

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise da Microestrutura e das Propriedades Mecânicas  
do Aço IF - Nb/Ti**

Alter Lopes de Moraes  
Felipe Azevedo de Carvalho

**Rio de Janeiro  
Junho de 2016**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise da Microestrutura e das Propriedades Mecânicas  
do Aço IF - Nb/Ti**

Alter Lopes de Moraes  
Felipe Azevedo de Carvalho

Projeto final apresentado em cumprimento às  
normas do Departamento de Educação Superior  
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Professora Orientadora: Cristiane Maria Basto Bacaltchuk

**Rio de Janeiro  
Junho de 2016**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M827 Moraes, Alter Lopes de  
Análise da microestrutura e das propriedades mecânicas do aço  
IF-Nb/Ti / Alter Lopes de Moraes, Felipe Azevedo de Carvalho.—  
2016.  
xi, 48f. + apêndice : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2016.

Bibliografia : f. 45-48

Orientadora : Cristiane Maria Basto Bacaltchuk

1. Engenharia mecânica. 2. Aço – Propriedades mecânicas. 3.  
Microestrutura. I. Carvalho, Felipe Azevedo de. II. Bacaltchuk,  
Cristiane Maria Basto (Orient.). III. Título.

CDD 621

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

À minha família, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao CEFET/RJ, seu corpo docente, direção e administração que deram a oportunidade de vislumbrar um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética, aqui presentes.

À orientadora Cristiane Maria Basto Bacaltchuk pela confiança e suporte no pouco tempo que lhe coube, pela sua participação efetiva orientando e ajudando nas horas difíceis, correções e incentivos.

À Companhia Siderúrgica Nacional que disponibilizou nosso material de trabalho.

Ao Instituto Militar de Engenharia que se disponibilizou o laminador para a execução da laminação a frio. Ao doutorando Rámon Botelho que esteve de forma efetiva em momentos importantes, inclusive auxiliando em atividades experimentais.

Aos professores responsáveis pelo laboratório de materiais, que nos orientaram quanto ao uso dos equipamentos.

Ao professor Paulo Vogel, que auxiliou de forma significativa durante a fabricação dos corpos de prova de tração, nos passando todo seu conhecimento pertinente há anos de prática em usinagem.

Aos técnicos, do CEFET/RJ, Brenno Duarte e Hiron Yamada que dispuseram seu tempo, competência e conhecimento para auxiliar nos ensaios mecânicos e metalográficos.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

## RESUMO

Os aços IF (Interstitial Free) são aços que apresentam baixíssimos teores de carbono e nitrogênio em sua solução sólida. Estes aços se destacam dos demais aços de baixo carbono por apresentarem boa ductilidade e plasticidade, além de excelente desempenho quando submetidos aos processos de conformação e embutimento profundo. O mercado mais proeminente de aplicação para aços IF é a indústria automobilística, mais precisamente como material usado na confecção de para-lama, capô e tampa de porta-malas, entre outros. A diminuição do peso, hoje em dia, se torna crucial tanto na esfera econômica, reduzindo o consumo de combustível; quanto na esfera ambiental, mitigando as emissões de restos da queima de combustível poluente.

O projeto visa avaliar a evolução micro estrutural e as propriedades mecânicas resultantes dos tratamentos termomecânicos realizados. Para essa investigação, foram utilizadas chapas de aço IF estabilizado ao nióbio e titânio laminadas a quente, cedidas pela Companhia Siderúrgica Nacional em conjunto com a Universidade Federal Fluminense de Volta Redonda e o CEFET-RJ. Como parte do procedimento experimental realizado durante este projeto, após a laminação a quente realizada pelo fabricante, estas chapas foram laminadas à frio, recozidas e apresentaram microestrutura adequadas à estampabilidade.

Após a confecção dos corpos de prova e a realização dos ensaios, obteve-se um tamanho médio de grão de 32,2  $\mu\text{m}$  para a amostra recozida (ensaio metalográfico), durezas médias de 107, 195 e 98 HV para as amostras laminadas a quente, a frio e recozidas, respectivamente, próximas às médias encontradas para o aço IF. Somente para o ensaio de tração houve um aumento, diferente do esperado ( $r_m \cong 2,2$  e  $\Delta r \cong 0$ ), no coeficiente de anisotropia planar ( $\Delta r = -1,53$ ) e médio ( $r_m = 3,08$ ).

**Palavras-chaves: Aço IF, Propriedades Mecânicas, Microestrutura**

## ABSTRACT

IF (Interstitial Free) steels are materials that have very low levels of carbon and nitrogen in solid solution. These steels stand out from the other low-carbon steels because they have good ductility and plasticity, as well as an outstanding performance when subjected to forming and deep drawing processes. The most prominent market application for IF steel is the automotive industry, where this material is mainly used to manufacture fender, hood and trunk lid, among others. Weight reduction, nowadays, became crucial for both the economic field, reducing fuel consumption; and the environmental sphere, reducing emissions of pollutant remains. The project aims to evaluate the microstructural evolution and mechanical properties resulting after a certain sequence of thermo-mechanical treatments. For this research, we used IF steel hot rolled sheets stabilized by niobium and titanium, provided by the Companhia Siderúrgica Nacional with the Universidade Federal Fluminense at Volta Redonda and CEFET-RJ. As part of the experimental procedure developed during this project, after hot rolling, the IF sheets were cold rolled, annealed and presented appropriate microstructure appropriate for formability.

After preparation of the specimens and the tests, it was obtained an average grain size of 32,2  $\mu\text{m}$  for the annealed sample (metallographic test), average hardness of 107, 195 and 98 HV for the hot rolling, cold rolling and annealed samples, respectively and near to the averages found for IF steels. Only the results of mean and planar anisotropy ( $r_m \cong 2,2$  e  $\Delta r \cong 0$ ), after the tensile tests, the coefficient found had an incoherent and increasing values ( $\Delta r = -1,53$  and  $r_m = 3,08$ ).

**Keywords: IF Steel, Mechanical Properties, Microstructure**

## Sumário

AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	iv
ABSTRACT .....	v
Sumário.....	vi
Lista de tabelas .....	viii
Lista de figuras .....	ix
Lista de notações .....	x
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação .....	1
1.2 Justificativa .....	2
1.3 Objetivo .....	2
1.4 Metodologia e Trabalho Realizado .....	2
1.5 Organização do Trabalho.....	3
CAPÍTULO 2 .....	3
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Aços IF (Interstitial-Free) .....	4
2.2 Processo de Laminação.....	7
2.2.1 Laminação a Quente.....	8
2.2.2 Laminação a Frio.....	10
2.3 Recozimento .....	12
2.3.1 Recozimento dos aços IF.....	13
2.4 Anisotropia de deformação plástica.....	14
CAPÍTULO 3 .....	17
MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1 Processamento .....	18
3.2 Preparação das amostras para análise metalográfica .....	21
3.2.1 Corte.....	21
3.2.2 Embutimento .....	21
3.2.3 Lixamento.....	21
3.2.4 Polimento .....	22

3.2.5 Ataque Químico .....	22
3.2.6 Medição do Tamanho de Grão .....	22
3.3 Ensaio de Dureza .....	23
3.3.1 Tratamento estatístico dos resultados no ensaio de dureza .....	24
3.4 Ensaio de Tração.....	25
CAPÍTULO 4 .....	28
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1 Micrografias.....	28
4.2 Micro dureza Vickers.....	32
4.3 Ensaio de tração .....	37
4.4 Coeficiente de anisotropia.....	41
CAPÍTULO 5 .....	43
CONCLUSÕES .....	43
CAPÍTULO 6 .....	44
TRABALHOS FUTUROS .....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	45
TRATAMENTO ESTATÍSTICO – CÓDIGO DO MATLAB® .....	49



## Lista de tabelas

TABELA 1: As composições químicas típicas dos aços IF .....	5
TABELA 2: Composição química .....	17
TABELA 3: Dados de micro dureza da amostra laminada a quente. ....	33
TABELA 4: Dados de micro dureza da amostra laminada a frio.....	35
TABELA 5: Dados de micro dureza da amostra recozida. ....	36
TABELA 6: Resultados do ensaio de tração. ....	37
TABELA 7: Comparativo das Propriedades Mecânicas .....	41
TABELA 8: Resultados de anisotropia .....	42

## Lista de figuras

FIGURA 1: Fluxo de produção na Linha de Laminação a Quente .....	8
FIGURA 2: Desenho esquemático do sistema de acionamento de um laminador a frio (fonte – Catálogo CSN).....	11
FIGURA 3: Etapas do processo .....	18
FIGURA 4: Serra de fita do laboratório de usinagem do CEFET/RJ .....	19
FIGURA 5: Laminador reversível do IME/RJ .....	19
FIGURA 6: Forno de recozimento do Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos, CEFET/RJ.....	20
FIGURA 7: Microscópio Ótico Olympus BX60M do Laboratório de Materiais, CEFET/RJ. 23	23
FIGURA 8: Micro durômetro AnInstron Company do Laboratório de Materiais, CEFET/RJ. ....	24
FIGURA 9: Dimensões do corpo de prova segundo a norma ASTM E8-E8M. ....	25
FIGURA 10: Máquina universal para ensaios mecânicos Instron- Modelo 5966, Laboratório de Compósitos e Adesivos, CEFET/RJ. ....	25
FIGURA 11: Fresadora Diplomat 3001- Modelo FVF 2000 do Laboratório de Pesquisa e Usinagem, CEFET/RJ. ....	26
FIGURA 12: Corpos de prova usinados no Laboratório de Pesquisa e Usinagem, CEFET/RJ. ....	27
FIGURA 13: Micrografia do aço IF laminado a quente. Aumento de 200X. ....	28
FIGURA 14: Micrografia do aço IF laminado a quente. Aumento de 500X .....	29
FIGURA 15: Micrografia do aço IF laminado a frio. Aumento de 200X. ....	30
FIGURA 16: Micrografia do aço IF laminado a frio. Aumento de 500X. ....	30
FIGURA 17: Micrografia do aço IF recozido. Aumento de 200X.....	31
FIGURA 18: Micrografia do aço IF recozido. Aumento de 500X.....	32
FIGURA 19: Micrografia da amostra laminada a frio após a medição de dureza. ....	33
FIGURA 20: Distribuição normal dos resultados da amostra laminada a quente.....	34
FIGURA 21: Distribuição normal dos resultados da amostra laminada a frio.....	35
FIGURA 22: Distribuição normal dos resultados da amostra recozida. ....	36
FIGURA 23: Fratura em 45° sem deformação lateral no corpo de prova a 0° da DL. ....	38
FIGURA 24: Curvas representativas para os corpos de prova a 0° da direção de laminação. .	39
FIGURA 25: Curvas representativas para os corpos de prova a 45° da direção de laminação.	40
FIGURA 26: Curvas representativas para os corpos de prova a 90° da direção de laminação.	40

## Lista de notações

B - BORO

C - CARBONO

DL - DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO

DN - DIREÇÃO NORMAL DO PLANO DA CHAPA

DT - DIREÇÃO TRANSVERSAL DO PLANO DA CHAPA

FeO - MONÓXIDO DE FERRO

Fibra  $\alpha$  e  $\gamma$  - TEXTURA TÍPICA DE DEFORMAÇÃO

IF - AÇOS LIVRES DE ELEMENTOS INTERSTICIAIS

IF-Nb - AÇO IF ESTABILIZADO COM NIÓBIO

IF-NbTi - AÇO IF ESTABILIZADO COM NIÓBIO E TI (NIÓBIO EM MAIOR QUANTIDADE)

IF-Ti - AÇO IF ESTABILIZADO COM TI

IF-TiNb - AÇO IF ESTABILIZADO COM NIÓBIO E TI (TI EM MAIOR QUANTIDADE)

MnO - ÓXIDO DE MANGANÊS

MnS - SULFETO DE MANGANÊS

N - NITROGÊNIO

Nb - NIÓBIO

NbC - CARBONETO DE NIÓBIO

P - FÓSFORO

r - ÍNDICE DE ANISOTROPIA PLÁSTICA

$r_m$  - COEFICIENTE DE ANISOTROPIA NORMAL

$\Delta r$  - COEFICIENTE DE ANISOTROPIA PLANAR

TA - TEMPERATURA DE ACABAMENTO

TB - TEMPERATURA DE BOBINAMENTO

TRP - TEMPERATURA DE REAQUECIMENTO DE PLACA

Ti - TITÂNIO

TiC - CARBETO DE TITÂNIO

Ti<sub>4</sub>C<sub>2</sub>S<sub>2</sub> - CARBOSSULFETO DE TITÂNIO

TiN - NITRETO DE TITÂNIO

TiS - SULFETO DE TITÂNIO

$\sigma_e$  - TENSÃO DE ESCOAMENTO MÉDIA

$\sigma_u$  - TENSÃO MÁXIMA

$\sigma_r$  – TENSÃO DE RUPTURA

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A pesquisa e o desenvolvimento dos aços IF se deram uma vez que os aços baixo carbono, além da baixa qualidade superficial, eram de difícil conformação. No início dos anos 70, com estas pesquisas, houve o entendimento de que elementos residuais em solução na estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) da ferrita atuariam na microestrutura, forçando a estrutura do ferro sólido, que por sua vez refletiria macroscopicamente na estampabilidade dos aços. Ainda se descobriu que outros elementos de liga influenciariam a recristalização e a segregação de átomos de carbono e nitrogênio para os contornos de grão. Nos últimos 10 anos ou mais, os pesquisadores voltaram sua atenção para a tecnologia de laminação a quente de aços de baixo carbono, a fim de otimizar os parâmetros do processo. Existe uma análise das variáveis de processo e produto na aciaria, laminação a quente, laminação e frio e recozimento. A partir dessa análise, as propriedades são melhoradas pelo ajuste dos parâmetros de processo e produto, dando origem a um novo produto adequado à conformação extra profunda.

