

AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO IF, LAMINADO A FRIO E RECOZIDO

EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MICROESTRUTURALES Y MECÁNICAS DE SI, FRÍO Y ACERO RODADO SI

MICROSTRUCTURAL AND OF THE MECHANICAL PROPERTIES EVALUATION OF IF STEEL, COLD ROLLED AND ANNEALED

Valmir Torres de Oliveira*
valmirtjt@gmail.com

Janaina da Costa Pereira Torres de Oliveira*
janainacpto@gmail.com

José Mauro Moraes Junior*
josemaurojr@hotmail.com.br

Leone Arthur Mattos*
leone.mattos@hotmail.com

Rafael de Sousa Carvalho*
rafaelcaarvalho@hotmail.com

*Centro Universitário Geraldo di Biase, Volta Redonda, Brasil

Resumo

Nos dias atuais, os bens de consumo duráveis (automóveis, eletrodomésticos e outros) vêm sofrendo uma contínua evolução tecnológica e para atender às necessidades da humanidade novos materiais estão sendo desenvolvidos para se ter custo relativamente baixo cujo desempenho atenda aos requisitos solicitados. Na produção desses tipos de bens de consumo, as chapas laminadas de aço têm aplicações praticamente universais, pois podem assumir as mais variadas propriedades atendendo diversas aplicações. No entanto, o setor industrial que utiliza tal material tem ficado cada vez mais exigente, tanto em relação ao custo; quanto em relação ao aprimoramento das propriedades mecânicas das chapas. Com isso, se faz necessário caracterizar a microestrutura das chapas laminadas de aço e examinar suas propriedades mecânicas com o objetivo de se verificar o atendimento delas às exigências tecnológicas das indústrias atuais. Neste trabalho foi estudada a chapa de aço IF laminada a frio e recozido, a fim de verificar sua capacidade em atender o mercado tanto na resistência mecânica como na alta capacidade de deformação. Após os ensaios metalográficos e mecânicos realizados foi verificado que o material estudado é capaz de atender essas exigências.

PALAVRAS CHAVE: Chapas laminadas. Caracterização microestrutural. Propriedademecânica.

Resumen

Hoy en día, los bienes de consumo duraderos (automóviles, electrodomésticos y otros) han experimentado una evolución tecnológica continua y para satisfacer las necesidades de la

humanidad, se han desarrollado nuevos materiales con un costo relativamente bajo cuyo rendimiento cumple con los requisitos solicitados. En la producción de este tipo de bienes de consumo, las láminas de acero laminadas tienen aplicaciones prácticamente universales, ya que pueden asumir las más variadas propiedades para diversas aplicaciones. Sin embargo, el sector industrial que utiliza dicho material se ha vuelto cada vez más exigente tanto en términos de costo; respecto a la mejora de las propiedades mecánicas de las placas. Por lo tanto, es necesario caracterizar la microestructura de las láminas de acero laminadas y examinar sus propiedades mecánicas para verificar su cumplimiento con los requisitos tecnológicos de las industrias actuales. En este trabajo, se estudió la placa de acero IF laminada en frío y recocida para verificar su capacidad de satisfacer al mercado tanto en resistencia mecánica como en alta capacidad de fluencia. Después de las pruebas metalográficas y mecánicas realizadas, se verificó que el material estudiado es capaz de cumplir con estos requisitos.

PALABRAS CLAVE:Láminas laminadas. Caracterización microestructural. Propiedad mecánica.

Abstract

Nowadays, the durable consumer products (automobiles, appliances, and others) have been suffering a continual technology evolution and to attend the needs of humanity, new materials have been developed to have cost relatively low whose performance meet the requirements requested. In production these types of consumer products, the rolled plates of steel has applications practically universal, since can assume the most varied possessions meeting different applications. However, the industrial sector that use such material, have been remained increasingly demanding, so much in relation to the cost, about in relation to the improvement of the mechanical properties of the plates. With it, is made necessary to characterize the microstructure of the rolled steel plates and to examine their mechanical properties with the objective to check the attendance he same the technological demand of moderns industrial. In this work the cold rolled and annealed IF steel plate was studied to verify its capacity to meet the market in both mechanical resistance and high deformation capacity. After the metallographic and mechanical tests, it was verified that the studied material can meet these requirements.

KEYWORDS: Rolled plates. Microstructural characterization. Mechanical property.

1. Introdução

Com a grande evolução tecnológica existente hoje no mundo, os produtos siderúrgicos também estão se adaptando ao que é requerido, melhorando seus aspectos mecânicos, físicos e químicos, apresentando um baixo custo, já que o fator econômico é um grande atrativo na escolha do produto.

