

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

**Análise das tensões residuais obtidas na laminação
de aços IF sob diferentes níveis de deformação**

Guilherme Bittencourt de Seixas

**Rio de Janeiro
Junho de 2018**

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

Análise das tensões residuais obtidas na laminação de aços IF sob diferentes níveis de deformação

Guilherme Bittencourt de Seixas

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.

Prof.^a Orientadora: Tatiane de Campos Chuvas

**Rio de Janeiro
Junho de 2018**

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

- S462 Seixas, Guilherme Bittencourt de
Análise das tensões residuais obtidas na laminação de aços IF
sob diferentes níveis de deformação / Guilherme Bittencourt de
Seixas.—2018.
viii, 41f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.
- Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.
Bibliografia : f. 39-41
Orientadora : Tatiane de Campos Chuvas
1. Engenharia mecânica. 2. Tensões residuais. 3. Aço. 4.
Laminação (Metalurgia). 5. Deformações (Mecânica). I. Chuvas,
Tatiane de Campos (Orient.). II. Título.

CDD 621

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à professora Tatiane Chuvas pela imensurável dedicação e solicitude ao aconselhar-me neste trabalho. Seu conhecimento acumulado e respeitoso histórico de alcances acadêmicos foram de principal importância para todo aprendizado obtido por mim ao longo da confecção deste projeto. Foi uma ótima oportunidade de crescimento de várias formas.

Muito obrigado à minha família pelo suporte de sempre e carinho: Ayrton Martins, Luzia Maria, Gustavo Bittencourt e minha namorada, Amanda Policarpo pela paciência e pelo estágio.

Agradeço pela motivação, parceria e conselhos de meus amigos, em especial à Beatriz Klotz e Reissel Reis, amigos de todas as horas que não medem esforços para ajudar. Além de todos os professores queridos encontrados nesta jornada.

RESUMO

Componentes mecânicos são muito influenciados pelas deformações plásticas que ocorrem durante seu processamento. Em particular os aços *Interstitial Free* (IF), amplamente utilizados na indústria automobilística, são trabalhados sob altos níveis de deformação plástica pois são submetidos a processos de conformação. Contudo, durante os processos de fabricação, são desenvolvidas tensões residuais, que podem ser benéficas ou malélicas a vida do componente. Em particular, nos processos de conformação mecânica, como a laminação, as tensões residuais são oriundas, principalmente, pela deformação plástica envolvida no processo. Entretanto, a composição química do material pode ter influencia significativa na natureza (trativa ou compressiva) e na magnitude das tensões residuais dos materiais após processos de conformação a frio. O objetivo desse trabalho é caracterizar o comportamento das tensões residuais de chapas fina de aço IF sob diferentes níveis de deformação plástica. Para isso foram utilizadas três composições químicas do aço IF, a fim de compreender a influência que a adição de determinado elemento de liga gera no estado final das tensões residuais. Os resultados mostraram que o comportamento das tensões residuais foi heterogêneo e que a adição de nióbio e fósforo tende a gerar um estado de tensões compressivo no material deformado, o que seria benéfico ao mesmo.

Palavras chave: Aços IF; titânio; nióbio, fósforo; laminação; tensões residuais;

ABSTRACT

Mechanical components are greatly influenced by the plastic deformations that occur during their processing. In particular, Interstitial Free (IF) steels, widely used in the automotive industry, are worked under high levels of plastic deformation because they are subjected to conformation processes. However, during the manufacturing processes, residual stresses are developed, which may be beneficial or harmful to the life of the component. In particular, in the mechanical forming processes, such as rolling, the residual stresses are mainly caused by the plastic deformation involved in the process. However, the chemical composition of the material may have a significant influence on the nature (tractive or compressive) and the magnitude of the residual stresses of the materials after cold forming processes. The objective of this work is to characterize the behavior of the residual stresses of thin plates of IF steel under different levels of plastic deformation. For this, three chemical compositions of the IF steel were used in order to understand the influence that the addition of a given alloy element generates in the final state of the residual stresses. The results showed that the behavior of the residual stresses was heterogeneous and that the addition of niobium and phosphorus tends to generate a state of compressive stresses in the deformed material, which would be beneficial to it.