### 1.1 Motivação

A ótima conformabilidade dos aços IF permite a confecção de peças de elevado nível de complexidade, isso se deve ao baixíssimo nível de impureza. Sua seleção deve ser analisada de acordo com o nível de conformação a que será submetido, sendo desde uma estampagem média para peças de leve conformação, até peças de alta complexibilidade, com elevado nível de conformação, estiramento e repuxo, como é o caso da estampagem extra profunda. Outra característica também importante dos aços IF é a sua boa soldabilidade.

Esses aços permitiram a evolução de novos projetos de componentes para carrocerias de automóveis, peças para bicicletas e motocicletas, equipamentos para escritórios, artigos de uso pessoal, fivelas, ferragens, ilhoses e rebites, componentes eletrônicos, entre outras.

## **1.2 Justificativa**

Há no mercado uma necessidade de maior segurança, viabilidade dos custos de fabricação e preocupação com o meio ambiente, especialmente para os veículos a serem produzidos. A obtenção das propriedades mecânicas desejadas aumenta a segurança e reduzem o peso de diversos componentes estruturais aumentando a eficiência dos motores, diminuindo o consumo dos combustíveis e otimizando o desempenho final, implicando em menor liberação de resíduos da queima de combustível para o meio ambiente. Por sua vez, a fabricação em série viabiliza os custos e a reciclabilidade e reduz a utilização de recursos naturais.

## **1.3 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre o efeito dos parâmetros de deformação a quente e a frio e de recozimento em uma chapa de aço IF estabilizado ao nióbio e titânio através da caracterização micro estrutural e ensaios de dureza e tração.

## **1.4 Metodologia e Trabalho Realizado**

Este estudo será realizado a partir de uma profunda pesquisa teórica sobre a história dos aços IF, ensaios e testes a fim de comparar com o processo industrial e análise dos parâmetros de sua elevada ductilidade aliada à resistência mecânica. Serão feitos testes de caracterização da microestrutura, de tração e de dureza para determinar se os materiais de estudo corresponderão ao que relata a literatura.

## 1.5 Organização do Trabalho

O estudo realizado neste trabalho está dividido de modo a facilitar o entendimento sobre a fabricação, análise e utilização de aços para estampagem, e sobre a utilização e os problemas mais frequentes que os aços IF precisam resistir.

- O Capítulo 1 trata das motivações e justificativas para a escolha do tema.
- O Capítulo 2 trará uma breve explicação conceitual sobre a história da necessidade e concepção desse tipo de aço, os processos de conformação os quais ele sofre, eo tratamento necessário à sua otimização.
- No Capítulo 3 serão abordados os materiais escolhidos para a realização dos ensaios de caracterização metalográfica por microscópio óptico, da tração e da dureza.
- No Capítulo 4 serão discutidos os resultados obtidos pelos ensaios feitos nos corpos de prova do aço.
- O Capítulo 5 trará a conclusão final de todo o tema abordado.
- O Capítulo 6 trará discussões futuras a serem analisadas

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Aços IF (Interstitial-Free)

Referindo-se ao fato de não haver quantidade significativa de átomos de solutos intersticiais forçando a estrutura do ferro sólido, os aços IF são obtidos a partir da redução de teores de C e N em solução sólida e da adição de elementos micro ligantes (elementos estabilizantes), como Nb e Ti, capazes de fixar os átomos de C e N sob a forma de carbonetos e nitretos. A eliminação desses átomos intersticiais prejudiciais à formabilidade é obtido através de um cuidadoso controle da química de fusão durante a produção do aço e por adição estequiométrica, formando precipitados. Este procedimento é alcançado durante o processo de refino na aciaria. Atualmente, fabricam-se aços com teor de carbono menor que 0,003% e nitrogênio menor que 0,004% (HOILE, 2000). As típicas composições de um aço livre de interstícios podem ser vistas na tabela 1.

Um baixo limite de escoamento associado a um elevado alongamento e coeficiente de encruamento, além de uma adequada textura cristalográfica são características destes aços. Estas características proporcionam uma conformabilidade superior (alto valor  $r$ ), comparativamente aos aços baixo C convencionais (STRUGALA, 1992). A otimização da sua capacidade de estiramento gera uma elevada estampabilidade e boa redistribuição de tensão, tornando-os adequados para projeto.

Além disso, por possuírem características mecânicas de excelente estampagem profunda e de não envelhecimento, os aços IF possibilitaram à indústria automobilística a confecção de partes mais difíceis de conformar (TITHER et al, 1990).



**TABELA 1:** As composições químicas típicas dos aços IF

ELEMENTO QUÍMICO	NÍVEIS DE COMPOSIÇÃO
Carbono	20 - 50 ppm
Silício	< 0,003%
Manganês	0,20 - 0,30%
Fósforo	0,015 - 0,025%
Enxofre	0,012 - 0,025%
Titânio	0,035 - 0,060%
Nitrogênio	< 30 ppm
Alumínio	0,02 - 0,06%
Nióbio	0,008 - 0,016%

O primeiro aço IF com características comerciais foi produzido por volta de 1970, como um aço com extra baixo teor de carbono estabilizado ao titânio. Ainda no início da década de 70, foram publicados os primeiros trabalhos, com aços IF estabilizados ao nióbio. Nessa época, os aços IF eram produzidos com teores de carbono variando entre 0,005 e 0,01% (ELIAS e HOOK, 1973).

Devido às limitações tecnológicas da época, era impossível a obtenção de aços com baixo teor de elementos intersticiais. Com isso, era necessária adição de grandes quantidades de elementos de liga para estabilizar a matriz, tornando os aços relativamente caros (TITHER et al, 1994).

Com o surgimento de modernos equipamentos de desgaseificação a vácuo o carbono passou a ser removido através da inserção de oxigênio. A taxa de descarbonetação é determinada pela taxa de oxigênio injetado no conversor. Assim, os aços IF começaram a ser produzidos em grande quantidade em 1979, substituindo os aços baixo carbono acalmados ao alumínio, quando as chapas de aço galvanizadas por imersão a quente começaram a ser utilizadas para confecção de painéis automotivos com elevada resistência à corrosão. O avanço das pesquisas mostra que em função das características dos aços IF e do tipo de processamento feito nas linhas de galvanização, não existe atualmente uma classe de aços mais adequada para a produção de chapas com excelente conformabilidade, seu uso é de menor custo e fornece produtos finais de melhor qualidade do que os aços acalmados ao alumínio (TOKUNAGA e KATO, 1990).

Em 1990 todos os produtores japoneses de aço manufaturaram uma quantidade total de mais de 3 milhões de toneladas de aços IF (TSUNOYAMA, 1990). Além dos grandes centros siderúrgicos, a produção comercial dos aços IF e seu desenvolvimento científico e

tecnológico já atingem outros países, entre eles o Brasil. Dessa forma, uma nova proposta de adição conjunta de titânio e nióbio, em quantidades suficientes para aprisionar os elementos intersticiais presentes na formação de carbonetos e formar uma distribuição de partículas que restringem migrações nos contornos de grão, reduziram as taxas de nucleação e crescimento de grãos recristalizados (WILSHYNSKY et al., 1994). A otimização da composição química e das condições de processamento, o aumento das temperaturas de recozimento e de reaquecimento e o refino do tamanho de grão, resultaram em um aço com maior conformabilidade mecânica, aumentando a sua produção em escala comercial.

A precipitação será diferente e dependente das diferenças na composição química e no processamento termomecânico, o que pode afetar a microestrutura e textura final do material (HOOK, 1973). Pode ser feita segundo três concepções diferentes: usando somente o Ti (IF-Ti), somente o Nb (IF-Nb) ou uma combinação desses dois (IF Nb-Ti ou IF Ti-Nb) como estabilizantes. Os mecanismos de estabilização desses três tipos de aço diferem ligeiramente entre si. Nos aços IF-Ti, o Ti combina com o N e S antes do C, para formar compostos como TiN, TiS, TiC e  $Ti_4C_2S_2$ . Nos aços IF-Nb, o Nb combina com o C formando NbC, o N combina com a Al formando  $AlN_3$ , e o S combina com o Mn formando MnS. Nos aços IF Nb-Ti com  $Nb > Ti$ , o Ti combina com o N e o S formando TiN e o TiS, respectivamente, e o Nb combina com o C para formar o NbC. Já nos aços IF-TiNb com  $Ti > Nb$ , o Ti é responsável por combinar com N, S e C assim como nos aços contendo somente titânio, e o nióbio adicionado permaneceria em solução sólida (BHATTACHARYA, 1989; PRADHAN, 1994).

O aço IF é amplamente utilizado para várias aplicações aonde são necessárias boa formabilidade e qualidade superficial. Ele possui nos dias de hoje aplicações para componentes eletrônicos e tem sido de grande importância na indústria.

As excelentes propriedades mecânicas encontradas neste material estão diretamente relacionadas a textura cristalográfica resultante dos tratamentos térmicos realizados no material. A textura cristalográfica corresponde a uma orientação preferencial dos grãos. De maneira genérica, pode ser definida como uma condição na qual a distribuição de orientações dos grãos de um poli cristal não é aleatória. Cada grão em um agregado cristalino possui uma orientação cristalográfica diferente das dos seus vizinhos, ou seja, os planos e as direções cristalinas têm orientação espacial diferente de grão para grão.

Uma chapa metálica pode apresentar comportamento anisotrópico como resultado de sua textura. Tal variação pode ser avaliada através da relação entre a resistência oferecida à

deformação nas diferentes direções do plano e da espessura das chapas. Quando um elevado número de grãos está orientado com seu plano {111} paralelo ao plano da chapa, o material apresenta uma alta anisotropia normal ( $r_m$ ), o que melhora as características de estampabilidade do aço em função da maior resistência ao afinamento da espessura da chapa (VIANA e PLAUT, 2003). Durante o processo de conformação de chapas a frio, uma variável fundamental que afeta as características de estampabilidade do material é o grau de deformação, obviamente somado aos efeitos dos ciclos de tratamentos térmicos de recozimento intermediários empregados.

Entretanto, uma maior plasticidade adquirida é acompanhada de perda na resistência mecânica, o que se tornou o grande desafio no desenvolvimento de aços IF. Sendo as aplicações dos aços IF aquelas que requerem excelente conformabilidade e uma vez que o problema está relacionado com a baixa resistência mecânica, podemos entender os efeitos da composição química nas propriedades desses aços. Estudos recentes caminham para um aumento da resistência mecânica através da formação de grãos ultrafinos (F. C. OLIVEIRA, A. L. A. ABRANTES, J. F. C. LINS).

## **2.2 Processo de Laminação**

A laminação é um processo de conformação e tem como objetivo básico dar forma a barra, melhorar a estrutura interna, propriedades mecânicas e qualidade superficial (DIETER, 1981). O processo ocorre por deformação plástica dos metais com o material sendo submetido a tensões compressivas altas, resultantes da ação de prensagem de rolos, e a tensões cisalhantes superficiais, resultantes da fricção entre rolos e material. A peça a ser conformada é puxada para entre os rolos devido à força de atrito desenvolvida entre as superfícies dos cilindros e o metal processado. O controle da força de atrito é de fundamental importância, na medida em que ela define a maior redução possível sem forças externas que empurrem a peça. Neste processamento a espessura da chapa é reduzida, seu comprimento alongado e sua largura levemente aumentada. É o processamento de transformação mecânica de metais mais usados na prática porque apresenta alta produtividade e um controle dimensional do produto acabado que pode ser bastante preciso. O processo de laminação, incluindo o reaquecimento, irá interferir diretamente nas propriedades mecânicas do aço. Após esta etapa, além do

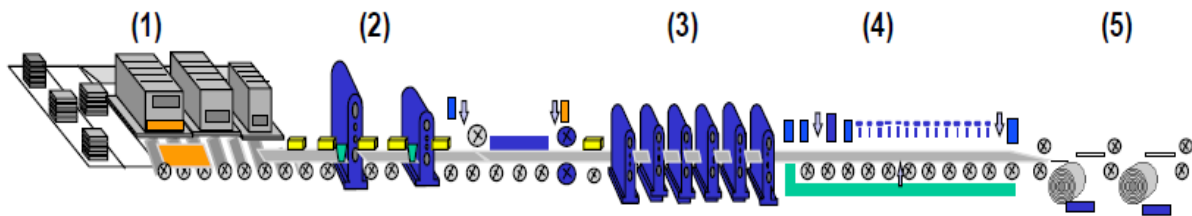
lingote, proveniente da aciaria, ganhar a forma desejada, também a textura do material, textura bruta de fusão, será alterada.

Textura bruta de fusão é uma expressão com a qual se designa a textura do aço no estado em que se solidificou, sem qualquer tratamento térmico ou mecânico posterior (COLPAERT, 1997). Muitos parâmetros influenciam o processo de laminação, podendo ser citados: temperatura de reaquecimento das placas, temperaturas de acabamento, temperatura de bobinamento, deformação na laminação a quente, velocidade de laminação, número de passes, resfriamento na saída da mesa de laminação e etc.

### **2.2.1 Laminação a Quente**

Em um processo de laminação a quente convencional em uma siderúrgica, inicialmente os aços são reaquecidos à temperaturas elevadas (a partir de 1100°C), promovendo a austenitização da matriz, e em seguida submetidos a uma sequência de deformações. O material é aquecido a elevadas temperaturas onde ocorrem várias alterações micro estruturais simultâneas as quais devem ser finas, de modo que grande quantidade de energia de deformação possa ser armazenada nos contornos de grão (HUMANE, 2010).