A indústria automotiva tem promovido, nas últimas décadas, grandes avanços na evolução metalúrgica dos aços. Os primeiros automóveis possuíam formas quadradas, basicamente em função da baixa estampabilidade das chapas de aços ferrítico-perlíticos produzidos na época. Porém, a redução de preço e melhoria do design dos automóveis, exigidos pela indústria automotiva, obrigou as empresas a evoluírem tecnologicamente para produzir aço com menor custo e com alta estampabilidade. Outro fator motivador para a evolução tecnológica das chapas laminadas advém do constante aumento do preço dos combustíveis, obrigando a redução de seu consumo, portanto, a redução do peso dos automóveis novamente provoca novas mudanças tecnológicas.

Os aços livres de intersticiais (deste ponto em diante chamados de aços IF – InterstitialFree), correspondem a essas mudanças tecnológicas, não só para a indústria automotiva como também para a indústria de embalagens. Chapas fabricadas com esses aços são capazes de suportar altos níveis de

deformação, sem afetar suas propriedades mecânicas, permitindo que a chapa adquira diferentes formatos. A estampagem profunda é uma das principais aplicações para os aços IF pois ele tem boa embutibilidade e um ótimo estiramento. Os aços IF também não sofrem envelhecimento (endurecimento por precipitação), uma vez que o carbono e nitrogênio ainda presentes estão totalmente combinados na forma de precipitados.

O objetivo deste trabalho foi caracterizar a microestrutura e verificar as propriedades mecânicas de uma chapa laminada de aço IF. A caracterização microestrutural será ao longo da largura utilizando microscopia óptica (MO), e as propriedades mecânicas serão verificadas através de ensaios de dureza, de embutimento e de tração.

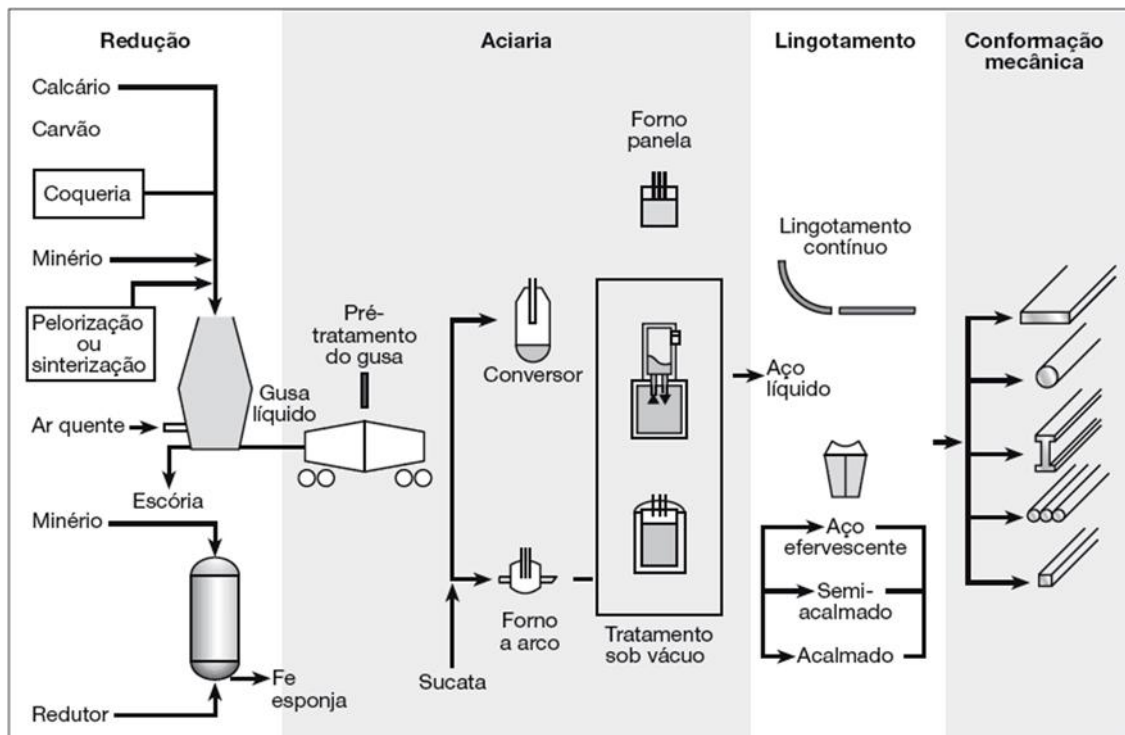
2. Referencial Teórico

Segundo Chiaverini (1998), aço é uma liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% de carbono, máxima solubilidade do carbono no ferro, até aproximadamente 2,11% de carbono, isto é, abaixo de 0,008% o material é classificado como “ferro”. A capacidade dos processos de refino produzirem aços com teores muito baixos de carbono levou ao desenvolvimento dos aços IF, em que o teor de carbono máximo está na faixa de dezenas de partes por milhão (ppm), questionando a validade dessa classificação (COLPAERT, 2008).