Keywords: IF steel; titanium; niobium, phosphorus; rolling; residual stress;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Microestrutura de grão grosseiro de amostra de Aço-IF estudada por SUHARTO e GUN (2012).....	4
Figura 2 - Relação entre o Ti em excesso e as propriedades mecânicas de aço IF-Ti por PRADHAN (1996), modificado.....	5
Figura 3 - Efeito do teor de carbono nas propriedades mecânicas do aço estabilizado com Ti e Ti/Nb por PRADHAN (1996), modificado.....	6
Figura 4 - Relações geométricas na laminação de planos por HELMAN e CETLIN (2005)....	8
Figura 5 - Efeito do nível de encruamento no alongamento e no limite de escoamento de aço IF-Ti/Nb (ABE <i>et al.</i> , 1970).....	9
Figura 6 - Variação da tensão limite de Escoamento da amostra por OLIVEIRA (2010).....	10
Figura 7- Variação da tensão limite de resistência da amostra por OLIVEIRA (2010).....	11
Figura 8 - Variação do Alongamento Total da Amostra por OLIVEIRA (2010).....	11
Figura 9 - Micrografia do aço IF-Ti/Nb laminado à quente. Aumento de 200X. Por LOPES e AZEVEDO (2016).....	13
Figura 10 - Micrografia do aço IF-Ti/Nb laminado a frio. Aumento de 200X. Por LOPES e AZEVEDO (2016).....	13
Figura 11 - Superposição de tensões residuais realizado por WITHERS e BHADSHIA (2001).....	15
Figura 12 – Comparação entre métodos de medição de tensão residual (CAMPOS, 2012)....	16
Figura 13 – Relações interplanares e modelo esquemático na incidência e difração de raios-X (MENEZES, 2015).....	17
Figura 14 - Representação do estado plano de tensões (MENEZES, 2015).....	19
Figura 15 – Estado de tensão do material em função do declive da curva $2\theta \times \sin^2\psi$ (SOARES e REIS, 2016).....	20
Figura 16 – Chapas demarcadas IF-Ti, IF-Ti/Nb, IF-Ti/Nb/P, respectivamente.	23
Figura 17 – Amostras dos três aços cortadas pela guilhotina.....	24
Figura 18 – Curva gráfica de Temperatura / Tempo no TTAT.....	26
Figura 19 - Laminador Elétrico Modelo LE 200 - CM Indústria de Máquinas Operatrizes Ltda (MÁQUINAS COELHO, 2016).....	27
Figura 20 – Equipamento realizando a mudança nos ângulos de medição de tensão.....	28
Figura 21 – Sentido longitudinal utilizado na medição de tensões residuais.....	28
Figura 22 – Amostras aço IF pós laminação (a) IF-Ti, (b) IF-Ti/Ni e (c) IF-Ni.....	32
Figura 23 – Gráfico Tensão Residual vs Deformação verdadeira, aço IF-Ti.....	33
Figura 24 – Gráfico Tensão Residual vs Deformação verdadeira, aço IF-Ti/Nb.....	34
Figura 25 – Gráfico Tensão Residual vs Deformação verdadeira, aço IF-Ti/Nb/P.....	35
Figura 26 – Superposição dos gráficos de Gráfico Tensão Residual vs Deformação verdadeira dos três materiais.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química (% em peso) das chapas de aço IF-Ti/Nb utilizadas por LOPES e AZEVEDO (2016), modificada.....	12
Tabela 2 – Composição química (% em peso) dos aços IF utilizados	22
Tabela 3– Dimensões iniciais das amostras de IF-Ti	24
Tabela 4 - Dimensões iniciais das amostras de IF-Ti/Nb.....	25
Tabela 5 – Dimensões iniciais das amostras de IF-Ti/Nb/P.....	25
Tabela 6 - Características técnicas do equipamento (MÁQUINAS COELHO, 2016 – Modificado).....	27
Tabela 7 – Espessuras das amostras de M3A33 após cada passe.....	29
Tabela 8 – Deformação verdadeira por passe. Aço IF-Ti.....	29
Tabela 9 – Espessuras das amostras de IF-Ti/Nb após cada passe.....	30
Tabela 10 – Deformação verdadeira por passe. Aço IF-Ti/Nb.....	30
Tabela 11 – Espessuras das amostras de IF-Ti/Nb/P após cada passe	31
Tabela 12 – Deformação verdadeira por passe. Aço IF-Ti/Nb/P	31
Tabela 13 – Tensões residuais aferidas após laminação.....	33