Nos aços IF o carbono e o nitrogênio são aprisionados na forma de carbonetos e nitretos de titânio, nióbio e alumínio, dependendo do tipo do aço. A morfologia destes precipitados, microestrutura e textura resultantes nas tiras a quente exibe uma forte influência sobre a recristalização. Precipitados grosseiros de TiC e NbC (KATOH et al., 1985, SATOH et al., 1987, e HASHIMOTO et al., 1982) e um tamanho de grão fino nas tiras a quente (TANAKA et al., 1987) ajudam a atingir alta ductilidade e altos valores no coeficiente de anisotropia normal ( $r_m$ ). Para uma dada composição química, a morfologia e a microestrutura dos precipitados nas tiras a quente são controladas pelos parâmetros de laminação a quente, ou seja, temperatura de reaquecimento das placas, temperaturas de acabamento, temperatura de bobinamento, deformação na laminação a quente, velocidade de laminação, número de passes, resfriamento na saída da mesa de laminação e etc. A figura 1 nos mostra como é feito o controle deste fluxo de produção na linha de laminação a quente, que é fundamental para obtenção de boas propriedades mecânicas.



- (1) Fornos de reaquecimento
- (2) Desbastadores
- (3) Trem acabador
- (4) Mesa de resfriamento
- (5) Bobinadeiras

**FIGURA 1:** Fluxo de produção na Linha de Laminação a Quente

A laminação a quente resulta em: baixa resistência à deformação, possibilidade de mudanças substanciais de forma, sucessivas regenerações e crescimento de grãos (material não encrua). A temperatura normal de início de laminação para aços está entre 1100°C e 1200°C (CODA, 2001). Visto isso, o aquecimento dos aços é uma etapa fundamental na qualidade do produto final da laminação. Durante o aquecimento dos blocos no forno de reaquecimento, a ressolubilização dos principais elementos micro ligantes (Nb e Ti) deve ser analisada e a curva de solubilidade é a principal ferramenta (BUEREN, JAIR; TRAVI, TATIANA, 2000).

Na fase de aquecimento dentro de um processo de reaquecimento, devem ser consideradas três variáveis básicas:

- Velocidade de aquecimento;
- Temperatura máxima de aquecimento;
- Tempo de permanência da peça na temperatura máxima.

Estas variáveis devem ser executadas dentro de padrões rígidos e variadas de acordo com as características micro estruturais do aço (BEUREN, 2000). A temperatura de aquecimento é mais ou menos fixa, sendo determinada pela natureza do processo, das propriedades e das estruturas finais desejadas, da composição química do aço e principalmente do seu teor de carbono. A influência do tempo de permanência do aço à temperatura de aquecimento é mais ou menos idêntica à máxima temperatura de aquecimento, isto é, quanto mais longo o tempo à temperatura considerada de austenitização, mais completa a dissolução do carbono e de outras fases presentes tais como carbonetos complexos e assim um maior crescimento de grão resultante.

A microestrutura resultante na laminação é influenciada pelo grau de deformação a quente, pela temperatura final de deformação e pela velocidade de resfriamento. Aquecendo-

se à temperatura acima do limite de solubilidade, obtém-se uma dissolução completa dos carbonitretos de micro ligantes que, por sua vez, precipitam-se finamente nas discordâncias e após o processamento termomecânico subsequente, inclusive nos grãos de ferrita.

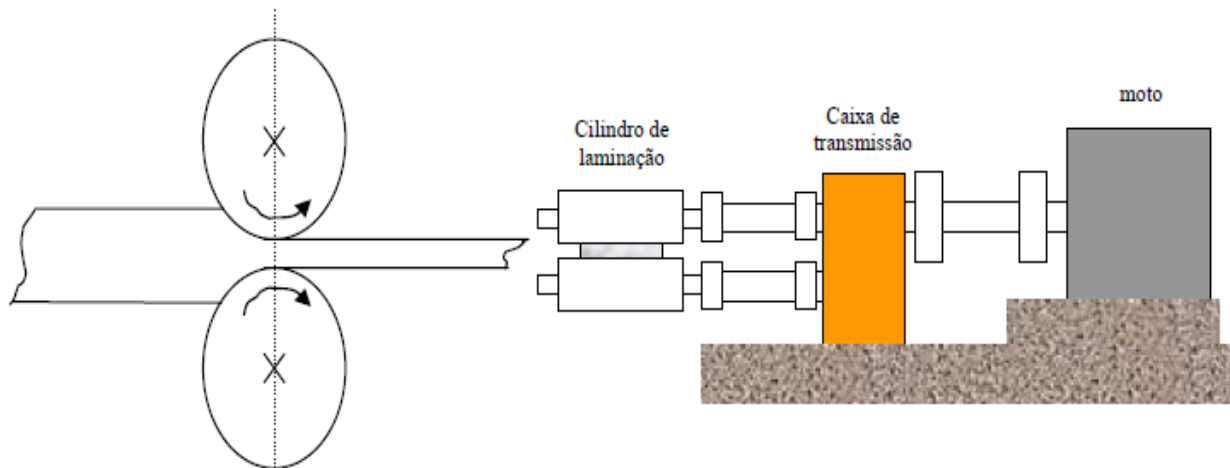
Durante o reaquecimento da placa, a dissolução de precipitados poderá ocorrer, assim, a temperatura de reaquecimento de placa (TRP) poderá determinar as características do precipitado (morfologia, tipo, tamanho e dispersão), bem como o tamanho de grão laminado a quente e seus efeitos na recristalização e nas propriedades mecânicas. O tamanho de grão resultante da laminação a quente tem efeito significativo no desenvolvimento da textura após redução a frio e recozimento (JONAS, 1994). De maneira geral, um baixo tamanho de grão e precipitados grosseiros e dispersos no laminado a quente favorecem a estampabilidade.

Conforme SANAGI et al. (1990) e HOILE (2000), sob temperaturas de reaquecimento de placa (TRP) em torno de 1250°C, carbonetos e carbonitretos podem se dissolver quase completamente, enquanto outros precipitados, tais como TiN e TiS, são relativamente estáveis. A quantidade de nióbio em solução no final do reaquecimento influencia a cinética de recristalização e mais à frente no processo, na precipitação tanto na austenita quanto na ferrita (CHANDLER, 1995). Na temperatura de 1000°C, todos os precipitados permanecem estáveis. Assim, a baixa TRP impede a completa dissolução dos precipitados e favorece a formação de precipitados grosseiros. Esses precipitados agem como sítios preferenciais para a recristalização e, conseqüentemente, diminuem a temperatura de recristalização. Quando se empregam altas temperaturas de bobinamento, são produzidos precipitados grosseiros e amplamente dispersos. Ao contrário, com baixas temperaturas de bobinamento, há uma distribuição mais uniforme de finos precipitados. Assim, a temperatura de bobinamento (TB) é um importante parâmetro que controla a temperatura de recristalização e as propriedades mecânicas. Com a diminuição da TB, diminui-se o tamanho de grão laminado a quente, o que favorece a formação de textura adequada nas etapas subsequentes da laminação a frio.

### **2.2.2 Laminação a Frio**

O processo de laminação a frio, ou relaminação, confere ao aço uma série de propriedades para as mais diferentes aplicações, o que o torna um produto de excelência pela versatilidade com que pode ser processado. Entretanto, em todo o histórico de processamento

de um aço, que vai desde os processos na aciaria, passando pelo lingotamento, laminação a quente e laminação a frio, inúmeras variáveis do processo devem ser controladas a fim de se obter um aço com propriedades mecânicas adequadas à estampagem. A figura 2 apresenta um desenho esquemático do sistema de acionamento de um laminador a frio.



**FIGURA 2:** Desenho esquemático do sistema de acionamento de um laminador a frio (fonte – Catálogo CSN).

As principais funções da redução a frio são: o aumento da resistência mecânica e dureza devido ao encruamento, aumentar a precisão dimensional, elevar a qualidade superficial e obter a espessura adequada à fabricação do produto com a dimensão requerida pelo cliente a que se destina a chapa.

Na linha de decapagem ocorre o processo químico para remoção da carepa, ou camada de oxidação, acumulada na superfície do ferro ou aço, resultante do aquecimento pelo atrito. É necessário remover esta carepa antes de qualquer processo posterior. O método universalmente adotado é a decapagem em ácido diluído. O processo geral para decapar é submergir o material em um banho de ácido até que haja a remoção da carepa, depois ele é retirado e banhado com uma solução neutralizadora para que sejam removidos quaisquer traços daquele ácido. A remoção destes óxidos é feita pela ação da solução de ácidos inorgânicos como meio decapante. Comumente os ácidos utilizados são: HCl (ácido clorídrico),  $H_2SO_4$  (ácido sulfúrico), e  $H_2NO_3$  (ácido nítrico) (GOMES, 2013).

No laminador de tiras a frio ocorre o processo de transformação mecânica realizado por deformação plástica entre cilindros que giram à mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários. Os grãos na laminação a frio assumem uma forma alongada na direção de laminação (grãos tipo panqueca), diferente daquela equiaxial observada no processamento a quente. A laminação de desbaste determina a redução a frio que será aplicada no aço

proveniente da laminação a quente. Como a temperatura de trabalho (temperatura ambiente) situa-se bem abaixo da temperatura de recristalização, o material da peça apresenta uma maior resistência à deformação não permitindo dessa forma, intensidades elevadas de redução de seção transversal a cada passe. Através de forças de compressão e tração a espessura da tira é reduzida em passes consecutivos (passe único em cada cadeira) até chegar a espessura final e limpeza da chapa. Assim, obtêm-se a espessura requerida, a planicidade e a rugosidade ideais para o processo de recozimento (OVERHAGEN, 2013).

Outro fator obtido através da laminação a frio é a textura cristalográfica que interfere diretamente na estampabilidade da chapa quando produzida por um processo de laminação a frio adequado para este fim. Além da estampabilidade, a textura cristalográfica tem influência em diversas outras propriedades do material como módulo de Young, resistividade, tenacidade, ductilidade, permeabilidade magnética e expansão térmica. Um aumento da redução a frio aumenta a textura  $\{111\} \langle uvw \rangle$ , sendo a redução de 90% a melhor para se obter um alto valor  $r$  (Goodman et al. (1985), HAYAKAWA et al. (1983), TANAKA et al. (1987) e GUPTA et al. (1988)). Na prática industrial, reduções acima de 90% são impraticáveis devido à limitação de redução que o laminador a frio possui, assim, as reduções são limitadas em torno de 80%. Na produção comercial destes aços, reduções a frio  $\geq 75\%$  são comumente usadas para obter altos valores de  $r$ .

## 2.3 Recozimento

Após a laminação a frio, as chapas de aço se apresentam com dureza elevada (estado encruado), e o nível de resistência mecânica será tanto maior quanto mais alto for o percentual de redução durante a laminação a frio. As chapas apresentam uma baixa ductilidade, o que as torna impróprias para os casos que exigem operação de conformação como, por exemplo, embutimento e estiramento.

Recozimento é o tratamento térmico realizado com o fim de alcançar um ou vários dos seguintes objetivos: remover tensões devidas aos tratamentos mecânicos a frio ou a quente, diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade do aço, alterar as propriedades mecânicas como resistência e ductilidade, ajustar o tamanho de grão, regularizar a textura bruta de fusão, remover gases, produzir uma microestrutura definida, eliminar os efeitos de quaisquer tratamentos térmicos ou mecânicos a que o aço tiver sido anteriormente submetido



(CHIAVERINI). O recozimento engloba vários processos termicamente ativados que reduzem a energia armazenada no metal durante a deformação a frio, devido à redução do número e ao rearranjo de defeitos cristalinos.

Como a recuperação não envolve a migração de contornos de alto ângulo, o material deformado retém sua identidade cristalográfica, ou seja, sua textura, embora a densidade e a distribuição de defeitos cristalinos sejam alteradas (ANTENOR, 2001). Além disso, se o grau de encruamento for pequeno, a recuperação sozinha pode ser suficiente para retornar o material plasticamente deformado a uma condição estável equivalente àquela existente antes do encruamento (GUY, 1976).

O recozimento abrange os seguintes tratamentos específicos: recozimento pleno, recozimento cíclico, recozimento para alívio de tensões, recozimento em caixa e a esferoidização. O recozimento pleno consiste no aquecimento do aço a uma temperatura superior à zona crítica seguida por um resfriamento lento e tem por finalidade restaurar as propriedades alteradas por um tratamento anterior ou refinar estruturas brutas de fusão. No cíclico ou isotérmico tem-se um resfriamento rápido e um controle das zonas de temperatura, aonde o material deve ficar até que a austenita se transforme nos produtos normais de transformação (perlita e cementita para aços hipoeutetóides ou só perlita para aços eutetóides) com posterior resfriamento até a temperatura ambiente. Outro tipo de recozimento, o recozimento para alívio de tensões, é realizado a uma temperatura abaixo do limite inferior da zona crítica. Este tratamento é feito, justamente, para aliviar as tensões originadas em processos de conformação, soldagem, e outros. Por fim, o recozimento em caixa, é um tratamento no qual as peças são colocadas em recipientes vedados no interior de um forno, impedindo com isso que a superfície acabada seja afetada por oxidação ou por outro efeito típico do tratamento térmico. Como resultado deste tratamento térmico, temos a restituição das propriedades mecânicas com excelente resultado da limpeza superficial.