Os aços IF passaram a ser comercializados a partir de 1970, com teores de carbono e nitrogênio na faixa de 20 a 30 ppm (0,002-0,003%) máximos com adições de elementos formadores de carbonetos e nitretos, tais como titânio e nióbio (SILVA; MEI, 2006). Nos últimos anos, os aços IF vêm aumentando sua participação na fabricação de painéis para a carroceria de automóveis, apresentando níveis altos de estampabilidade em função de seus ultrabaixos teores de átomos intersticiais, como carbono e nitrogênio, menores que 0,003 e 0,004% (30 e 40 ppm), respectivamente, o que proporciona baixo limite de escoamento e alta resistência à redução de espessura durante a deformação a frio (GORNI, 2010).

O ciclo de produção de aço é representado na Figura 1, tanto a partir do minério (conversor LD – Linz-Donawitz) quanto a partir da sucata (FEA – Forno Elétrico a Arco). O que muda para a produção de aço IF é o refino secundário (processo de descarburização), isto é, o tratamento sob vácuo. Consequentemente, todos os parâmetros dos processos posteriores à aciaria são afetados pelo aço produzido na aciaria.

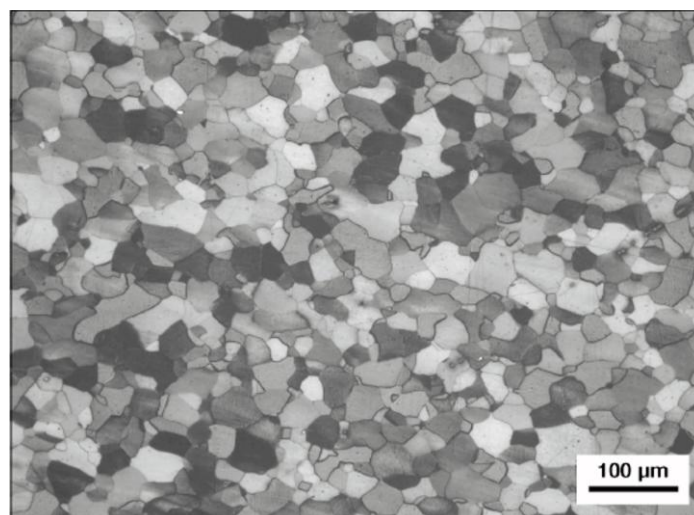
Figura 1. Fluxograma de produção do aço com as diversas alternativas de processo para cada etapa



Fonte:COLPAERT (2008, p. 11)

A descarburização sob vácuo, realizada pelo processo de refino secundário sob vácuo, viabilizou a produção de aços com teores extra baixos de carbono, neste caso favorecendo a oxidação do carbono em relação ao próprio ferro. Devido ao processo de descarburização, os aços IF são classificados, devido a sua composição química, como aço extra baixo carbono, com microestrutura ferrítica devido a transformação da austenita (γ -CFC) em ferrita (α -CCC). Uma microestrutura típica de aço IF pode ser visualizada na Figura 2.

Figura 2. Aço IF (C = 26 ppm, N = 30 ppm, Ti = 600 ppm) recozido. Grãos de ferrita poligonais (equiaxiais). Ataque: Klemm



Fonte:COLPAERT (2008, p. 98)

Segundo Moraes e Carvalho (2016) mesmo o material que passa pelo processo de laminação a frio, onde os grãos se tornam alongados, é possível obter grãos no formato equiaxial após o recozimento devido a ocorrência da recristalização do material.

Após a fabricação do aço IF na aciaria, ele é lingotado, laminado a quente, laminado a frio, recozido e posteriormente passa pelo laminador de encruamento. A composição química especificada para os aços IF para estampagem extra profunda (EEP Grau 3) é dada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço IF (EEP Grau 3)

| Elemento | % Mín | % Máx | Observações |
|----------|--------|--------|--|
| C | – | 0,0070 | – |
| Mn | – | 0,3500 | – |
| P | – | 0,0200 | – |
| S | – | 0,0200 | – |
| Ti | – | 0,2000 | – |
| B | – | 0,0005 | Para aplicações onde a presença do B não é conveniente. |
| Al | 0,0100 | – | – |
| Nb + Ti | – | 0,2000 | O Nb pode ser usado para substituir todo ou parte do Ti. |

Fonte: NBR 5915-2 (ABNT, 2013)