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
Introdução.....	1
Justificativa.....	1
Objetivos.....	1
Metodologia e Trabalho Realizado	1
Capítulo 2	3
Revisão Bibliográfica	3
2.1 Aços Interstitial Free (IF)	3
2.2 Laminação	6
2.2.1 Laminação à frio.....	7
2.2.1.1 Deformação na laminação à frio.....	8
2.2.2 Laminação de Aços IF.....	9
2.3 Tensões Residuais	14
2.3.1 Tensometria por difração de raios-X.....	17
Capítulo 3	21
Materiais e Métodos	21
3.1 Material estudado	22
3.2 Preparação das amostras.....	23
3.3 Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT)	25
3.4 Laminação à Frio.....	26
3.5 Análise de Tensões Residuais por Raios-X.....	28
Capítulo 4	29
Resultados e discussão	29
4.1 Laminação do aço IF-Ti	29
4.1.1 Laminação do aço IF-Ti/Nb	30
4.1.2 Laminação do aço IF-Ti/Nb/P	31
4.2 Resultados da Análise de Tensões residuais	32
Capítulo 5	37
Conclusões.....	37
Capítulo 6	38
Sugestões para trabalhos futuros	38
Referências Bibliográficas.....	39

Capítulo 1

Introdução

Os aços IF (*Interstitial Free*) apresentam reduzido percentual de elementos intersticiais em solução sólida, além de baixo teor de carbono em sua composição, obtendo assim uma boa plasticidade, porém com baixa resistência mecânica (FIETO, 2013).

As aplicações deste material se caracterizam como alto rigor dimensional e aferem uma considerável redução de peso estrutural. Com o foco na manutenção da competitividade e na redução de custos, os estudos de tensões residuais provenientes de processos termomecânicos acerca da obtenção destes aços se veem de grande importância para a indústria automobilística e de embalagens (SARDINHA, 2012)..

Justificativa

Componentes mecânicos são muito influenciados pelas deformações plásticas que ocorrem durante seu processamento. Em particular os aços *Interstitial Free* (IF), amplamente utilizados na indústria automobilística, tem suas tensões residuais geradas durante a laminação como grande importância na conformabilidade posterior desse material, podendo estas serem benéficas ou deletérias.

Objetivos

Esse trabalho tem como principal objetivo caracterizar o comportamento das tensões residuais em materiais submetidos a diferentes níveis de deformação e tentar obter um padrão desse comportamento. Complementarmente espera-se evidenciar se a modificação da composição química de uma mesma classe de material influencia de forma significativa no comportamento das tensões residuais. Por esta razão, serão analisados três aços IF com diferentes composições químicas.

Metodologia e Trabalho Realizado

Neste trabalho, foram analisadas três chapas de diferentes aços IF conforme as deformações geradas na laminação à frio. Uma delas estabilizada ao titânio; outra ao titânio e nióbio e uma terceira contendo titânio, nióbio e fósforo. Um estudo comparativo quanto as

tensões residuais em relação à deformação verdadeira pós laminação foi realizado através de tensometria por difração de raios-X, sendo as amostras previamente tratadas termicamente objetivando o seu alívio de tensões.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Aços Interstitial Free (IF)

Os aços *Interstitial Free* (livres de intersticiais) tem como o foco de sua aplicação na indústria automobilística, componentes eletrônicos e embalagens. A constante pesquisa por melhores propriedades mecânicas, além da redução do custo de fabricação e aumento da competitividade no mercado, fez com que a indústria buscasse produzir aços com maior refino tanto microestrutural quanto acabamento superficial (melhores textura e rugosidade) o que gerou a procura pelos aços livres de intersticiais (SARDINHA, 2012).

Nos anos 70, os primeiros aços IF eram produzidos através de refino com um teor de C em torno de 50 a 100 ppm e teor de N de 40 a 80 ppm, valores relativamente elevados dada a quantidade de elementos microligantes utilizados para estabilizar a matriz, acarretando em uma produção destes aços relativamente cara. Atualmente, como os avanços tecnológicos, os índices de C e N ficam na ordem de 30 ppm e 40 ppm, respectivamente (OLIVEIRA, 2010). Por meio do uso de equipamentos mais modernos de desgaseificação à vácuo, a remoção de carbono na composição passou a ser feita através do oxigênio, sendo este injetado em um conversor. Desta forma, a produção das ligas sem intersticiais foi facilitada e, a partir de 1979, foram substituindo em suas aplicações os aços de baixo carbono acalmados ao alumínio (LOPES e AZEVEDO, 2016).