### **2.3.1 Recozimento dos aços IF**

O recozimento de aços, como o IF, afeta diretamente as propriedades mecânicas e textura do produto final (JONAS, 1994). No recozimento do aço IF a energia que é armazenada, pelas fibras  $\alpha$  e  $\gamma$  (tipos de texturas desenvolvidas nos aços), durante a deformação a frio, controla o desenvolvimento de novas fibras  $\gamma$  recozidas. A recuperação,

uma das 3 etapas do recozimento, é a responsável pela queda nos valores de dureza após o recozimento dos aços IF. Porém esta afirmação é contrária à teoria clássica do recozimento, na qual a queda da dureza e de outras propriedades mecânicas está relacionada com a recristalização (RANA, 2006; RUIZ-APARÍCIO, 2001). Para os primeiros minutos de recozimento percebe-se uma queda acentuada da micro dureza, aumentando-se o grau de deformação, aumenta-se a queda inicial da dureza. Quanto maior a taxa de deformação mais rápida é a cinética de recuperação em aços IF (RANA, 2006). Para uma dada temperatura, a fibra  $\gamma$ , se intensifica com o aumento da deformação a frio até determinado grau de redução, e com a continuação da laminação ocorre uma queda acentuada na intensidade da fibra  $\gamma$ . A anisotropia normal média também apresenta um comportamento semelhante. Sendo necessária uma combinação de redução a frio com temperatura de recozimento para se alcançar um valor uniforme de fibra  $\gamma$  combinado com valores de  $r_m$  elevados.

O valor  $r$  e o coeficiente de encruamento aumentam tanto com o aumento do tempo de exposição quanto com o aumento da temperatura do forno. As melhores propriedades de um aço IF são obtidas quando, durante seu processamento, são aplicadas baixas temperaturas de reaquecimento da placa (<1150 °C) e de acabamento (HOILE, 2000).

## 2.4 Anisotropia de deformação plástica

A dependência das propriedades com a direção é chamada de anisotropia (CARLSSON, 1996) e será analisada neste projeto. A anisotropia das propriedades dos materiais, em algumas situações, é muito desejada e a textura, ou seja, o preferencial alinhamento de grãos nas direções cristalográficas do material, é de fundamental importância nestes casos. A presença de textura num metal deformado e/ou recozido é quando o material tem uma direção preferencial e apresenta propriedades mecânicas diferentes quando solicitado em direções distintas. É geralmente introduzida através do processo de deformação que o material sofre em processos de conformação como, por exemplo, a laminação.

A anisotropia em materiais sob a forma de chapas provém de 3 fatores: tensões internas, linhas de segregação e textura cristalográfica (GONÇALVES, 1971). Quando ocorre na direção da espessura é denominada anisotropia normal, quando ocorre no plano da chapa é denominada de anisotropia planar. A fim de avaliar a influência da anisotropia, define-se na

Equação 1 o índice de anisotropia plástica ( $r$ ), que relaciona as deformações provocadas na largura e na espessura de um corpo de prova submetido à tração.

$$r = \frac{\varepsilon_{rb}}{\varepsilon_{rt}} \quad (1)$$

Em que:

$\varepsilon_{rb}$ : Deformação real na largura (adimensional);

$\varepsilon_{rt}$ : Deformação real na espessura (adimensional).

Para material isotrópico,  $r = 1$ .

Como as medidas de espessura( $t$ ) geralmente se encontram sujeitas a um maior erro relativo, pode-se utilizar uma simplificação baseada na hipótese de volume constante durante a deformação plástica, explicitada na Equação 2, permitindo a determinação da anisotropia plástica a partir das deformações no comprimento ( $L$ ) e na largura ( $b$ ) do corpo de prova, dados por:

$$r = \ln \frac{\left(\frac{b_0}{b_{18}}\right)}{\left(\frac{b_{18} \cdot L_{18}}{b_0 \cdot L_0}\right)}, \quad (2)$$

Em que:

$b_0$  = largura inicial do corpo de prova (mm)

$b_{18}$  = largura após 18% de deformação no comprimento (mm)

$L_0$  = comprimento inicial do corpo de prova (mm)

$L_{18}$  = comprimento após 18% de deformação (mm)

O valor de 18% para a deformação é escolhido como um valor arbitrário que deverá se encontrar dentro da região de deformação plástica uniforme (GARCIA, 2012).

Outro parâmetro que pode ser determinado é a anisotropia normal ( $r_m$ ) dada pela média dos valores de anisotropia plástica de determinado produto, obtidos por ensaios em corpos de prova extraídos em três direções,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ; aonde estes valores dizem respeito

ao ângulo em relação a direção de laminação. Na Equação 3 temos o valor do índice de anisotropia normal dado por:

$$r_m = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4}, \quad (3)$$

Ao se extrair corpos de prova orientados a 0 °, 45 ° e 90° em relação à direção de laminação, obtém-se  $r_{0^\circ}$ ,  $r_{45^\circ}$  e  $r_{90^\circ}$ .

O coeficiente de anisotropia planar indica a diferença no comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa, conforme a Equação 4, as propriedades variam conforme a direção em que se faz o ensaio.

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ}, \quad (4)$$

Aonde  $r_0$ ,  $r_{45}$ ,  $r_{90}$  correspondem ao índice de anisotropia plástica de corpos de prova extraídos a 0°, 45° e 90°, respectivamente, em relação à direção de laminação (GARCIA, 2012).

Em materiais com elevado coeficiente de anisotropia normal, a deformação localizada causa um incremento rápido da resistência mecânica e o material se torna capacitado a resistir cada vez mais à deformação. Mas em materiais de pequeno coeficiente de anisotropia normal, a deformação localizada causa estricção (redução de seção) e uma perda da resistência mecânica. Temos que quando  $r < 1$  o material tende a escoar na direção da espessura, quando  $r = 1$  o material apresenta um escoamento isotrópico e quando  $r > 1$  o material flui no plano da chapa. Este último caso é o desejado para estampagem profunda, pois evita que o material sofra redução na espessura durante a conformação (ALMEIDA, 1987). Ao se dizer que o material possui uma anisotropia normal alta, entende-se dizer comumente que ele possui anisotropia planar alta, e isto é indesejável para a estampagem devido à chance de formação de “orelhas”. Uma anisotropia,  $r > 0$  leva a formação de orelhas, em DL e DT, enquanto que  $r < 0$  leva a formação de orelhas a 45° de DL. Uma pequena anisotropia planar,  $\Delta r \approx 0$ , juntamente com um alto valor de anisotropia normal,  $r_m$ , é o que tem sido buscado pelos pesquisadores para permitir uma performance ótima de estampagem (SARDINHA, 2012).

## CAPÍTULO 3

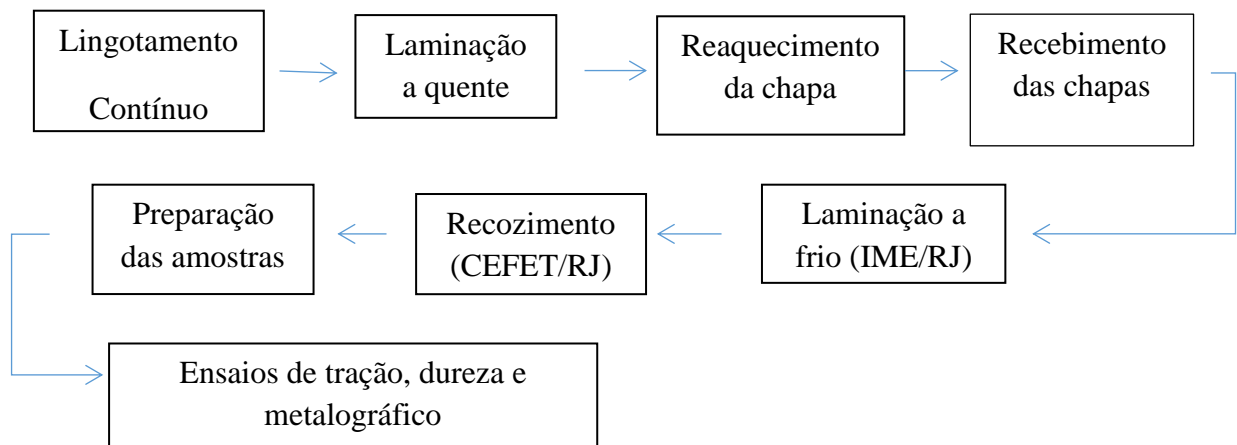
### MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se nesta pesquisa chapas de aço livre de intersticiais, cedidos pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Trata-se de um aço do tipo IF estabilizado ao Nb e Ti. Foram feitos processos termo-mecânicos, de modo a avaliar o efeito destes processamentos na microestrutura e nas propriedades mecânicas da chapa, com ênfase na capacidade de embutimento profundo. Foram recebidas 4 chapas laminadas a quente de 600 x 400 x 5 mm com a composição química apresentada na tabela 2 abaixo.

**TABELA 2:** Composição química

Aço IF estabilizado ao Nb e Ti [% em peso]	
C	0,002
Mn	0,17
P	0,01
S	0,01
Al	0,031
N	0,0032
Nb	0,02
Ti	0,011

Para uma melhor compreensão da sequência de processamento e análise feitos durante este estudo, a figura 3 a seguir, mostra um fluxograma com as etapas seguidas.



**FIGURA 3:** Etapas do processo

### 3.1 Processamento

As chapas foram recebidas da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) na condição de laminadas a quente. O processamento do material, desde o lingote até o laminado a quente. Após desenformamento a 1200°C ocorreram reduções a quente sucessivas a partir da espessura de 257 mm até a espessura final de 5 mm, com temperaturas da ordem de 930°C, posterior resfriamento acelerado até 730°C seguido de bobinamento e resfriamento lento ao ar até temperatura ambiente durante 5 dias.

O laminado a quente recebido para este estudo possuía dimensões de 600 x 400 x 5 mm, e foi necessário realizar um oxicorte, na Universidade Federal Fluminense (campus Niterói – RJ), para reduzir estas dimensões. Em seguida, a chapa foi novamente cortada, desta vez utilizando uma serra de fita, a fim de evitar um maior encruamento da amostra que logo mais seria laminada a frio. As chapas recebidas foram reduzidas para as dimensões de 100 x 100 x 5 mm, atendendo, com isso, as dimensões de operação do laminador utilizado.



**FIGURA 4:** Serra de fita do laboratório de usinagem do CEFET/RJ

Para reduções que atendessem ótimas características de estampabilidade ao aço, foram executadas laminações convencionais até que se chegasse entre 80% - 85% da espessura inicial. Para a etapa de laminação a frio, foi utilizado um laminador reversível FENNMFG, instalado no Instituto Militar de Engenharia (IME).



**FIGURA 5:** Laminador reversível do IME/RJ

Com essas novas dimensões pode-se atender a redução almejada em que se obtém um nível de encruamento sem que a resistência mecânica ultrapasse o valor desejado. As reduções foram feitas mantendo-se constante a direção de laminação.

Após laminadas a frio, as chapas, mantendo seus volumes iniciais tiveram seus comprimentos alongados em aproximadamente 5 vezes. Este resultado já era esperado uma vez que a redução da espessura fora também de aproximadamente 5 vezes. A espessura final da chapa após laminação a frio foi de aproximadamente 1 mm.

Após esta etapa do processamento, as chapas foram cortadas utilizando uma guilhotina do IME-RJ, em 4 tiras de 10,5 x 13 mm, a fim de serem levadas ao forno para a realização do tratamento térmico de recozimento, o último processo de transformação do material para o aprimoramento da sua estampabilidade. Este tratamento foi realizado no Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos do curso técnico do CEFET/RJ e o forno utilizado foi o INFORGEL GTI. A temperatura de trabalho utilizada neste processo foi de 850°C. O tempo de encharque calculado, com base na espessura da amostra e considerando o parâmetro recomendado pela indústria que é de 1 polegada por hora, foi de 142 segundos. No entanto, o tratamento térmico de recozimento foi conduzido por 5 minutos a fim de garantir o encharque, a difusão atômica e a movimentação de contornos de grão, e com isso garantindo a recuperação, recristalização, e crescimento de grãos.



**FIGURA 6:** Forno de recozimento do Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos, CEFET/RJ



## **3.2 Preparação das amostras para análise metalográfica**

### **3.2.1 Corte**

Para cortamos as amostras de acordo com as dimensões requeridas para o ensaio metalográfico (15 mm x 10 mm), onde a maior dimensão ficou na direção de laminação, utilizamos a guilhotina do laboratório de Soldagem do curso técnico do CEFET/RJ. Vale ressaltar que durante o corte, foi utilizado equipamento de proteção individual.

### **3.2.2 Embutimento**

Na etapa de embutimento das amostras para a preparação metalográfica, foram realizadas 3 amostras, onde constavam as regiões superficiais das chapas laminada a quente, laminada a frio e recozida. Tal processo foi realizado no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ, utilizando o equipamento AROTEC PRE-30, com parâmetros de temperatura e pressão de 160°C à 170°C e 150 kgf/cm<sup>2</sup>, respectivamente e resina sintética AROTEC baquelite – preto, para embutimento de corpos de prova metalográficos.

### **3.2.3 Lixamento**

Nesta etapa, também realizada no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ, foram utilizadas lixas do tipo "lixa d'água", fixadas na politriz da marca/modelo AROPOL 2V – AROTEC. A velocidade de polimento utilizada durante todo o processo foi baixa.

Durante o processo de lixamento iniciamos com a lixa mais grossa (100) e finalizamos com a mais fina (1000). Importante lembrar que a cada vez que se muda de lixa, deve-se mudar o ângulo do sentido de lixamento em 90 graus. O processo de lixamento é feito sob refrigeração com água e obedece a sequencia abaixo:

Posicionar a lixa de 100 no prato giratório do equipamento e então ligar a máquina. Abrir o registro de água (elemento refrigerante - conforme citado), manter contato da peça com a lixa com força constante e uniforme. Após utilizar a primeira lixa, gira-se a peça em 90 graus com relação ao sentido de lixamento anterior. Este procedimento foi repetido para as lixas 220, 320, 400, 500, 600, 800 e 1000 até a amostra obter uma aparência "quase

espelhada”. Durante esta etapa verificamos o grau de acabamento através de ensaio visual e microscopia ótica.