Em relação a estampabilidade, os aços IF apresentam excelentes propriedades mecânicas, isto é, baixo limite de escoamento, alto alongamento uniforme associado a um coeficiente de encruamento elevado e uma adequada textura cristalográfica. Conforme Oliveira (2010) devido a essas características o aço IF, quando comparado com os aços baixo carbono convencional, proporcionam uma conformabilidade superior com alto valor de coeficiente de anisotropia normal (r). Segundo Sardinha (2012, p. 29) “uma pequena anisotropia planar, $D_r \approx 0$, juntamente com um alto valor de anisotropia normal média, r_m , é o que tem sido buscado pelos pesquisadores para permitir uma performance ótima de estampagem”. As propriedades mecânicas especificadas para os aços IF para estampagem extra profunda (EEP Grau 3) são dadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades Mecânicas do aço IF (EEP Grau 3)

| LE ⁽¹⁾ (MPa) | LR (MPa) | Alongamento ⁽²⁾ (%) | | Anisotropia ⁽³⁾⁽⁴⁾ |
|-------------------------|----------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| | | L ₀ = 50mm | L ₀ = 80mm | |
| 140 – 180 | 270 mín. | ≥ 41 | ≥ 39 | 2,1 mín. |

(1) Acrescentar 40MPa para espessuras menores que 0,5mm e 20MPa para espessuras maiores ou iguais a 0,50mm e menores que 0,70mm.

(2) Diminuir 4% para espessuras menores que 0,5mm e 2% para espessuras maiores ou iguais a 0,50mm e menores que 0,70mm.

(3) Válido apenas para espessuras entre 0,50 e 2,00mm, acima de 2,00mm, o valor é diminuído em 0,2.

(4) Valor médio na direção transversal.

Fonte:NBR 5915-2 (ABNT, 2013)

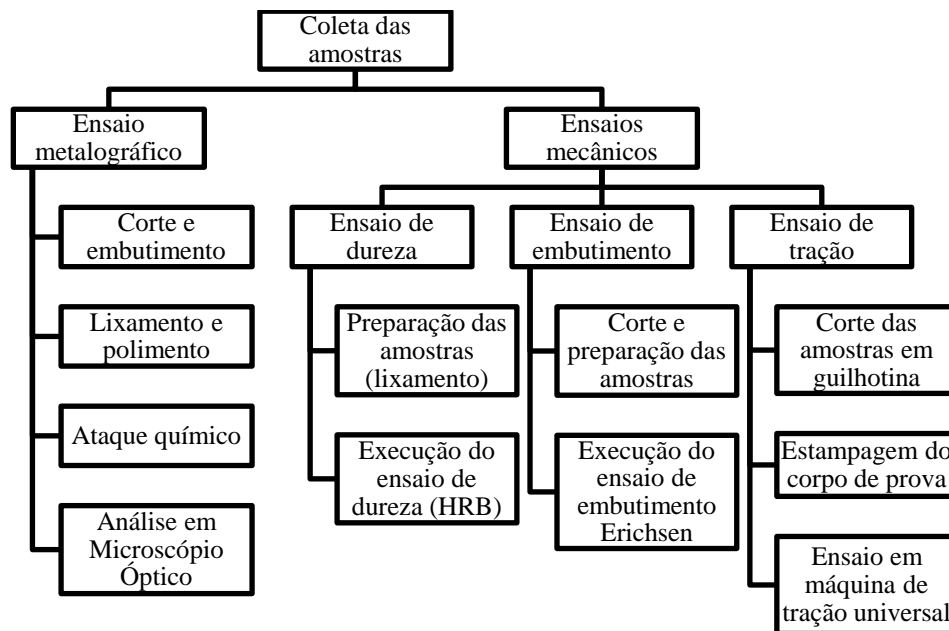
Portanto, o setor industrial produtor de bens de consumo duráveis tem exigido materiais de custo relativamente baixo em que o seu desempenho atenda aos requisitos mecânicos, químicos e físicos exigidos na sua aplicação. Mediante essa solicitação das indústrias do setor, nas últimas décadas, a chapa de aço laminada tem sido um dos focos de desenvolvimento tecnológico, como a escolha criteriosa dos elementos de liga, a aplicação de tratamentos termomecânicos ou térmicos específicos. Algumas das exigências impostas às chapas laminadas de aço são: baixo custo, redução de peso, alta soldabilidade, boa tenacidade, alta estampabilidade, alta resistência e ductilidade.

O aço IF é um dos tipos de aço que possuem essas novas exigências. Desta forma, se faz necessário caracterizar as propriedades mecânicas e a microestrutura das chapas laminadas de aço IF a fim de se averiguar o atendimento as exigências tecnológicas exigidas atualmente pelas indústrias.

3. Materiais e Métodos

O método de pesquisa que se adotou quanto ao procedimento foi a pesquisa experimental, com abordagens qualitativas e quantitativas. Todos os experimentos foram realizados em laboratório e a sequência está demonstrada no fluxograma da Figura 3.

Figura 3. Fluxograma do procedimento experimental



Fonte:Os autores (2023)

3.1. Material

O material utilizado neste trabalho consistiu em uma chapa de aço IF, laminada a frio e recozida, com espessura de 0,60 mm, cuja composição química verificada e informada pelo fabricante está apresentada na Tabela 3. A temperatura no forno de recozimento foi de 860 °C, para garantir o ciclo térmico desejado na zona de aquecimento e encharque a velocidade da linha foi de 80 m/min e o percentual de redução no encruamento foi de 1,0 %.