Os aços IF se caracterizam pela estabilização de sua matriz ferrítica com adição de dois elementos de liga: o titânio e/ou nióbio (Figura 1) obtendo-se, desta forma, baixos níveis de C e N (de 0,005 % a 0,010 %) intersticiais em solução sólida, formando-se carbonetos e nitretos respectivamente (SARDINHA, 2012). O resultado desta estabilização confere ao aço uma maior ductilidade e baixo limite de escoamento proporcionando uma conformabilidade maior do que os aços baixo-carbono convencionais (STRUGALA *et al*, 1992).

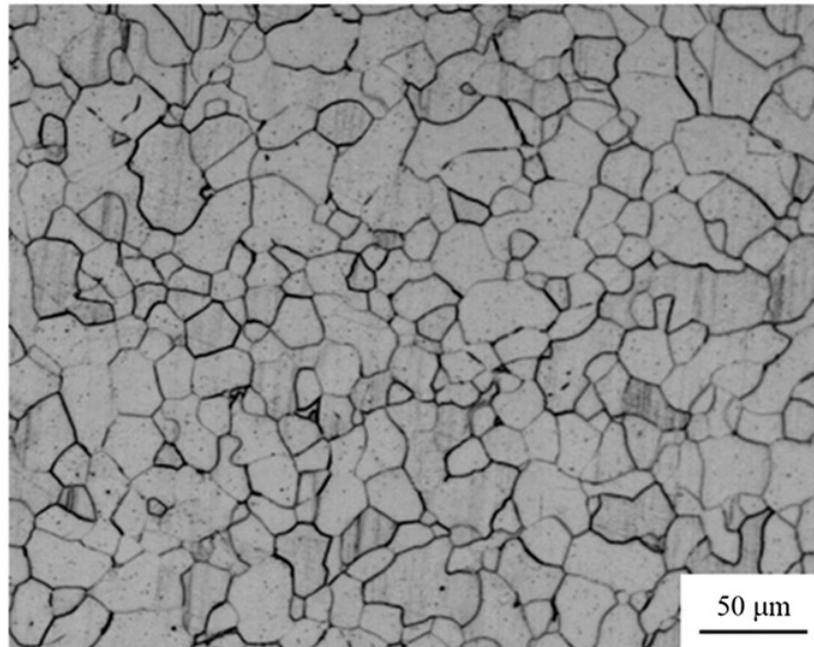


Figura 1 - Microestrutura de grão grosseiro de amostra de Aço-IF estudada por SUHARTO e GUN (2012).

Com relação aos elementos de liga presentes nos aços IF, o titânio tem como função a remoção de intersticiais nas ligas de aço IF, formando finos precipitados ao se combinar com o S e o N em preferência ao C, assim, se obtém mais nitretos de titânio (TiN), sulfetos de nitrogênio (TiS), além do composto $Ti_4C_2S_2$, segundo STRUGALA *et al* (1992). Segundo o estudo de PRADHAN (1996), a estabilização do aço IF-Ti precisa ser controlada de forma que não se ultrapasse 0,04% de titânio em sua composição, posto que quantidades superiores a esta conferem menores limites de resistência e menores limites de escoamento, conforme apresenta a Figura 2.