### **3.2.4 Polimento**

Para a etapa de polimento utilizou-se panos especiais, colados à Politriz de marca/modelo AROPOL 2V – AROTEC, sobre os quais são colocadas pequenas quantidades de abrasivos. O abrasivo varia em função do tipo de metal que está sendo preparado. Para esta amostra utilizamos pastas de diamante de 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  e por último a pasta de 1  $\mu\text{m}$ . O processo de polimento foi feito sob refrigeração com álcool, tendo sido iniciado com um lubrificante (glicerina adicionada ao álcool).

Durante este processo devemos aplicar o álcool constantemente para que seja mantido um filme lubrificante entre a amostra e o pano, realizando sempre movimentos circulares, a fim de obtermos um grau de acabamento e planicidade ideais para análise metalográfica. Nesta etapa verificamos o grau de acabamento através de microscopia ótica. Esta etapa, bem como o ataque químico, a medição do tamanho de grão e a medição da dureza das amostras foram realizadas no Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ.

### **3.2.5 Ataque Químico**

Existe uma enorme variedade de ataques químicos para diferentes tipos de metais e situações. Para as amostras de aço IF utilizadas neste projeto, o ataque foi feito por esfregação da amostra, sendo 20 esfregaços (10 em cada sentido) com NITAL 5%, (ácido nítrico e álcool), onde a porcentagem é a concentração do reagente.

### **3.2.6 Medição do Tamanho de Grão**

A medição do tamanho médio de grão será realizada a partir de fotografias (micrografias) feitas na amostra com o uso do microscópio ótico, figura 7. Serão analisadas 10 áreas distintas da superfície da amostra. O Método usado para a medição do tamanho médio de grão será o da Intercessão Linear, o qual considera o comprimento L de uma dada

linha, o número de intercessões  $N$  que essa linha faz com os contornos de grão da micrografia e o aumento  $M$  (magnificação) utilizado, de acordo com a Equação 5:

$$D = \frac{L}{N \cdot M} \quad (5)$$

Em que:

$D$  = diâmetro médio de grãos.



**FIGURA 7:** Microscópio Ótico Olympus BX60M do Laboratório de Materiais, CEFET/RJ.

### 3.3 Ensaio de Dureza

Obtidas as imagens microestruturais, foi realizado o ensaio destrutivo de micro dureza, utilizando um micro durômetro AnInstron Company – modelo 422MVD, onde a superfície testada necessita de um acabamento metalográfico. As indentações estáticas são provocadas por cargas de até 1,0 kgf. Foi utilizado um aumento de 400X e indentador de diamante Vickers. Todos os parâmetros foram obtidos da norma de dureza ASTM E92:2003 e o objetivo foi analisar a alteração da dureza diante dos processos realizados no aço em questão.



**FIGURA 8:** Micro durômetro AnInstron Company do Laboratório de Materiais, CEFET/RJ.

### 3.3.1 Tratamento estatístico dos resultados no ensaio de dureza

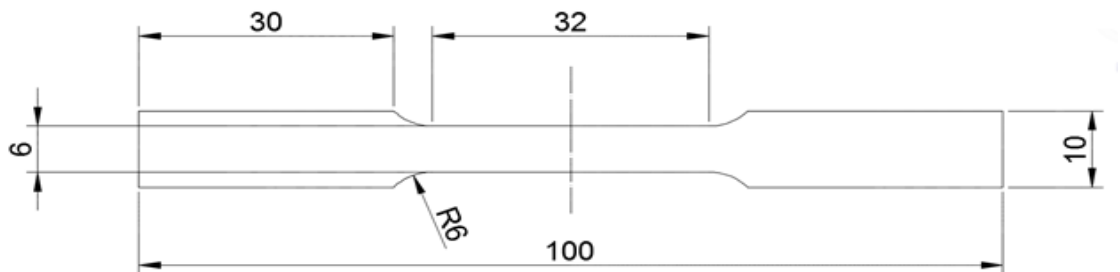
A importância prática deste tipo de tratamento está em que diversos problemas de engenharia que se distribuem, aproximadamente, segundo um modelo normal. Desse modo utilizaremos a equação conhecida como distribuição normal, ou distribuição Gaussiana para descrever o comportamento físico apresentado nos resultados obtidos no ensaio de micro dureza. A Equação 6 é conhecida como função densidade de probabilidade, dada por:

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right), \quad -\infty < x < \infty \quad (6)$$

Com os valores de dureza obtidos no ensaio, calculamos o desvio padrão e a média aritmética, a fim de utilizamos a Eq. 5. O equacionamento e as curvas de distribuição normal foram elaborados utilizando a ferramenta computacional MATLAB®, o equacionamento está apresentado no apêndice I.

### 3.4 Ensaio de Tração

Com a finalidade de obter as propriedades mecânicas do material, inclusive coeficiente de anisotropia planar, foi realizado o ensaio de tração nas amostras recozidas. O teste foi feito a temperatura ambiente e de acordo com a norma ASTM E8/E8M-11 utilizando as dimensões de corpo de prova reduzido e taxa de deformação de 1 kgf/mm/s. O resultado será apresentado para comparação na forma de gráficos em função dos resultados obtidos das curvas tensão-deformação. A máquina onde o ensaio de tração foi realizado é uma Instron Company- modelo 5966, vide figura 10, instalada no Laboratório de Compósitos e Adesivos, no CEFET/RJ. As dimensões do corpo de prova se encontram na figura 9 abaixo.



**FIGURA 9:** Dimensões do corpo de prova segundo a norma ASTM E8-E8M.

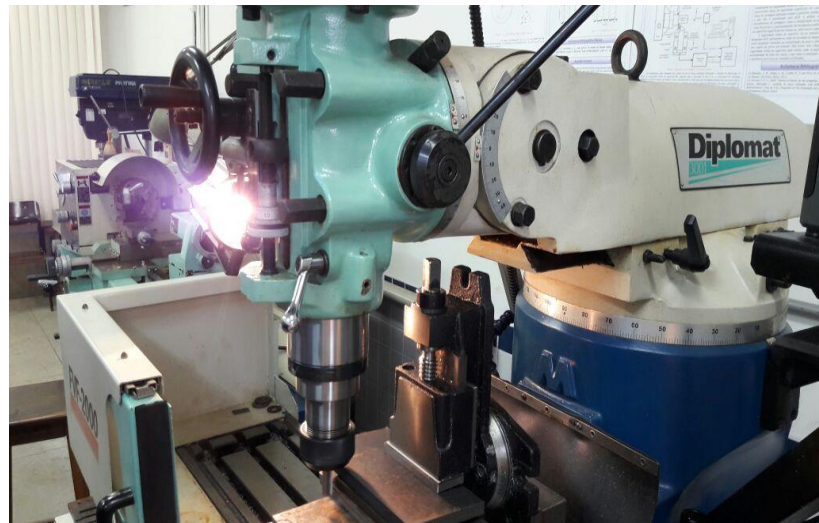


**FIGURA 10:** Máquina universal para ensaios mecânicos Instron- Modelo 5966, Laboratório de Compósitos e Adesivos, CEFET/RJ.

Os corpos de prova foram fabricados no Laboratório de Pesquisa e Usinagem (LABUS) do CEFET/RJ. Foram usinados ao todo 15 corpos de prova, conforme a figura 12, sendo 5 para cada uma das seguintes orientações em relação a direção de laminação da chapa:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ .

Durante a usinagem dos corpos de prova para ensaio de tração, realizou-se um fresamento de topo com auxílio de um dispositivo de fixação de usinagem, elaborado para este trabalho, a fim de facilitar o delineamento da produção. Foram utilizados com base nos cálculos de velocidade de corte uma velocidade tangencial de 50 m/min e fresa de topo de 12 mm de diâmetro, acarretando em 1326 rotações por minutos da fresadora. Todavia, utilizou-se 1170 rotações por minuto, por ser um valor padronizado da máquina e mais conservativo do que o calculado. O equipamento utilizado foi a Fresadora Diplomat 3001- Modelo FVF 2000.

Vale ressaltar que foram utilizados todos os equipamentos de proteção individual para este processo.



**FIGURA 11:** Fresadora Diplomat 3001- Modelo FVF 2000 do Laboratório de Pesquisa e Usinagem, CEFET/RJ.



**FIGURA 12:** Corpos de prova usinados no Laboratório de Pesquisa e Usinagem, CEFET/RJ.

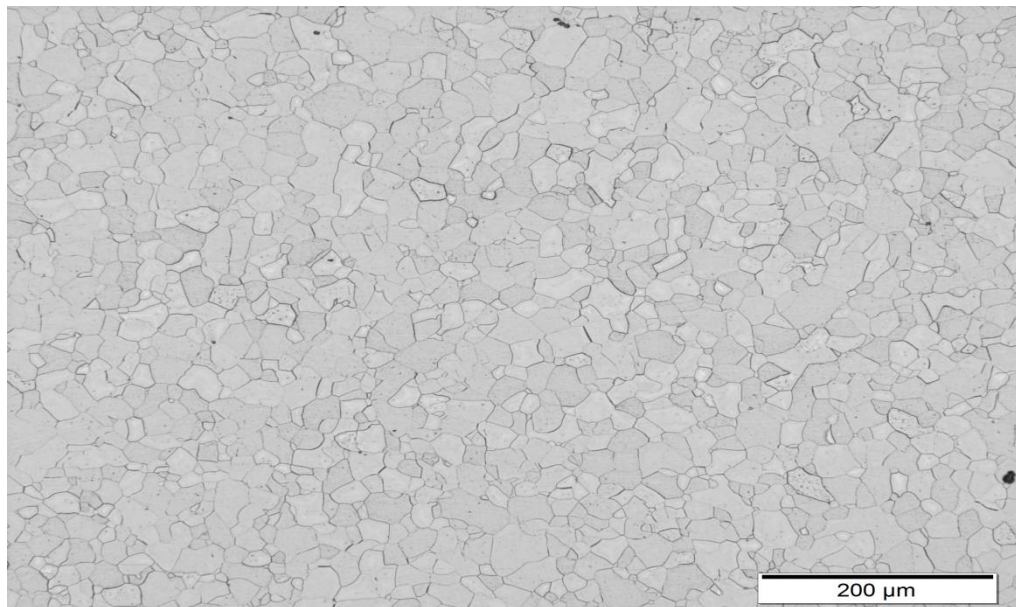
## CAPÍTULO 4

# RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Micrografias

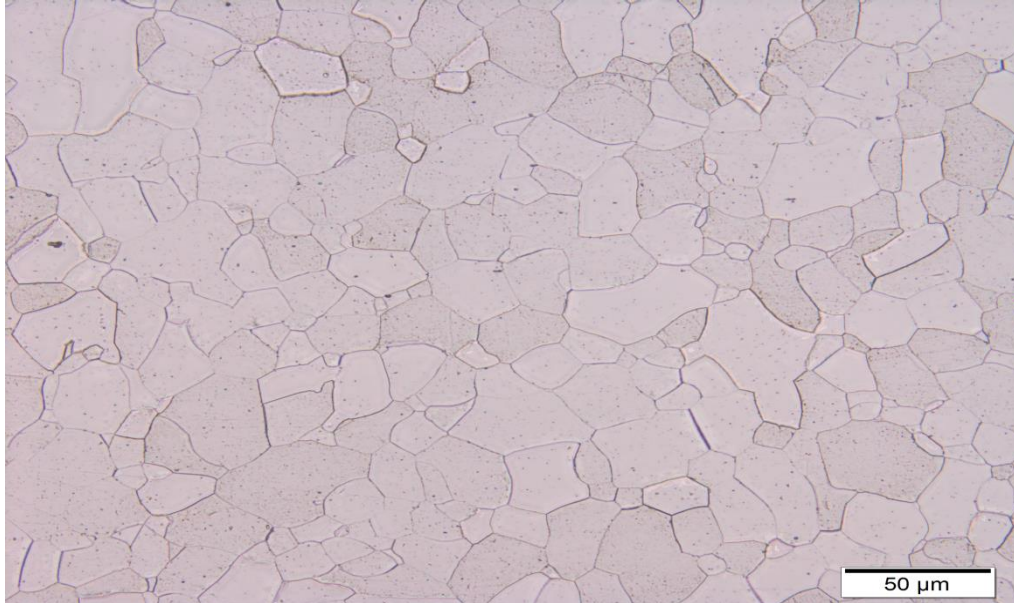
As amostras foram preparadas para um melhor acabamento para micrografia e ensaio de micro dureza. As figuras das amostras com aumento de 500X foram feitas para uma melhor visualização dos grãos.

No material como recebido, após a preparação metalográfica, foi observada a seguinte microestrutura mostrada nas figuras 13 e 14.