Tabela 3. Composição química do aço estudado

| %C | %Mn | %P | %S | %Ti | %Al | %Nb | %Cu | %Ni | %Sn | %N |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,002 | 0,104 | 0,011 | 0,009 | 0,060 | 0,035 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,001 | 0,004 |

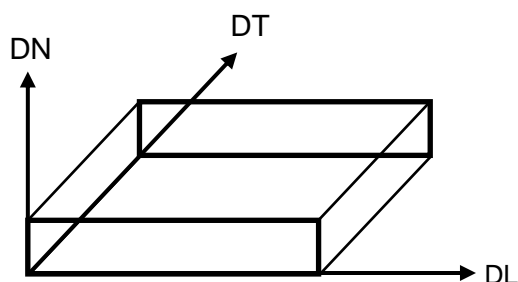
Fonte:Osautores (2023)

3.2. Metodologia

Este item apresenta a descrição do ensaio metalográfico, realizado por intermédio de microscopia óptica, para caracterizar a microestrutura; e as descrições para os ensaios mecânicos de dureza, de embutimento e de tração, com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas.

Neste trabalho a notação adotada durante a preparação das amostras para a caracterização microestrutural e para o ensaio de tração, representada na Figura 4, foi a mesma adotada por Oliveira (2009), na qual DL é a direção de laminação, DT a direção transversal e DN a direção normal a chapa.

Figura 4. Notação de direções adotadas neste trabalho



Fonte:Oliveira (2009)

3.2.1.Caracterização Microestrutural

A primeira atividade para caracterização microestrutural do material consistiu em cortar amostras da chapa numa guilhotina. Na sequência as amostras foram embutidas em resina fenólica com o intuito de deixá-las num tamanho adequado para manipulação nas atividades seguintes, ou seja, lixamento e polimento. O lixamento foi realizado numa lixadeira rotativa utilizando lixas de carbetto de silício (SiC) lubrificadas com água, na seguinte sequência de granulometria: #220, #400, #600 e #1200 mesh. Para polimento utilizou-se uma politriz rotativa e pasta de diamante na seguinte sequência de granulometria: 6 μm , 3 μm e 1 μm .

As superfícies polidas foram analisadas por microscopia óptica. As amostras foram atacadas com Nital 3% por imersão por 10 segundos, para revelação da microestrutura avaliada por microscopia óptica. O tamanho de grão médio foi determinado de acordo com a norma ASTM E112 (ASTM, 2012).

3.2.2.Ensaio Mecânicos

O material foi submetido aos ensaios de Dureza Rockwell, ensaios de embutimento Erichsen, e ensaios de tração em máquinas de tração universal.

Para realização do ensaio de dureza, a superfície da amostra foi lixada para remoção de possíveis imperfeições e retirada de regiões oxidadas antes da realização da análise em si. A máquina de teste utilizada foi a *Wilson Rockwell 2000 HardnessTester*, ela foi preparada com base e penetrador metálico para determinação da dureza Rockwell na escala B (HRB). Foram realizadas quinze medidas, cinco na borda esquerda, cinco no centro e cinco na borda direita de uma amostra. O ensaio de dureza Rockwell foi realizado conforme a norma NBR ISO 6508-1 (ABNT, 2019).

No ensaio de embutimento Erichsen, as amostras foram previamente cortadas em formato de lamelas, em uma guilhotina, para posterior análise. Foram realizados dois ensaios de embutimento com velocidade inicial de avanço, da punção, de 30 mm/min, e ao chegar próximo a ruptura da amostra, a velocidade foi reduzida para 5 mm/min. O teste foi realizado conforme a norma ASTM E643 (ASTM, 1984), e os parâmetros utilizados estão demonstradas na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros do ensaio de embutimento – Erichsen

| Espessura | Corpo de prova | | | Ø do penetrador | Ø interno da matriz de Embutimento | Ø interno do anel de Fixação |
|-----------|----------------|---------------|--------------|-----------------|------------------------------------|------------------------------|
| | Larguramínima | Larguramáxima | Comp. Mínimo | | | |
| Até 1/16" | 3 1/2" | 4 5/8" | 3 1/2" | 7/8" | 1" | 1 3/8" |

Fonte:Osautores (2023)

O ensaio de tração uniaxial, na base de 50 mm, foi realizado em seis amostras em um equipamento universal e foram obtidos os limites de escoamento e resistência e o percentual de alongamento. Este ensaio foi baseado na norma de ensaio tração para materiais metálicos à temperatura ambiente, NBR 6892 (ABNT, 2013). As seis amostras foram distribuídas da seguinte forma: duas amostras na direção 0° (DL), duas amostras na direção 45° (no plano formado entre DL e DT) e duas amostras na direção 90° (DT).