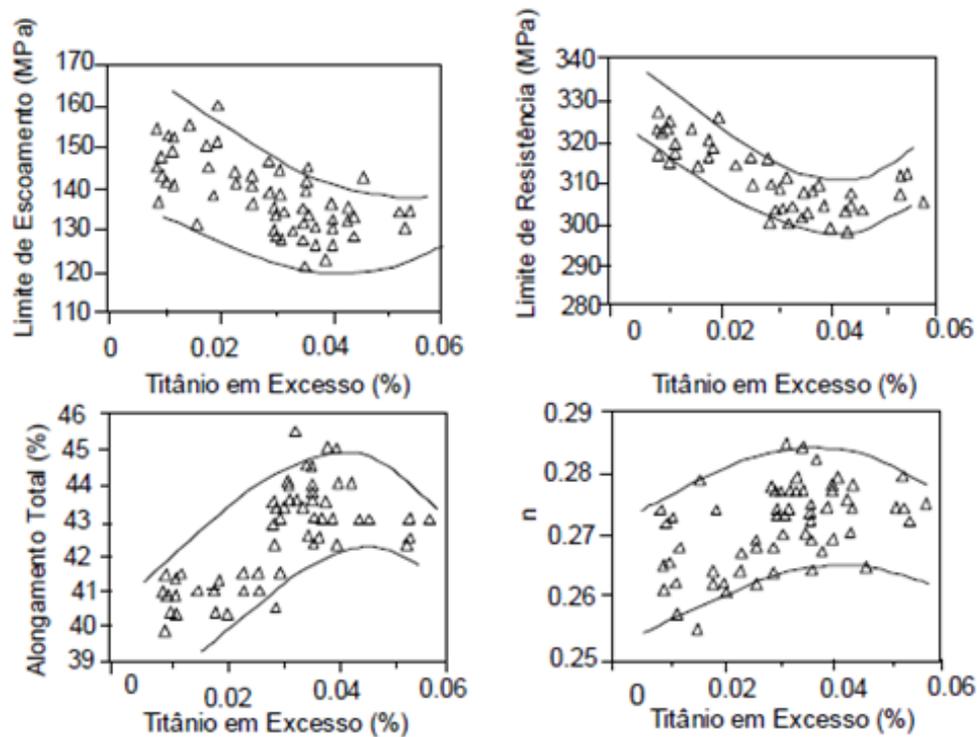


Figura 2 - Relação entre o Ti em excesso e as propriedades mecânicas de aço IF-Ti por PRADHAN (1996), modificado.

A adição de nióbio nos aços IF-Nb tem como função a formação de Carbonetos de nióbio (NbC), fazendo com que o N se combine com o Al, formando Nitretos de Alumínio (AlN) e, por sua vez, o S se combine com Mn (Sulfeto de Manganês, MnS), reduzindo os intersticiais precipitados em solução sólida.

Para os aços IF-Nb/Ti, se observam comportamentos diferentes de acordo com a quantidade relativa entre os dois estabilizadores. Quando a porcentagem de nióbio supera a de titânio, temos a formação de carbonetos de nióbio (NbC), enquanto o Ti reage com o N (TiN) e o S (TiS). Já a estabilização com maior teor de titânio na liga confere-se que o titânio combina-se com N (TiN), S (TiS) e C ($\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$ e TiC), enquanto resta o nióbio em solução sólida conferindo, assim, um maior refino de grão, segundo SARDINHA (2012).

A porcentagem de C presente na composição possui pouco efeito nas propriedades mecânicas do aço IF-Ti, entretanto, um baixo teor de carbono acarreta em um maior alongamento e anisotropia, diminuindo o limite de resistência e o limite de escoamento nas ligas de aço IF-Ti/Nb, como mostra a Figura 3 (PRADHAN, 1996).

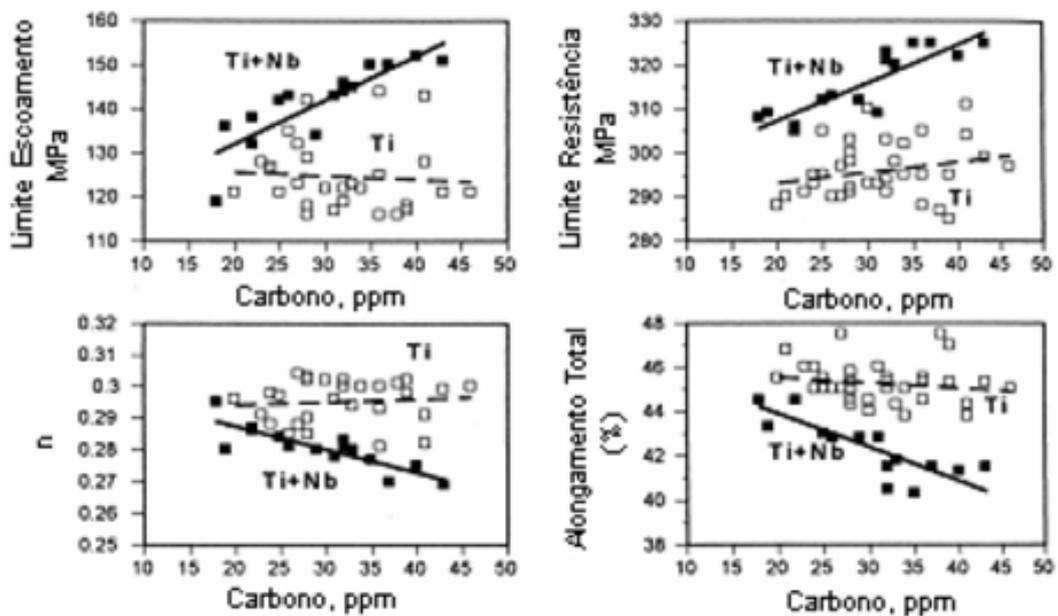


Figura 3 - Efeito do teor de carbono nas propriedades mecânicas do aço estabilizado com Ti e Ti/Nb por PRADHAN (1996), modificado.