**FIGURA 13:** Micrografia do aço IF laminado a quente. Aumento de 200X.

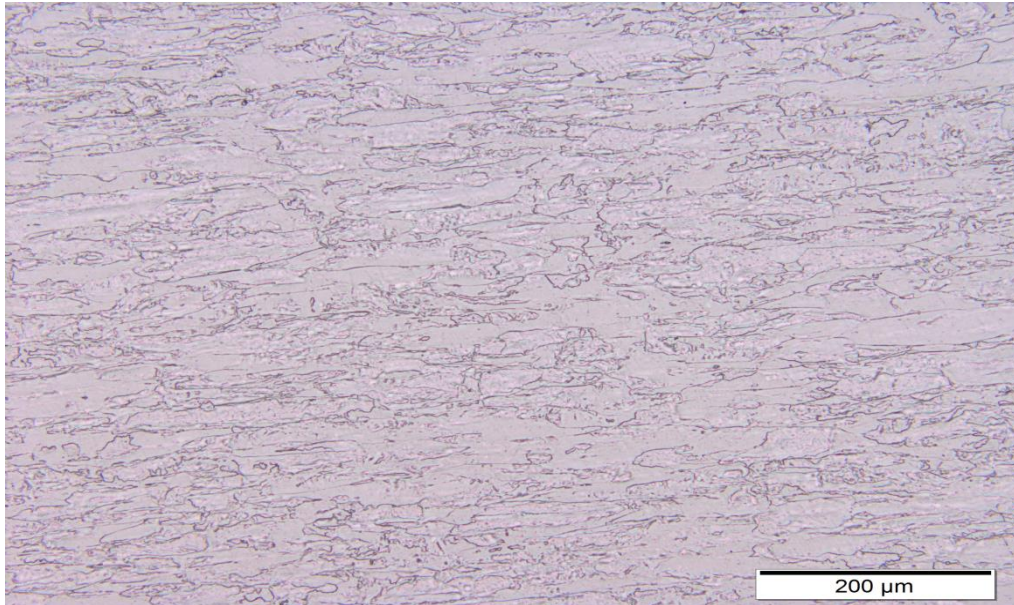




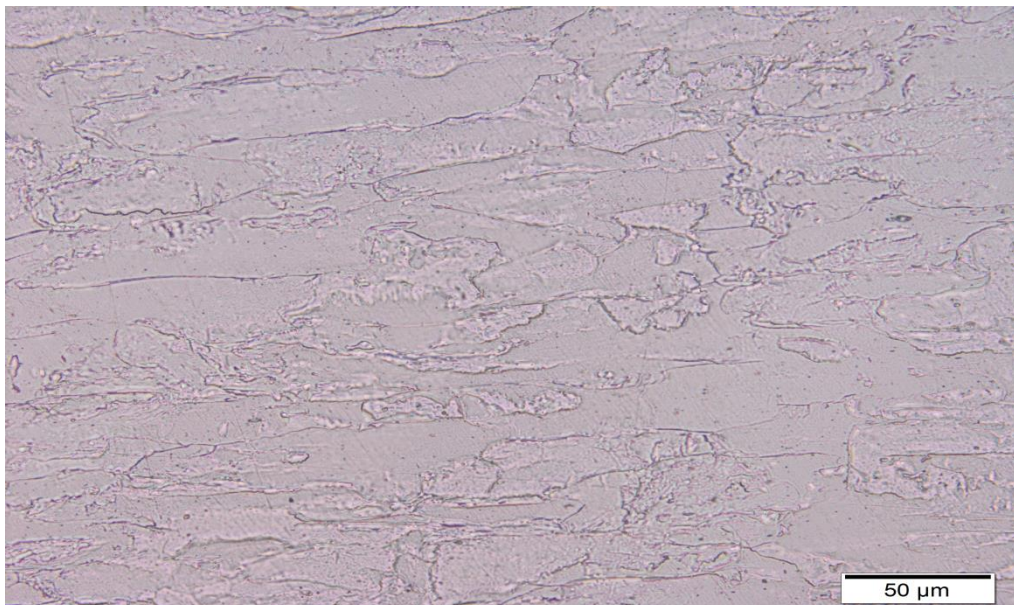
**FIGURA 14:** Micrografia do aço IF laminado a quente. Aumento de 500X

Como esperado a partir dos dados obtidos pela CSN, o lingote, na temperatura de laminação na ordem de 930°C, obteve dissolução completa dos carbonitretos de micro ligantes devido à austenitização da matriz. Como verificado pelas figuras 13 e 14, devido à presença de grãos equiaxiais, pode-se dizer que houve recristalização dinâmica durante o processo de laminação a quente e dissolução dos precipitados devido ao reaquecimento da placa.

No material laminado a frio foram observadas as seguintes microestruturas mostradas nas figuras 15 e 16.



**FIGURA 15:** Micrografia do aço IF laminado a frio. Aumento de 200X.

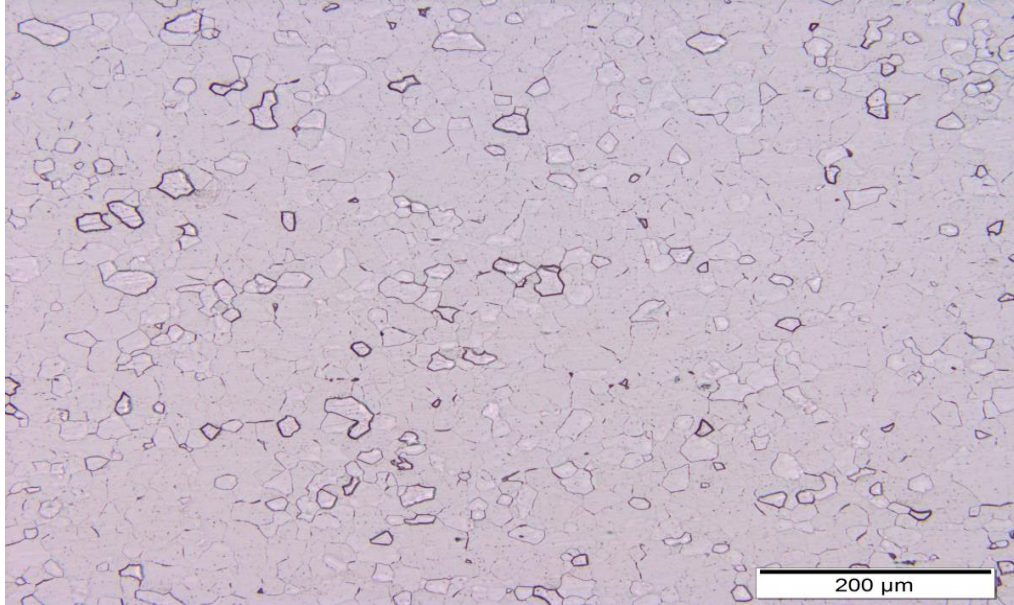


**FIGURA 16:** Micrografia do aço IF laminado a frio. Aumento de 500X.

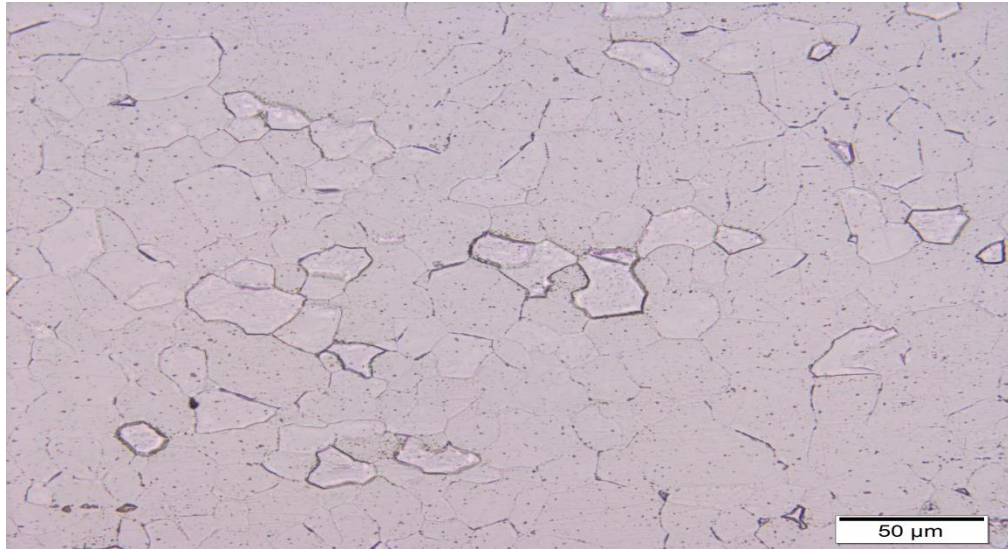
Pelas observações feitas com as amostras laminadas a frio os grãos assumiram a forma alongada na direção de laminação. Por obter um alto valor de  $r$  após a laminação à temperatura ambiente, cria-se uma textura que interfere diretamente na estampabilidade do

aço. Não houve nenhum fenômeno de restauração durante a laminação a frio, somente um aumento da resistência mecânica e da dureza, devido ao encruamento.

Nas amostras recozidas foram obtidos os resultados apresentados nas figuras 17 e 18.



**FIGURA 17:** Micrografia do aço IF recozido. Aumento de 200X.



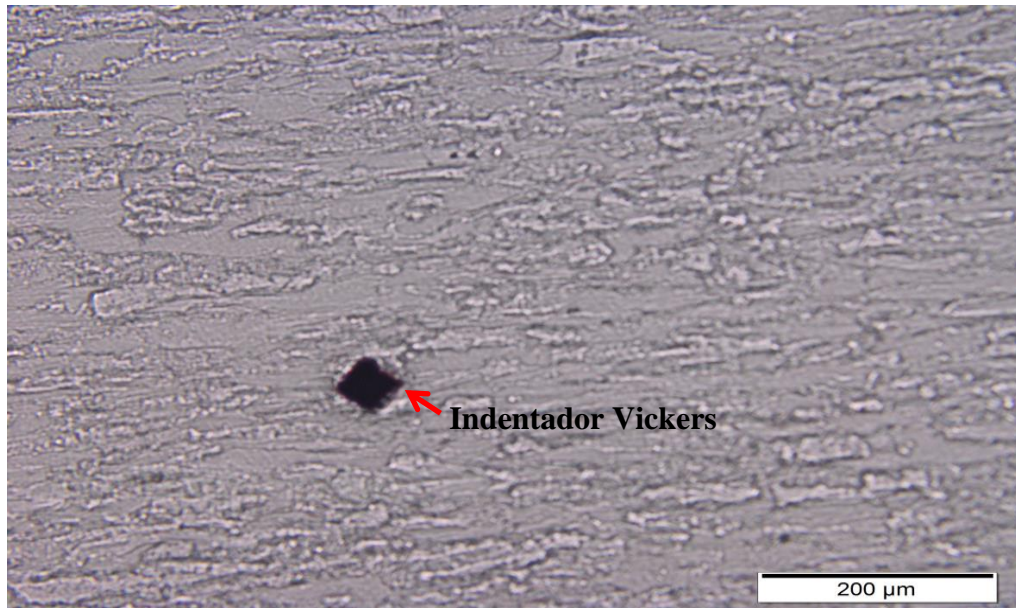
**FIGURA 18:** Micrografia do aço IF recozido. Aumento de 500X.

De acordo com as figuras 17 e 18 os grãos foram totalmente recristalizados e apresentaram tamanhos menores que no laminado a quente. Os carbonetos nos aços IF Nb/Ti mais refinados, resultado esperado devido ao recozimento, foram distribuídos ao longo da matriz microestrutural do material atuando como barreiras à migração dos contornos de alto ângulo durante as etapas de recristalização e crescimento de grão durante o recozimento, o que leva a um refinamento da microestrutura recristalizada.

Utilizando a Equação 5, Método de Intercessão Linear, o tamanho médio de grãos encontrado foi de  $32,2 \pm 2,95\mu\text{m}$ .

## 4.2 Micro dureza Vickers

Foram utilizados 500 gramas de força durante 10 segundos para a realização deste ensaio, sendo 10 indentações espalhadas ao longo do plano da amostra, com afastamento de 1 mm entre elas. A figura 19 representa uma micrografia onde detalha a indentação do micro durômetro.

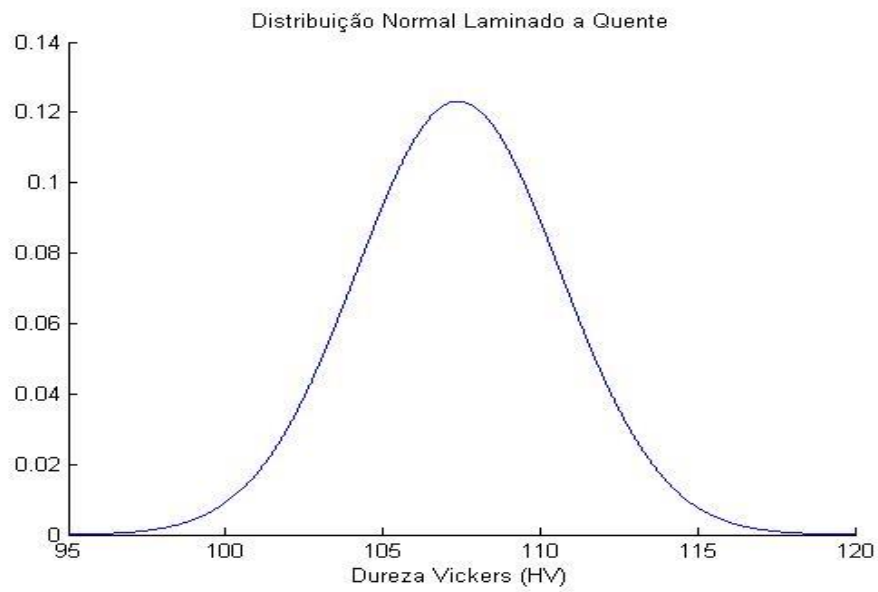


**FIGURA 19:** Micrografia da amostra laminada a frio após a medição de dureza.

A tabela 3 apresenta os dados de dureza obtidos para a amostra laminada a quente, onde se obteve a média aritmética, variância e desvio padrão. A figura 20 apresenta a distribuição normal dos dados da tabela 3.

