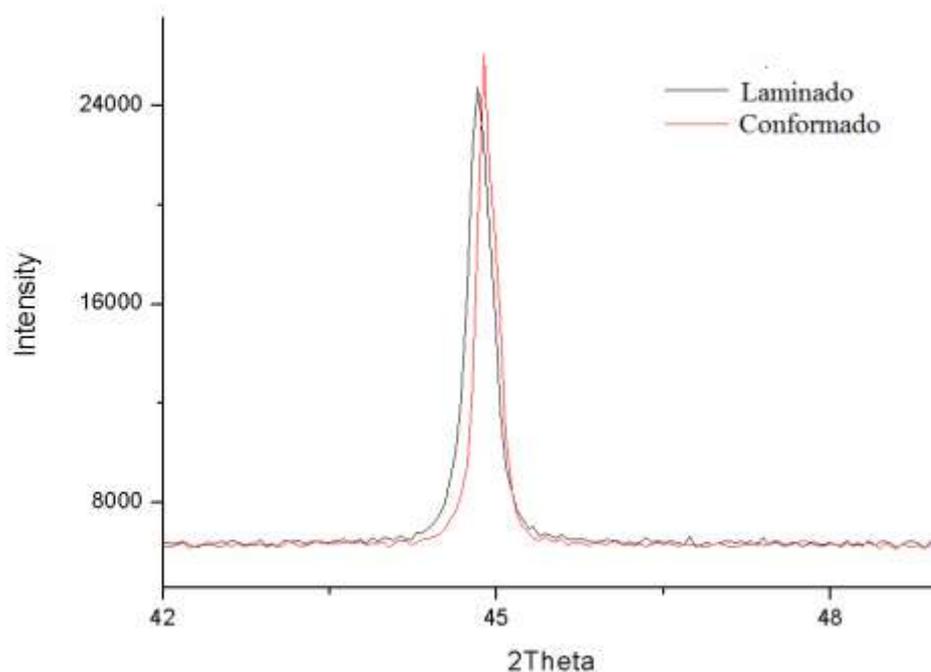


Figura 11 - Difratograma de raios X ampliado do aço carbono 1020 laminado e conformado

Fonte: Próprio autor

## 5.2 Análise de imagem por MO

A micrografia da Figura 12 apresenta imagens de topo da chapa de aço carbono 1020 sem conformação mecânica por calandragem, e a Figura 13 apresenta imagens da seção transversal do mesmo. A fase clara é correspondente a ferrita e a fase escura é identificada como perlita.



Figura 12 - Micrografia da seção superficial do aço carbono 1020. a) Ampliação de 100X e b) ampliação de 200X. Ataque: Nital 3% - 35 s