Com o intuito de se aumentar a resistência mecânica sem grande perda na conformidade do aço IF em certas aplicações, elementos como manganês, silício e fósforo podem ser usados para provocar o seu endurecimento por solução sólida, sendo o P o mais efetivo do que Mn e Si, devido à menor degradação da estampabilidade e aos baixos custos, segundo SONG (2010). Contudo, por mais que o P seja mais efetivo que alguns elementos no aumento da resistência mecânica, busca-se atingir o mínimo teor do mesmo, pois esse elemento pode levar ao fenômeno de fragilização à frio, além da formação dos precipitados FeTiP ou FeNbP, podendo estes ser deletérios para a textura quando não controlados (BHATTACHARYA, 2011). Desta forma, a presença de teores de P até 0,1% é favorável à estampabilidade e, quando este elemento é adicionado, o aço recebe a denominação de refosforado (GORNI 2009).

2.2 Laminação

Nos processos de fabricação em que têm por base o controle da deformação plástica de seu material, a laminação se destaca como opção para redução da área de uma seção transversal de placas e chapas. O processo apresenta um bom controle dimensional e produtividade devido à sua continuidade, além de ampla aplicação na indústria metalúrgica. Tal processo consiste na introdução de material por entre dois ou mais cilindros acionados por

motor, podendo estes serem simétricos ou assimétricos e de variados diâmetros de acordo com a principal função do laminador (HELMAN e CETLIN, 2005).

O material é submetido a tensões compressivas altas, resultantes da ação de prensagem dos rolos e às tensões cisalhantes superficiais, resultantes da fricção entre os rolos e o material (DIETER, 1981). Os produtos obtidos por laminação são classificados em planos (chapas, tiras, etc) e não-planos (barras, cantoneiras, trilhos). A laminação é usualmente executada à quente, quando se trata de aços, seguida de uma laminação a frio dependendo da geometria do material, procedimento mais utilizado no processo de fabricação de chapas finas, segundo HELMAN e CETLIN (2005).

2.2.1 Laminação à frio

O uso da laminação a frio tem como objetivo produzir folhas e tiras com bom acabamento superficial (através do controle de rugosidade dos cilindros e força de laminação) e com tolerâncias dimensionais mais precisas quando comparadas com as tiras produzidas por laminação à quente, sendo que esta por sua vez tem função primária de desbaste de materiais metálicos (HELMAN e CETLIN, 2005).

O encruamento resultante da laminação à frio confere uma maior resistência mecânica e dureza ao produto final, sendo este utilizado usualmente como passe final de uma ou mais prévias laminações à quente em série. Normalmente, se é feito uma redução de área menor no último passe para se garantir um melhor acabamento superficial e se ter um maior controle dimensional. Tal passe também é chamado de *Skin Pass Mill* ou *Temper Rolling* (passe de encruamento), segundo OLIVEIRA (2010).

Na laminação à frio, algumas condições são fixadas como de maior importância para o resultado final de encruamento do material, como: grau e taxa de deformação, tamanho de grão e qualidade do aço, além do atrito existente pela textura superficial do cilindro, textura do material e o uso de lubrificantes no processo de laminação (DIETER, 1981).

2.2.1.1 Deformação na laminação à frio

Conforme em DIETER (1981), o autor enaltece que as curvas tensão-deformação de engenharia não apresentariam uma informação real das características de deformação do material, visto que as mesmas se baseiam apenas nas dimensões originais das amostras/corpos de prova, sendo que estas são alteradas ao decorrer do ensaio. Para a laminação, além da amostra sofrer alteração em sua espessura ‘h’, seu comprimento ‘L’ é significativamente alterado e sua largura ‘W’ pode sofrer alguma variação. As relações geométricas na laminação, tanto na peça, quanto no rolo são demonstradas na figura 4, por HELMAN e CETLIN (2005).