**TABELA 3:** Dados de micro dureza da amostra laminada a quente.

Laminado a quente	
1	111
2	103
3	109
4	106
5	110
6	107
7	110
8	111
9	104
10	103
MÉDIA ARITMÉTICA	107,4
VARIÂNCIA	10,5
DESVIO PADRÃO	3,2

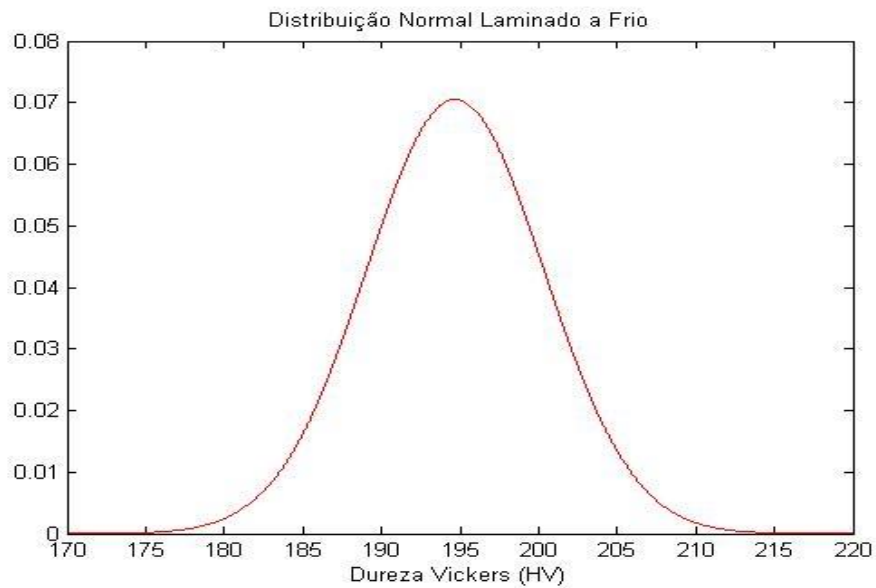


**FIGURA 20:** Distribuição normal dos resultados da amostra laminada a quente.

O aumento da resistência mecânica e dureza devido ao encruamento são os principais resultados da laminação a frio. O nível de resistência mecânica será tanto maior quanto mais alto for o percentual de redução durante a laminação a frio. A chapa em uso teve uma redução de aproximadamente 84% da sua espessura o que ocasionaria em uma dureza elevada, onde esta foi encontrada no micro durômetro, tendo em vista a tabela 4 e a figura 21 onde apresentam uma dureza média de  $194,7 \pm 5,7$  HV.

**TABELA 4:** Dados de micro dureza da amostra laminada a frio.

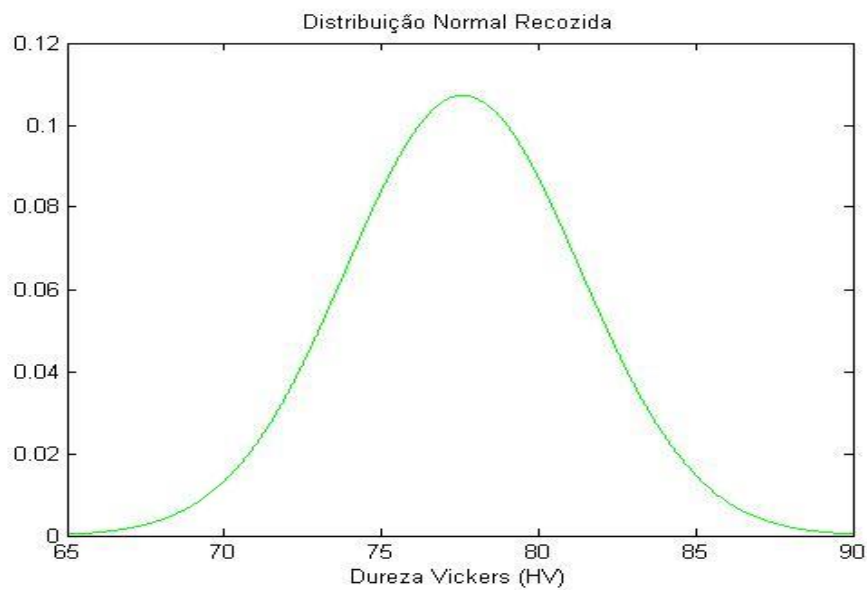
Laminado a frio	
1	204
2	192
3	194
4	188
5	188
6	202
7	195
8	194
9	190
10	200
MÉDIA ARITMÉTICA	194,7
VARIÂNCIA	32,0
DESVIO PADRÃO	5,7

**FIGURA 21:** Distribuição normal dos resultados da amostra laminada a frio.

Os valores encontrados para a amostra recozida, de acordo com a tabela 5 e a figura 22, estão coerentes com o esperado no recozimento, onde há uma diminuição da dureza e aumento da ductilidade. A dureza média para esta amostra é de  $77,6 \pm 3,7$  HV.

**TABELA 5:** Dados de micro dureza da amostra recozida.

Recozidas	
1	77
2	76
3	72
4	72
5	76
6	78
7	82
8	81
9	82
10	80
MÉDIA ARITMÉTICA	77,6
VARIÂNCIA	13,8
DESVIO PADRÃO	3,7

**FIGURA 22:** Distribuição normal dos resultados da amostra recozida.

Recozimento é o tratamento térmico realizado com o fim de alterar as propriedades mecânicas como resistência e ductilidade. Os resultados relativamente baixos encontrados no micro durômetro demonstram que a distribuição de defeitos cristalinos foi alterada e a energia armazenada no metal, durante a deformação a frio, foi reduzida.



### 4.3 Ensaio de tração

Após o recozimento uma microestrutura foi definida, tensões devidas aos tratamentos mecânicos a frio ou a quente foram aliviadas e propriedades mecânicas foram alteradas, ocasionando uma diminuição da resistência mecânica e dureza e recuperação da ductilidade.

Foram realizados, ao todo, 15 ensaios de tração uniaxial para determinação das propriedades mecânicas, tendo sido confeccionados cinco corpos de prova para cada ângulo relativo à direção de laminação ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ). Estes resultados podem ser observados nas figuras 24, 25 e 26. Após os ensaios e através de cálculos, foram obtidos os coeficientes de anisotropia normal e planar, além da tensão máxima de resistência, tensão de escoamento e tensão de ruptura.

Ao constatar os resultados, somente um corpo de prova a  $45^\circ$  da direção de laminação apresentou uma deformação fora da esperada. Pode-se notar que os valores nos corpos de prova a  $0^\circ$  e a  $90^\circ$  da direção de laminação obtiveram resultados de tensão e deformação bem semelhantes. Os valores de tensões máximas, de escoamento e de ruptura obtidos no ensaio de tração estão relacionados na tabela 6 abaixo.

Vale ressaltar que a média das tensões máxima, de escoamento e de ruptura, assim como seus respectivos desvios padrões, não levaram em consideração os resultados do CP 03, tendo em vista que este apresentou valores fora do esperado.

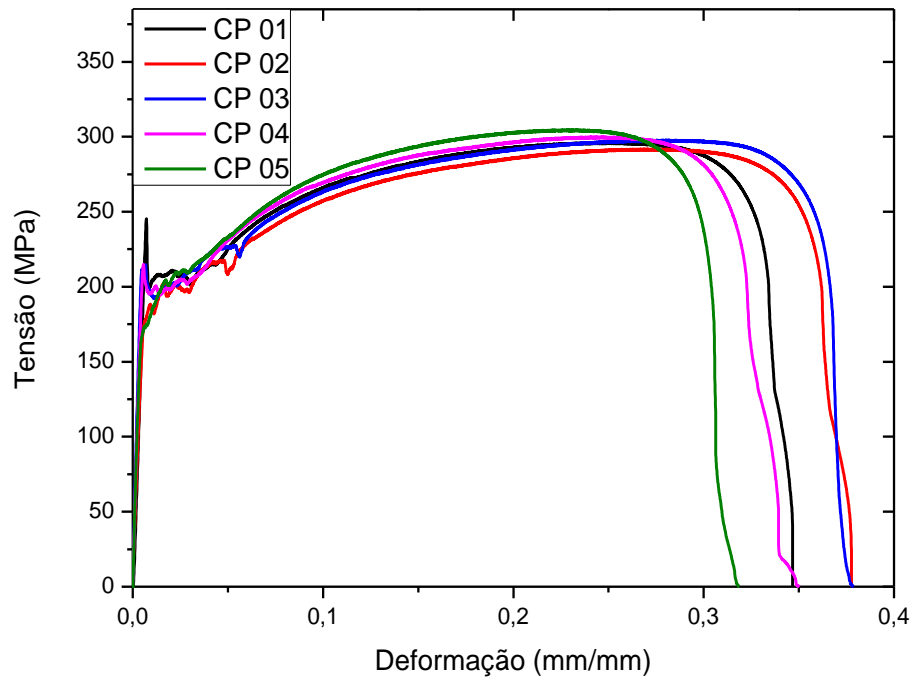
**TABELA 6:** Resultados do ensaio de tração.

Corpos de Prova	Tensão máxima ( $\sigma_u$ )			Tensão de escoamento ( $\sigma_e$ )			Tensão de ruptura ( $\sigma_r$ )		
	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$
CP01	296,3	455,9	311,0	208,1	259,5	198,2	226,6	387,1	272,1
CP02	292,0	451,3	303,3	198,9	265,7	199,9	226,0	373,0	260,4
CP03	297,8	413,8	311,9	200,9	240,6	195,8	202,4	360,4	269,0
CP04	300,0	438,4	305,6	200,1	254,7	195,9	209,5	360,7	260,7
CP05	304,7	476,3	281,2	203,0	269,4	178,5	208,0	386,2	238,9
<b>Desvio Padrão</b>	4,7	15,7	12,5	3,6	6,5	8,6	11,1	12,5	13,0

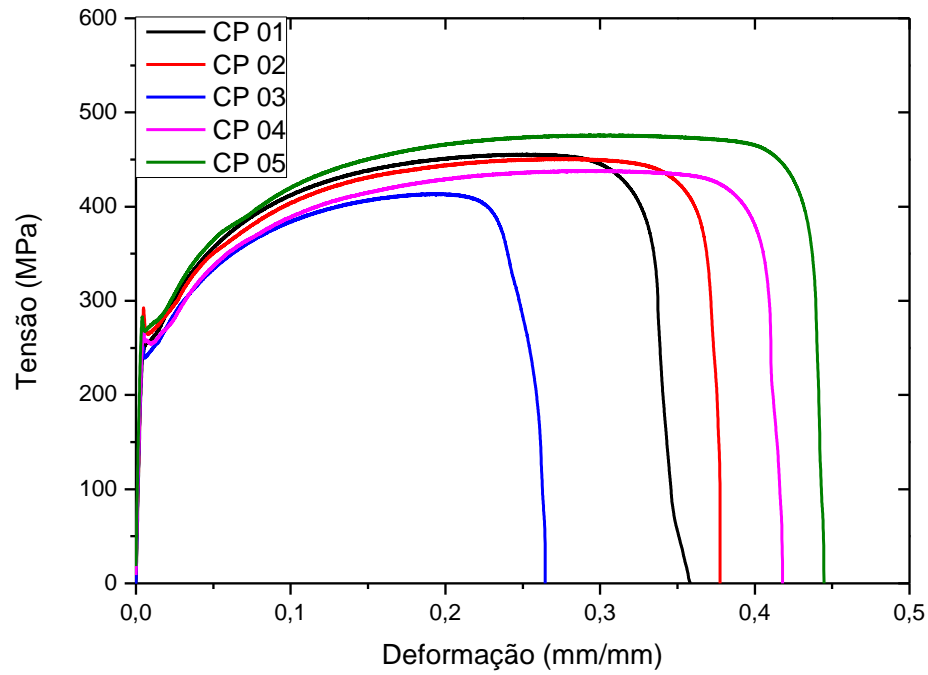
A figura 23 mostra o momento em que o corpo de prova a 0° da DL se rompeu, apresentando uma fratura a 45° do eixo longitudinal do corpo de prova, com deformação lateral, caracterizando o tipo de fratura esperado neste ensaio, fratura dúctil.



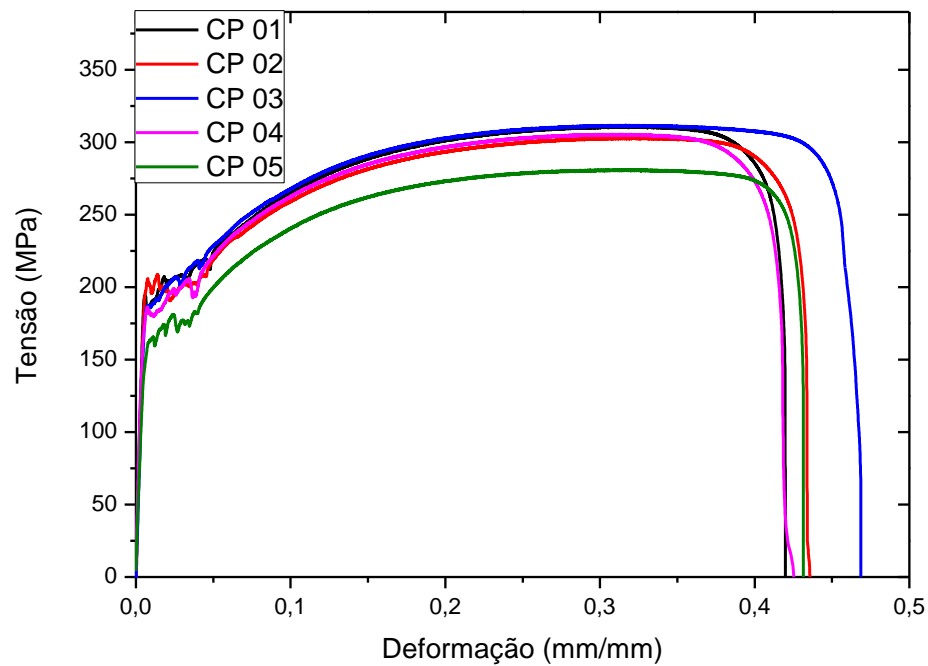
**FIGURA 23:** Fratura a 45° com deformação lateral no corpo de prova a 0° da DL.



**FIGURA 24:** Curvas características dos ensaios de tração para os corpos de prova a 0° da direção de laminação.



**FIGURA 25:** Curvas características dos ensaios de tração para os corpos de prova a 45° da direção de laminação.



**FIGURA 26:** Curvas características dos ensaios de tração para os corpos de prova a 90° da direção de laminação.

De acordo com as figuras 24, 25 e 26, percebe-se que os corpos de prova a 45° da direção de laminação alcançaram maiores tensões de resistência. O limite de resistência e de escoamento foram superiores aos informados pela CSN por problemas encontrados durante a usinagem e/ou erros provenientes da operação do ensaio de tração.