Fonte: Próprio autor

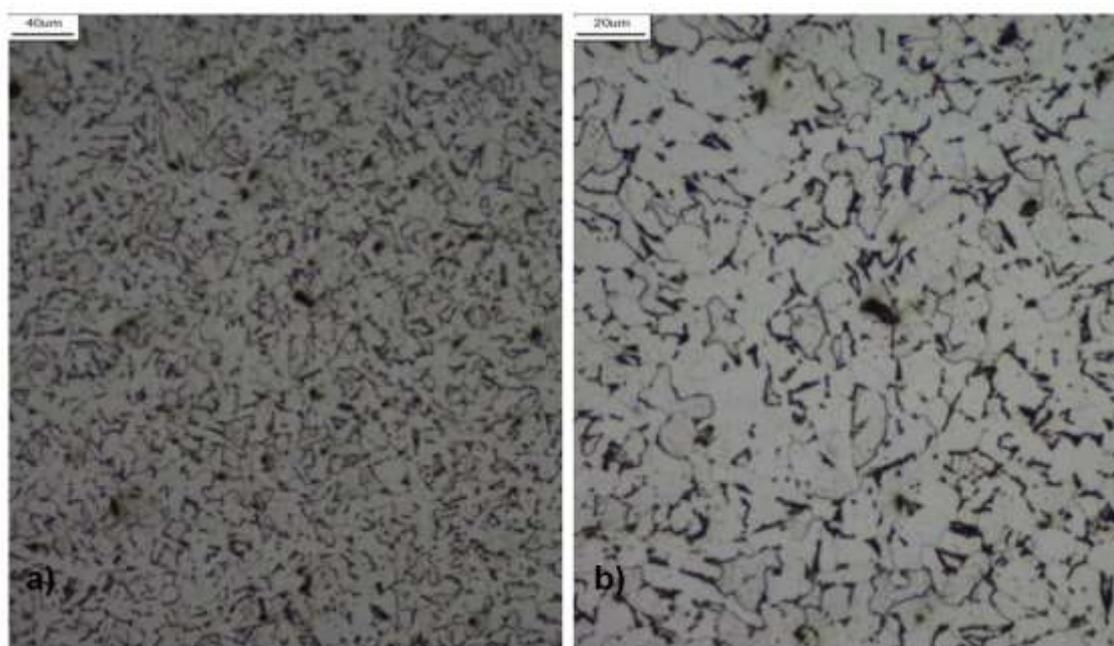


Figura 13 - Micrografia da seção transversal do aço carbono 1020. a) Ampliação de 100X e b) ampliação de 200X. Ataque: Nital 3% - 35 s

Fonte: Próprio autor

As micrografias da Figura 14 apresenta imagens de topo da chapa de aço carbono 1020 que passou por deformação plástica a partir da calandragem, e a Figura 15 apresenta imagens da seção transversal do mesmo.

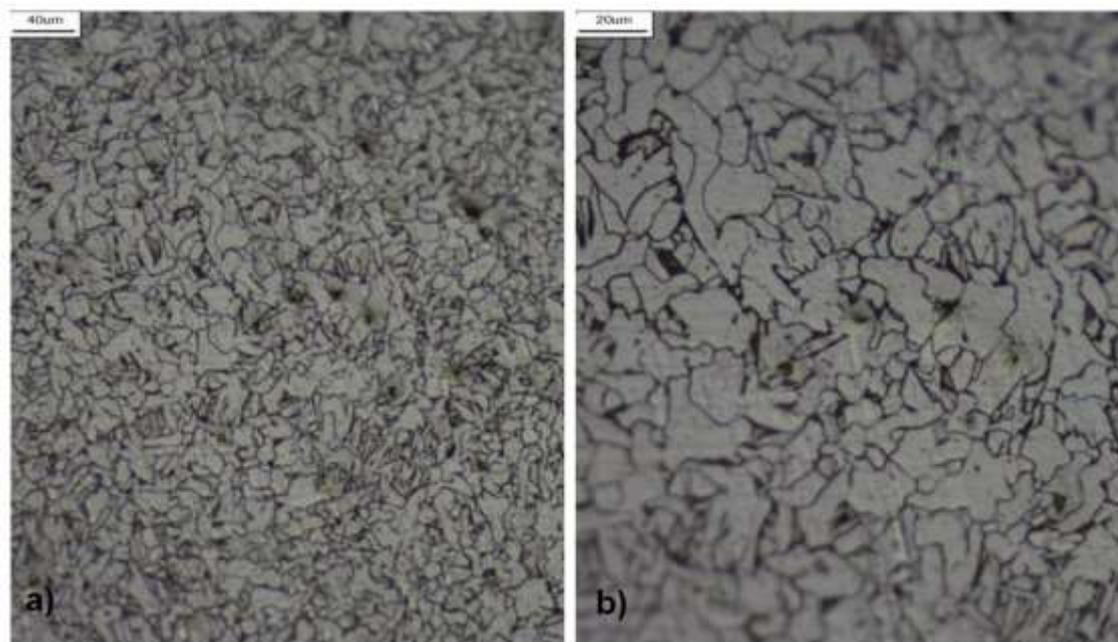


Figura 14 - Micrografia da seção superficial do aço carbono 1020 conformado em calandra. a) Ampliação de 100X e b) ampliação de 200X. Ataque: Nital 3% - 35 s