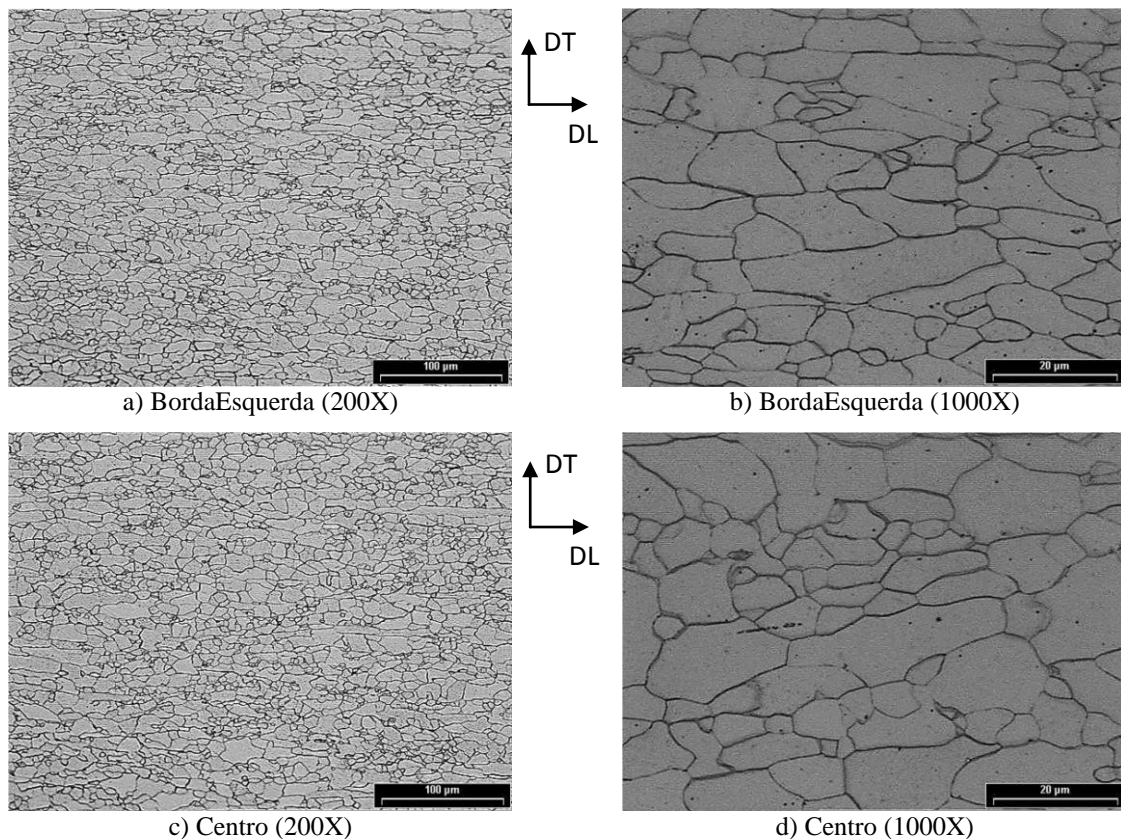
4. Materiais e Métodos

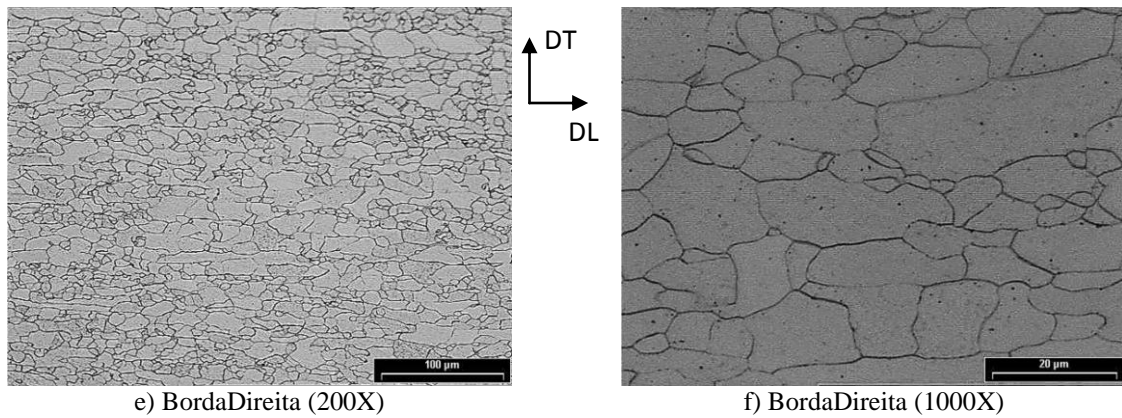
4.1. Caracterização Microestrutural

A Figura 5 representa a microestrutura do aço IF estudada, obtida por microscópio óptico (aumento de 200X e 1000X), nas bordas e no centro da chapa, na direção de laminação. Pode ser visto que o material apresenta uma matriz ferrítica, essa microestrutura já era esperada por se tratar de um aço IF recozido, porém as microestruturas apresentaram tamanhos de grão variados e alguns grãos alongados, sugerindo que o material foi parcialmente recristalizado, isto é, grãos deformados.