A tabela 7 apresenta a comparação dos dados médios de tensão de escoamento, tensão máxima e alongamento dos corpos de prova. A deformação da amostra estudada, 40,5%, encontrou-se na faixa de tolerância da indústria (CSN) que varia de 40 a 41%.

**TABELA 7:** Comparativo das Propriedades Mecânicas

Aço	Espessura	Propriedades Mecânicas					
		Limite de Escoamento (MPa)		Limite de Resistência (MPa)		Alongamento (%)	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Aço IF Nb/Ti	0,8	219,4	37,4	352,1	89,6	40,5	2,2
IF-CSN	0,7-2,0	140 à 190	-	mínimo de 270	-	40 à 41	-

#### 4.4 Coeficiente de anisotropia

Os aços IF apresentam excelente conformabilidade, indicado pelos altos valores verificados para os coeficientes de anisotropia normal. De acordo com a Equação 1, foram encontrados os seguintes valores de  $r$ :  $r_{0^\circ} = 2,79$ ;  $r_{45^\circ} = 3,84$   $r_{90^\circ} = 1,83$ . Com base nesses valores e utilizando as equações 3 e 4, foram calculados os coeficientes de anisotropia normal e planar, respectivamente. A tabela 8 indica os resultados obtidos para o coeficiente de anisotropia normal e planar:  $r_m = 3,08$  e  $\Delta r = -1,53$ . Para o coeficiente de anisotropia normal o valor esperado é de aproximadamente 2,2 e para o coeficiente de anisotropia planar espera-se a obtenção de um valor próximo de zero. Todavia estes valores ficaram díspares e a possível justificativa para essa diferença pode estar na baixa confiabilidade dimensional dos corpos de prova de tração devido a problemas durante a usinagem já mencionados.

**TABELA 8:** Resultados de anisotropia

Índice de anisotropia plástica (r)			
	$r_{0^\circ}$	$r_{45^\circ}$	$r_{90^\circ}$
CP 01	3,18	1,19	2,78
CP 02	2,50	2,68	1,38
CP 03	2,61	-	1,22
CP 04	2,88	5,50	2,36
CP 05	2,79	6,02	1,43
MÉDIA ARITMÉTICA	2,79	3,84	1,83
$r_m$	3,08		
$\Delta r$	-1,53		

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Para melhorar a otimização do custo de produção do aço IF-Nb/Ti, uma das alternativas é alterar os parâmetros de processamento termomecânicos. Para este projeto, foi realizado um processamento termomecânico e realizados ensaios das amostras laminadas a quente, laminadas a frio e recozidas. Os resultados foram satisfatórios no que tange a evolução micro estrutural.

A partir dos ensaios metalográficos pode-se notar que os grãos se tornaram alongados após a laminação a frio e após o recozimento apresentaram formato equiaxial, indicando que a temperatura de 850 °C e o tempo de recozimento de 5 minutos aplicados foram suficientes para a ocorrência da recuperação e recristalização do material.

Os valores de dureza obtidos de 107, 195 e 98 HV para as amostras laminadas a quente, a frio e recozidas, respectivamente, atenderam ao esperado. O comportamento desta propriedade manteve as características esperadas, o aumento da dureza na amostra laminada a frio em relação à dureza da amostra laminada a quente e da queda significativa da mesma na amostra recozida indicaram uma devida resposta aos tratamentos realizados e uma boa relação entre os resultados.

Os resultados dos ensaios de tração mostraram um material com alongamento de 40,5% e estão de acordo com o valor recomendado de 40 à 41% pela CSN. As tensões de escoamento e limite de resistência obtidas apresentaram um valor de 219,4 MPa e 352,1MPa, respectivamente, superior ao industrial (CSN).

O valor do coeficiente de anisotropia normal ( $r_m$ ) foi de 3,08, sendo este acima de 2,2, cujo valor representa um indicativo de ótimo desempenho em processos de estampagem profunda, onde é requerida resistência à deformação na direção normal ao plano da chapa. Um elevado valor de  $\Delta r$  de -1,53 significou que as propriedades atuaram de forma diferente em cada plano da chapa, o que resulta na formação de orelhas.

## **CAPÍTULO 6**

### **TRABALHOS FUTUROS**

Poderíamos sugerir como assunto para trabalhos futuros os seguintes temas:

“Estudo da textura cristalográfica (orientação cristalográfica preferencial dos grãos) dos aços IF”. Este estudo complementaria os ensaios já realizados contribuindo para a escolha de melhores parâmetros de processamento termomecânico e de composição química do aço, a fim de obter propriedades mecânicas finais de qualidade superior.

“Testes de embutimento profundo em chapas de aço IF recozidas”. Os ensaios de embutimento profundo aliados aos ensaios de tração trariam uma confiabilidade ainda maior aos resultados finais de anisotropia planar e média.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ABE, H.**; TSUNOYAMA, K.; UESUGI, N.; SHIBASAKI O.; SATOH, S.; OBARA, T. Development of extra-deep drawing cold-rolled sheet steels for integrated automotive parts. Kawasaki Steel Technical Report, n. 24, April 1991. p. 84-90.

**ANTENOR, F. F.**; LIMA, L. M. G; PADILHA, A. F; LIMA, N. B. Controle da microestrutura e da textura de chapas de aço baixo carbono para estampagem. São Paulo: EPUSP, 2001. p. 189-204.

**BHATTACHARYA, D.**; GUPTA, I. Metallurgy of formable vacuum degassed interstitial free steels. In: Metallurgy of Vacuum Degassed Steels, 1990, p. 43-72.

**CHIAVERINI, V.**, Processos de Fabricação e Tratamento, 2<sup>a</sup> Ed., Markron Books.

**CODA, R. C.**; Análise de Defeitos em Laminação. Porto Alegre, UFRGS, 2002.

**CODA, R. C.** Calibração: Produtos longos de aço laminado a quente. Porto Alegre, UFRGS, 2001.

**COLPAERT, H.**, 1974, “Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns”, Ed. Edgard Blucher, São Paulo, SP.

**DIETER, G.**, Mechanical Metallurgy.: McGraw Hill, 1986

**FERRARESI, D.**, “Fundamentos da usinagem dos metais”, Ed. Edgard Blucher, São Paulo, SP.

**FONSECA, FABIANO A. V.**, Efeito do substrato dos aços IF nas propriedades de revestimento galvannealed – Dissertação de mestrado – Outubro/2006

**GARCIA, A.;** SPIM, J. A.; SANTOS, C. A., Ensaio dos Materiais, 2ª Ed. LTC – p. 46; p. 115 – 147.

**GOMES, CARLOS A. C.,** 2013, “Otimização em uma linha de inspeção de bobinas de aço laminado a frio” – Dissertação de mestrado.

**GONÇALVES, L. O.;** KLEIN, L. N. Controle de estampagem de chapas finas a frio. In: SIMPÓSIO INTERNO DA USIMINAS, 3, Ipatinga, set. 1971.

**GUY, A. G.** Ciência dos materiais. Rio de Janeiro: Ed. Universidade de São Paulo, 1980. P. 305 a 313.

**HOILE, S.,** Processing and properties of mild interstitial free steels. Materials Science and Technology, October 2000, p. 1079-1093.

**HASHIMOTO, O., A. SATOH, T. IRIE, N. OHASHI,** "Ultra-low C-Nb-P steel sheet with high strength and excellent deep drawability," in International Conference on Advances in Physical Metallurgy and Applications of the Steel, vol. Book 284, 1982, pp. 95-104.

**HOOK, R.E., A.J. HECKER AND ELIAS, J.A.,** "Texture in Deep Drawing Columbium (Nb)- Treated Interstitial- Free Steels," Metall. Trans. A, vol. 6A, pp. 1683-1692, 1975.

**HUMANE, M. M., MINZ, R.K., PARETKAR, R.K., PESHWE, D.R.** Effect of cold rolling and mode of annealing on textures, mechanical properties and formability limit diagrams in interstitial free steel sheets. Transactions of the Indian Institute of Metals v. 63, 2010 – p 867-880.

**JONAS, J.J., RAY, K.R., HOOK, R.E.** Cold rolling and annealing textures in low carbon and extra low carbon steels. International Materials Reviews 39 (1994) p. 129-172.

**MEIRA, RODRIGO R.,** Efeito da variação das condições de encharque nas propriedades mecânicas do material IF processado no recozimento contínuo da USIMINAS - Dissertação de Mestrado - Fevereiro de 2006.

**OLIVEIRA, F. C., ABRANTES, A. L. A., LINS, J. F. C.** Caracterização microestrutural de um aço IF após deformação plástica severa via ARB e posterior recozimento. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, 21 a 25 de novembro de 2010, Campos do Jordão, SP, Brasil.

**OVERHAGEN, C.; MAUK, P.** Cold rolling of metal foils by means of ceramic work rolls. 2013.

**PLAUT, R. L.:** Estampabilidade de chapas: ensaios e aplicações. IN: TSCHIPTSCHUIN, A. P et al. (Ed.) Textura e relação de orientação. São Paulo: IPEN, 2003.

**PINTO, M. C.; KLEIN, L. N.; CASTRO, L. C.; ALVES, A. C.** Desenvolvimento de aços ‘interstitial free’ pela USIMINAS. Metalurgia e Materiais. São Paulo: ABM, v. 48, n. 406, 1992, p.327-333.

**PRADHAN, R.** Cold-rolled interstitial-free steels: a discussion of some metallurgical topics. In: Proceedings of International Forum for Physical Metallurgy of IF Steels, Tokyo, ISI INTERNATIONAL, 1996, p.165-177.

**RANA, R., AZEEM, N., SINGH, S.B., MOHANTY, O.N.** Mechanism of annealing in interstitial free steels. Trans. Indian Inst. Met. vol. 59 (4) (2006) p. 491-496.

**RUIZ-APARICIO, L.J., GARCIA, C.I., DEARDO, A.J.** Development of {111} transformation texture in interstitial-free steels. Metallurgical and Materials Transactions A v. 32, p. 2325-2334, 2001.

**SARDINHA, N. A.,** “Comparação da textura e propriedades mecânicas de um aço if para estampagem resultante da laminação convencional e assimétrica”. Dissertação de Mestrado – IME/RJ – 2012.

**SATOH, S.,** "A New Process for Manufacturing Deep-Drawing Cold Rolled Steel Sheets from Extra Low Carbon Steels," KSC Report, 1985.

**STRUGALA, D. C.; FEKETE, J. R.; YAO, Z.** Advanced sheet steels for automotive applications, JOM, 1992, p. 17-21.

**TANAKA, Y., D. Lagoutte, M. Hayakawa, F. Lefeuvre, and S. Tajima,** Spectral broadening of VLF transmitter signals and sideband structure observed on aureol 3 satellite at middle latitudes, J. Geophys. Res., 92, 7551, 1987.

**TITHER, G., C.I. GARCIA, M. Hua, and A.J. DEARDO,** "Precipitation Behavior and Solute Effects in Interstitial-Free Steels Sheets," in *International Forum for Physical Metallurgy of IF Steels, ISIJ*, Tokyo, 1994, pp. 293-322.

**TOKUNAGA, Y., KATO, H.,** Application of Interstitial-Free (IF) Sheet Steels to automobile Parts. In: METALLURGY OF VACUUM-DEGASSED STEEL PRODUCTS, Ed. By R. Pradhan, 1990, p. 91-108.

**TSUYONAMA, K., et al.,** "Effect of Lowering Sulfur Content in Ti-Added, Deep - Drawable Hot- and Cold- Rolled Sheet Steels," in Hot and Cold Rolled Sheet Steels, TMS, Warrendale, PA, 1988, pp. 155-164.

**VIANA, C. S. C.; PAULA, A. S.** Textura de deformação. IN: TSCHIPTSCHIN, A. P et al. (Ed.). Textura e relações de orientação. São Paulo: IPEN, 2003.

## APÊNDICE I

## TRATAMENTO ESTATÍSTICO – CÓDIGO DO MATLAB®

```

clearall
clc

LQ = [111 103 109 106 110 107 110 111 104 103];%laminado a quente
LF = [204 192 194 188 188 202 195 194 190 200]; %laminado a frio
R = [77 76 72 72 76 78 82 81 82 80]; %recozida

u_LQ = mean(LQ); %média laminado a quente
u_LF = mean(LF); %média laminado a frio
u_R = mean(R); %média recozida

S_LQ = std(LQ); %desvio padrão laminado a quente
S_LF = std(LF); %desvio padrão laminado a frio
S_R = std(R); %desvio padrão recozida

x_LQ = [95:0.01:120];
DistNorm_LQ = exp(-(x_LQ-u_LQ).^2./(2*S_LQ^2))./(S_LQ.*(2.*pi).^0.5);

x_LF = [170:0.01:220];
DistNorm_LF = exp(-(x_LF-u_LF).^2./(2*S_LF^2))./(S_LF.*(2.*pi).^0.5);

x_R = [65:0.01:90];
DistNorm_R = exp(-(x_R-u_R).^2./(2*S_R^2))./(S_R.*(2.*pi).^0.5);

hold on
figure(1)
plot(x_LQ,DistNorm_LQ)
xlabel('Dureza Vickers (HV)')
title('Distribuição Normal Laminado a Quente')

```

```
figure(2)
plot(x_LF,DistNorm_LF,'r')
xlabel('Dureza Vickers (HV)')
title('Distribuição Normal Laminado a Frio')
```

```
figure(3)
plot(x_R,DistNorm_R,'g')
xlabel('Dureza Vickers (HV)')
title('Distribuição Normal Recozida')
```