Fonte: Próprio autor

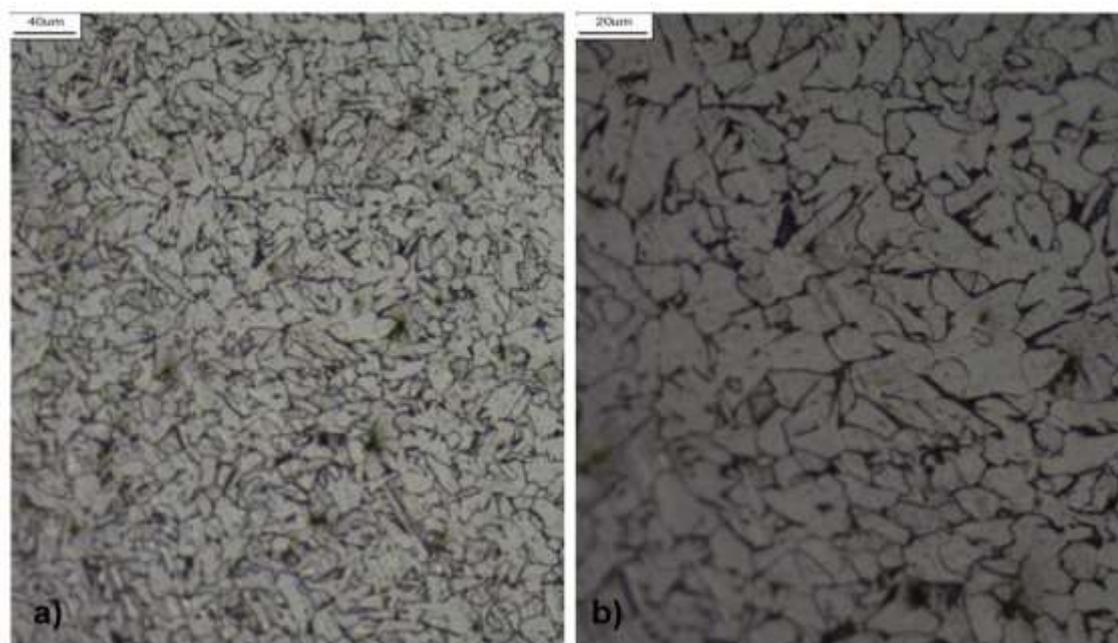


Figura 15 - Micrografia da seção transversal do aço carbono 1020 conformado em calandra. a) ampliação de 100X e b) ampliação de 200X. Ataque: Nital 3% - 35 s

Fonte: Próprio autor

Ambas amostras apresentaram mesma microestrutura e, com as ampliações permitidas pelo MO, não foi possível observar diferença significativa no tamanho e formato dos grãos. No entanto, se observou que para a utilização do mesmo ataque químico e mesmo tempo, a amostra que sofreu deformação por calandragem apresentou uma maior reatividade/revelação dos contornos de grão. A partir deste resultado, pode-se sugerir que as amostras que sofreram deformação plástica são mais susceptíveis ao ataque químico por possuírem uma “tensão interna maior” como o que foi exposto por FERNANDES, 2010. Acredita-se que isto se deve à geração e movimentação de discordâncias provocadas pelo processo de calandragem. As mesmas migram para os contornos de grão, tornando os mesmos mais susceptíveis a corrosão química.

### 5.3 Análise de microdureza Vickers

A Tabela 2, exibe os resultados de microdureza Vickers do topo/superfície da amostra que sofreu processo de conformação mecânica por calandragem e a Tabela 3, da sua seção transversal. Os valores médio de microdureza Vickers para a seção superficial da amostra foi de 130.45 HV com desvio padrão de 15.74 HV e para a seção transversal, o valor médio de microdureza Vickers é de 151.96 HV com desvio padrão de 23.38 HV.