Também pode ser visto na Figura 5 que existem grãos alongados e grãos grandes que afetou o tamanho de grão e conseqüentemente o limite de resistência a tração e o limite de escoamento, pois quanto menor o tamanho de grão maior é a quantidade de contornos de grão e isso dificulta o movimento das discordâncias, aumentando a resistência do material. Utilizando a metalografia quantitativa das três seções analisadas, conforme a norma ASTM E112 (ASTM, 2012), foi obtido o diâmetro médio de grão da ordem de $8,0 \pm 1,9 \mu\text{m}$, sendo que o número do tamanho de grão ASTM é 11. Devido a variabilidade encontrada no tamanho de grão tanto o resultado quanto o desvio padrão desse resultado foram elevados, comparado ao resultado encontrado por Dias et al. (2012), para o mesmo tipo de aço IF.

Figura 5. Fluxograma do procedimento experimental





Fonte: Os autores (2023)

4.2. Ensaios Mecânicos

4.2.1. Dureza Rockwell

A Figura 6 mostra a foto do corpo de prova após a realização do ensaio de dureza HRB, e seus resultados são demonstrados na Tabela 5.

Figura 6. Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Os autores (2023)

O resultado da dureza média obtido (Tabela 5) apresenta um valor bem acima do valor sugerido pela norma NBR 5915-2 (ABNT, 2013) para aços IF (EEP Grau 3). Essa dureza encontrada é próxima da dureza dos materiais para estampagem média (EM) que segundo a mesma norma é de no máximo 65 HRB. Esse valor elevado de dureza é devido o material estar parcialmente recristalizado conforme foi comentado anteriormente na análise da Figura 5.

Tabela 5. Resultados de ensaio de dureza

| Equipamento: Dureza Wilson Instron Series B2000 | | | | | | Média |
|---|-------------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Corpo de Prova (CP) | Dureza: HRB | | | | | |
| BordaEsquerda | 65,34 | 64,89 | 63,73 | 65,11 | 64,93 | 64,80 |
| Centro | 62,23 | 63,92 | 62,41 | 63,11 | 62,90 | 62,91 |
| BordaDireita | 64,06 | 65,68 | 65,07 | 65,12 | 65,44 | 65,07 |
| Média = | | | | | | 64,26 |

Fonte: Os autores (2023)

4.2.2. Ensaio de Tração

Os resultados do ensaio de tração são apresentados na Tabela 6. Pode-se observar que os valores obtidos para o limite de escoamento diferem ao da Tabela 2, ou seja, bem acima do limite de escoamento máximo da norma NBR 5915-2 (ABNT, 2013), que é 180MPa, esse resultado está associado ao material estar parcialmente recristalizado. Apesar do valor do limite de escoamento estarem acima da norma, os valores para o limite de resistência a tração e o alongamento atendem a norma (Tabela 2). Outro parâmetro apresentado na Tabela 6 é a relação do limite de resistência a tração e o limite de escoamento (LR/LE), este parâmetro está associado a ductilidade do material, logo quanto maior for o seu valor melhor será a conformabilidade. Portanto, o valor encontrado foi de 1,13, esse valor foi bem inferior ao encontrado por Bastos (2009), o que leva a concluir que o material analisado não é adequado a estampagem profunda. Ainda segundo Bastos (2009, p. 98) a “análise da estampabilidade através dos resultados individuais das propriedades mecânicas dureza, limite de escoamento, limite de resistência e LR/LE não indicam corretamente qual o material possui o melhor grau de estampagem”, ou seja, é necessário verificar a capacidade do material distribuir uniformemente as deformações. Logo, foi realizado o ensaio de embutimento a fim de verificar a estampabilidade do material.

Tabela 6. Resultados do ensaio de tração

| Direção | Limite de Escoamento – LE (MPa) | Limite de Resistência – LR (MPa) | LR/LE | Alongamento (%) |
|--------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------|-----------------|
| 0° | 259,46 | 294,51 | 1,13 | 62,50 |
| | 259,63 | 293,72 | 1,13 | 61,61 |
| 45° | 272,29 | 309,07 | 1,13 | 60,71 |
| | 273,49 | 310,15 | 1,13 | 60,78 |
| 90° | 262,21 | 297,33 | 1,13 | 62,53 |
| | 261,44 | 296,05 | 1,13 | 62,84 |
| Média | 264,75 | 300,14 | 1,13 | 61,83 |

Fonte: Os autores (2023)

4.2.3. Ensaio de Embutimento

A Figura 7 mostra a foto de um dos corpos de prova após a realização do ensaio de embutimento Erichsen. Os valores da altura máxima atingida pelo punção no momento da visualização da fratura estão na Tabela 7.