Desta forma, seriam necessárias medidas de tensão e deformação que acompanhassem essa alteração dimensional a cada instante para a deformação plástica, diferentemente da elástica, posto que as variações dimensionais seriam pequenas nesta última (DIETER, 1981). Assim, o autor correlaciona a deformação linear convencional (ε) descrita na equação (1) e a deformação verdadeira (ε_t) expressa pela equação (2), adaptadas para redução de espessura na laminação.

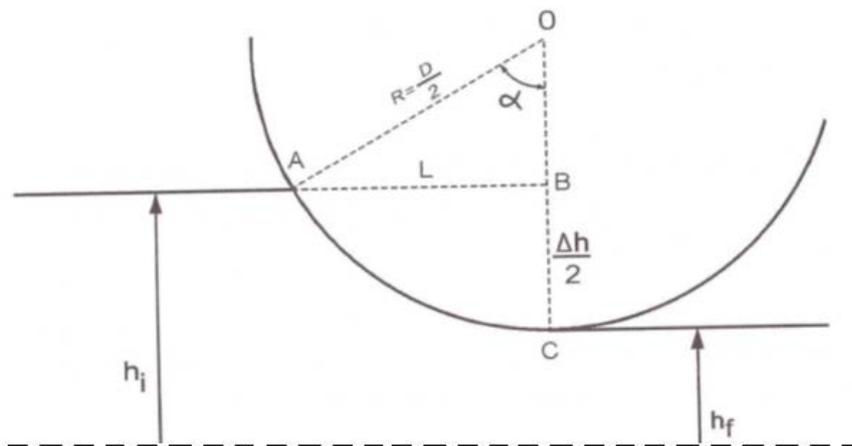


Figura 4 - Relações geométricas na laminação de planos por HELMAN e CETLIN (2005).

Deformação na laminação (ε)

$$\varepsilon = \frac{h_i - h_f}{h_i} \quad \text{Equação (1)}$$

Deformação verdadeira na laminação (ε_t)

$$\varepsilon_t = -\ln(1 - \varepsilon) \quad \text{Equação (2)}$$

2.2.2 Laminação de Aços IF

Por conta da sua excelente conformabilidade, qualidade superficial e alta precisão dimensional, a laminação de aços IF à frio tem extensa aplicação na confecção de partes da lataria/carroceria de veículos, em sua grande maioria. O progresso da indústria automobilística tem como vital o processo de laminação à frio de chapas de aço, sendo este um dos seus principais produtos. Como ao longo dos anos as partes de automóveis tem se tornado maiores e mais complexas em termos de design, a opção do uso de laminação e estampagem como métodos de conformação de material tem sido mais recorrente devido a redução de uniões soldadas, redução no peso da estrutura geral e prevenção de corrosão em uniões (ABE *et al*, 1970).

ABE et al (1970) estudaram o comportamento mecânico de um aço IF-Ti/Nb na condição inicial recozido a 850 °C com composição química dada por: C=0,0025%, Ti=0,030% e Nb=0,006%, quando submetido a diferentes níveis de encruamento (Figura 5).

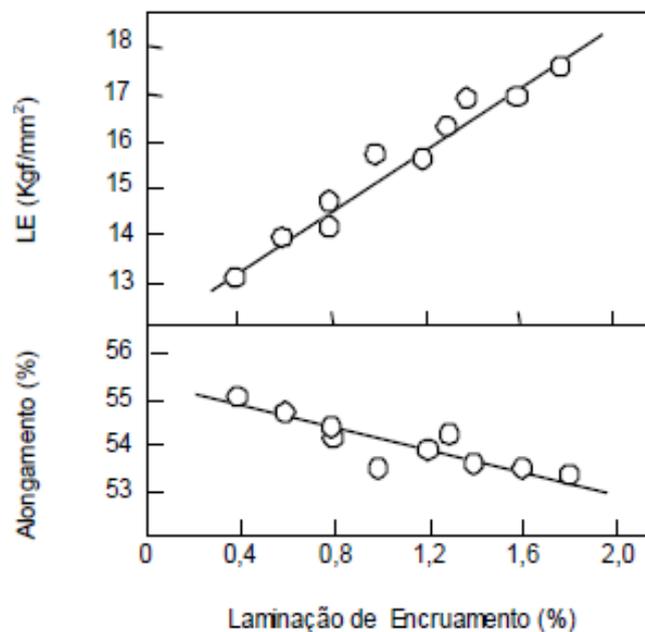


Figura 5 - Efeito do nível de encruamento no alongamento e no limite de escoamento de aço IF-Ti/Nb (ABE *et al*, 1970).