Tabela 2 - Resultados de microdureza Vickers da seção superficial da amostra com conformação mecânica

Pontos de Medida	Microdureza Vickers
1	148.0
2	132.5
3	117.2
4	140.6
5	130.5
6	112.9
7	132.5
8	110.0
9	108.8

10	135.8
11	114.5
12	150.0
13	132.1
14	140.6
15	148.0
16	120.3
17	128.9
18	123.6
19	110.4
20	174.9
21	150.0
22	139.3
23	141.5
24	126.9
25	135.8
26	99.7
27	122.8
28	126.6
29	138.0
30	121.0

Fonte: Próprio autor

Tabela 3 - Resultados de microdureza Vickers da seção transversal da amostra com conformação mecânica

<b>Pontos de Medida</b>	<b>Microdureza Vickers</b>
1	128.1
2	142.9
3	147.1
4	183.9
5	174.3
6	166.5
7	117.5
8	147.1

9	130.9
10	181.3

Fonte: Próprio autor

Os resultados da Tabela 4 são referentes a superfície da amostra que não passou por conformação mecânica pelo processo de calandragem, a Tabela 5 exhibe resultados de microdureza Vickers da seção transversal desta amostra. O valor médio de microdureza Vickers para a seção superficial da amostra é de 104.26 HV com desvio padrão de 16.6 HV. O valor médio para a seção transversal é de 116.72 com desvio padrão de 14.77 HV.

Tabela 4: Resultados de microdureza Vickers da seção superficial da amostra sem conformação mecânica

<b>Pontos de Medida</b>	<b>Microdureza Vickers</b>
1	102.1
2	101.3
3	97.9
4	122.5
5	105.3
6	82.9
7	109.1
8	97.9
9	84.8
10	138.8

Fonte: Próprio autor

Tabela 5: Resultados de microdureza Vickers da seção transversal da amostra sem conformação mecânica

<b>Pontos de Medida</b>	<b>Microdureza Vickers</b>
1	119.6
2	95.6
3	126.6
4	118.9
5	104.1
6	125.4
7	135.0

8	126.6
9	124.7
10	90.7

Fonte: Próprio autor

Com os valores de microdureza Vickers obtidos, observou-se que a dureza é maior para a chapa de aço carbono 1020 que passou pelo processo de conformação mecânica em calandra. Este resultado é esperado pela literatura, conforme discutido no tópico 3.6, levando em consideração que o material ao passar por trabalho a frio, cria discordâncias, passando de um estado mais dúctil para um mais duro devido ao encruamento provocado no trabalho a frio (SILVA, 2010).

A Figura 16 apresenta um gráfico com a média e desvio padrão das medidas realizadas, em todas as amostras.