Figura 7. Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Os autores (2023)

Os valores mostrados na Tabela 6 correspondem ao ensaio de embutimento, e ao compararmos esses valores com o valor da norma NBR 5915-2 (ABNT, 2013), que para um aço IF (EEP Grau 3) é no mínimo 10,2 mm, pode-se observar que o material atende a norma.

Tabela 7. Valores obtidos para o Índice de Embutimento no Ensaio Erichsen

| Amostra | Índice de embutimento (mm) | Média (mm) |
|---------|----------------------------|--------------|
| 1 | 10,94 | 10,69 |
| 2 | 10,44 | |

Fonte: Os autores (2023)

5. Conclusão

As pesquisas bibliográficas realizadas, assim como as análises laboratoriais, permitiram entender que a manutenção da aplicação de chapas laminadas de aço na indústria automotiva e linha branca só é possível devido ao contínuo desenvolvimento de aços com características mecânicas de resistência e conformação cada vez mais apuradas, ou seja, aços com resistência mecânica aumentada e alta capacidade de deformação. Algumas décadas atrás, a perspectiva de aumento de resistência em chapas de aço trouxe consigo a certeza da redução da sua capacidade de deformação, no entanto, o desenvolvimento de novas tecnologias para produção de aço, possibilitam hoje a obtenção de composições químicas mais complexas nas aciarias, como a apresentada nesta pesquisa, e um melhor controle das taxas de laminação.

O material estudado apresentou boa resistência mecânica devido aos valores encontrados para a dureza (Tabela 5), limite de escoamento e limite de resistência (Tabela 7), em contrapartida também apresentou alta capacidade de deformação observada nos valores de alongamento (Tabela 7) e de embutimento (Tabela 6), isto é, esse material atende perfeitamente as expectativas do mercado atual para a indústria automotiva e linha branca.

Da análise microestrutural, Figura 5, pode-se concluir que o material estudado corresponde a um aço IF laminado e parcialmente recozido, pois ele apresenta grãos equiaxiais e grãos deformados (alongados) e uma única fase, a ferrita.

Para finalizar foi possível afirmar que o aço IF, objeto de estudo nesta pesquisa, apresentou capacidades adequadas para aplicação nas indústrias citadas anteriormente, visto que mesmo apresentando boa resistência mecânica, mesmo em chapas de baixa espessura, observou-se uma acentuada capacidade de deformação.

Referências

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E112**: Standard Test Methods For Determining Average Grain Size. Pensilvânia: ASTM, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E643**: Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material. Pensilvânia: ASTM, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5915-2**: Chapas e bobinas de aço laminadas a frio – Parte 2: Aços para estampagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6508-1**: Materiais metálicos – Ensaio de dureza Rockwell – Parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892**: Materiais metálicos – Ensaio de

Tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BASTOS, Alexandre Lundgren. **Análise do processo de estampagem de chapas de aço através da curva limite de conformação.** 2009.148 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos.** 7ª Ed. São Paulo: ABM, 1998.

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

DIAS, et al. **Textura e comportamento mecânico de aços IF estabilizados ao Ti e Nb-Ti.** Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, v. 9, n. 4, p. 294-301, out.-dez. 2012. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2012.044>.

GORNI, Antônio Augusto. **Novos aços ferríticos garantem alta resistência e conformabilidade a chapas finas laminadas a frio.** Revista Corte e Conformação de Metais, p. 28-45, set. de 2010. Disponível em: < http://www.gorni.eng.br/Gorni_CCM_Set2010.pdf>. Acesso em: 12 de jan. 2023.

MORAES, Alter Lopes de; CARVALHO, Felipe Azevedo de. **Análise da microestrutura e das propriedades mecânicas do aço IF-Nb/Ti.** 2016. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2016.

OLIVEIRA, Janaina da Costa Pereira Torres de Oliveira. **Evolução da microestrutura e da textura durante a laminação a frio e a recristalização de alumínio com diferentes níveis de pureza.** 2009. 261 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

OLIVEIRA, Antônio Fabiano de. **Caracterização de um aço IF após a relaminação no laminador de encruamento.** 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SARDINHA, Nina do Amaral. **Comparação da textura e propriedades mecânicas de um aço IF para estampagem resultante da laminação convencional e assimétrica.** 2012. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Secretaria de Ciência e Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais.** 2ª Ed. São Paulo: Blücher, 2006.

Recebido em: 12-02-2023

Aceito em: 19-05-2023

Endereço para correspondência:

Nome Valmir Torres de Oliveirae-mail
valmirtjt@gmail.com



Esta obra está licenciada sob uma [Licença Creative Commons Attribution4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)