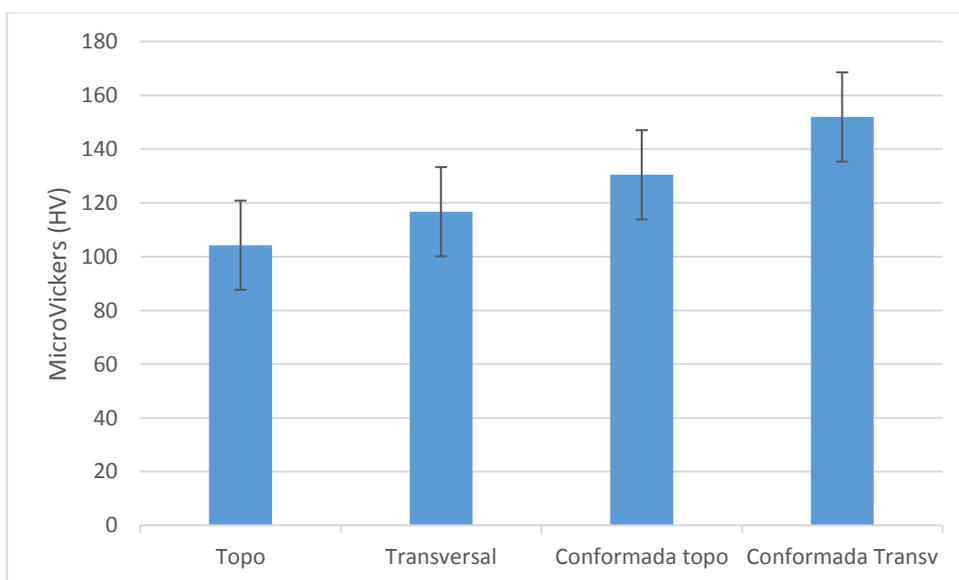


Figura 16 - Gráfico com a média e desvio padrão das medidas de microdureza HV

Fonte: Próprio autor

## 6. CONCLUSÕES

A partir da análise de DRX, conclui-se que o deslocamento dos picos do difratograma para a direita refere-se a uma tensão de compressão que o material que sofreu deformação plástica foi submetido. A distância interplanar após passar por conformação mecânica passa de 2,020 para 2,016.

Através de análise de micrografia, conclui-se que há um indicativo de tensão no material conformado mecanicamente, devido a uma maior susceptibilidade ao ataque químico nos contornos de grão, em função do aumento de discordâncias no local.

Com os resultados de microdureza Vickers podemos confirmar o esperado na literatura, a respeito do aumento de dureza em materiais que passam por conformação mecânica a frio. A seção superficial da amostra que passou pelo processo de calandragem teve um aumento de 20,12% no valor médio de dureza, enquanto a seção transversal, um aumento de 23,19%.

Em resumo, a técnica de DRX se mostrou eficiente para caracterizar pequenas tensões residuais ocorridas em função de um baixo grau de deformação do material, sofrido no processo de calandragem. As técnicas de MO e microdureza HV corroboram com os resultados apresentados a partir dos difratogramas.

## 7. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Medeiros Danyelle. **Estudo da corrosão no aço carbono 1020 protegido com óleo de coco saponificado: análise físico-química do comportamento químico do tensoativo**. Natal, 2010. Dissertação (Química) – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, 2010.

ASKELAND, Donald R; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2015

BRITO, Fernanda. Et al. **Análise de tensão residual por meio de Difração de Raios X**. Rio de Janeiro, 2017. Revista Militar de Ciência e Engenharia. RMCT VOL.34 N°3 2017.

CALLISTER JR., William. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1997.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

FERNANDES, Carlos João. **Desenvolvimento de um dispositivo tipo carga constante para avaliação da suscetibilidade à corrosão sob tensão de aço inoxidável austenítico**. Itajubá, 2010. Dissertação (Materiais para engenharia) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2010.

JUNIOR, Silva Gilson. **Estudo da influência do processo ECAP (Equal Channel Angular Pressing) nas propriedades mecânicas e características microestruturais do aço SAE 1020**. Guaratinguetá, 2017. Dissertação (Engenharia Mecânica) – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, 2017.

MONTEIRO, Castro Alberto. **Estudo do comportamento dos aços ferramentas soldados em fadiga**. Belém, 2011. Dissertação (Engenharia Elétrica) – UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, 2011.

OSÓRIO, Gonçalves Alice. **In-situ study of mechanical properties using x-ray and neutron diffraction.** Torino, 2009. Dissertação (Materials Science) - Università Degli Studi di Torino, 2009.

POLL, Trojan Márcia. **Uma metodologia para a automação do processo de conformação por calandras.** Santa Maria, 2008. Dissertação (Engenharia de Produção) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, 2008.

SANTOS, Zangerolame Camila. **Estudo da tensão residual através de difração de raios X em aço inoxidável duplex submetido a diferentes tratamentos térmicos.** Vitória, 2012. Dissertação (Engenharia Mecânica) – UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, 2012.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais.** 3. ed. rev. São Paulo: Ed. Blucher, 2010.

SOUSA, Diogo. **Determinação de tensões residuais em materiais metálicos por meio de ensaio de dureza.** São João Del-Rei, 2012. Dissertação (Engenharia Mecânica) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI, 2012.

TURIBUS, Nolêto Sérgio. **Análise por difração de raios X do estado das tensões residuais em chapas de aço inoxidável duplex após soldagem.** Rio de Janeiro, 2014. Dissertação (Engenharia Nuclear) – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2014.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de ciência dos materiais.** São Paulo: Edgard Blucher, 1973.