Após a laminação do aço IF-Ti/Nb, se conferiu um maior limite de escoamento e menor alongamento conforme os passes à frio foram sendo feitos, sendo posteriormente

comparados com outras concentrações de elementos de liga para maximizar as propriedades desejadas para posterior estampagem (ABE *et al*, 1970).

Um estudo realizado por OLIVEIRA (2010) se aprofunda em como o encruamento de aços IF confere diferentes propriedades mecânicas, influenciadas pela laminação a frio. O autor comenta também que se utiliza muito o processo de laminação para a adequação de aços IF para estampagem de maneira controlada. Com relação aos efeitos de laminação, foi concluído que ocorre uma diminuição do alongamento total do aço IF, assim como um aumento no limite de escoamento, de forma geral.

A chapa de aço IF-Ti utilizado por OLIVEIRA (2010) em sua análise foi rebobinado em laminação à frio com reduções contantes de 0,2% em cada passe. Desta forma, o autor obteve um resultado mais preciso para coleta de dados. As figuras 7, 8 e 9 mostram os resultados de ensaios de tração obtidos pós rebobinamento da chapa realizado pelo autor, sendo cada uma destas bobinas nomeadas por BPE, BRE02, BRE04, BRE08 e BRE10 em cada coleta de dados, desta forma, se obteve uma laminação mais controlada e uma maior confiabilidade nos testes.

Pode-se notar um aumento no limite de escoamento dada a conjunta variação do grau de deformação na relaminação de encruamento do Aço IF-Ti na Figura 6, confirmando o estudo de ABE *et al* (1970).

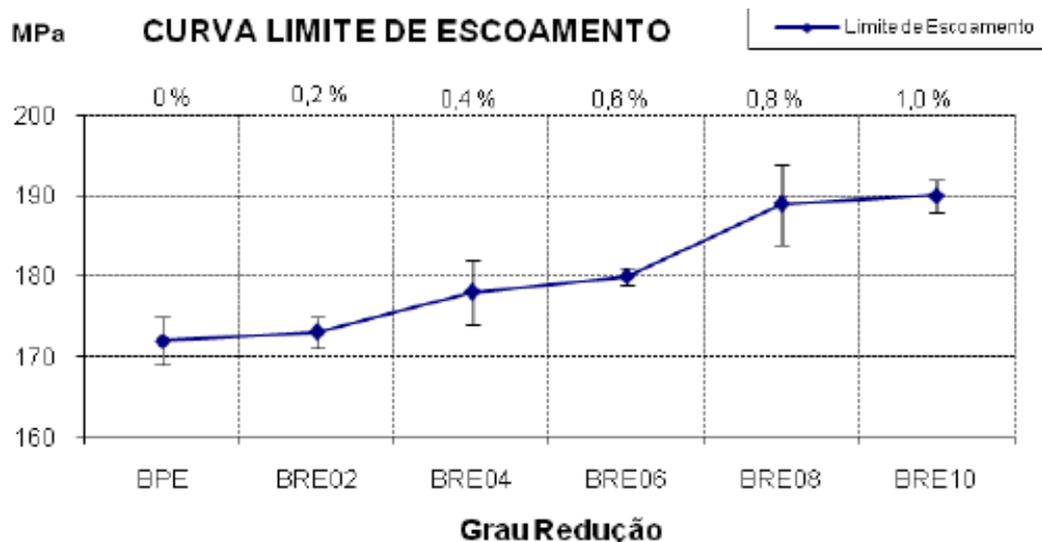


Figura 6 - Variação da tensão limite de Escoamento da amostra por OLIVEIRA (2010)

A variação do limite de resistência conferida na Figura 7 também acompanha os estudos prévios, sendo este aumentado de acordo com a deformação do material estudado

pelo autor. A baixa concentração ou ausência de elementos intersticiais em solução sólida no Aço IF-Ti acarreta no aumento do limite de resistência com a elevação do grau de deformação na relaminação à frio. OLIVEIRA (2010) comenta que tal relação é reflexo exclusivo da elevação da densidade de discordância que, aos interagirem entre si, provocam o endurecimento do material.

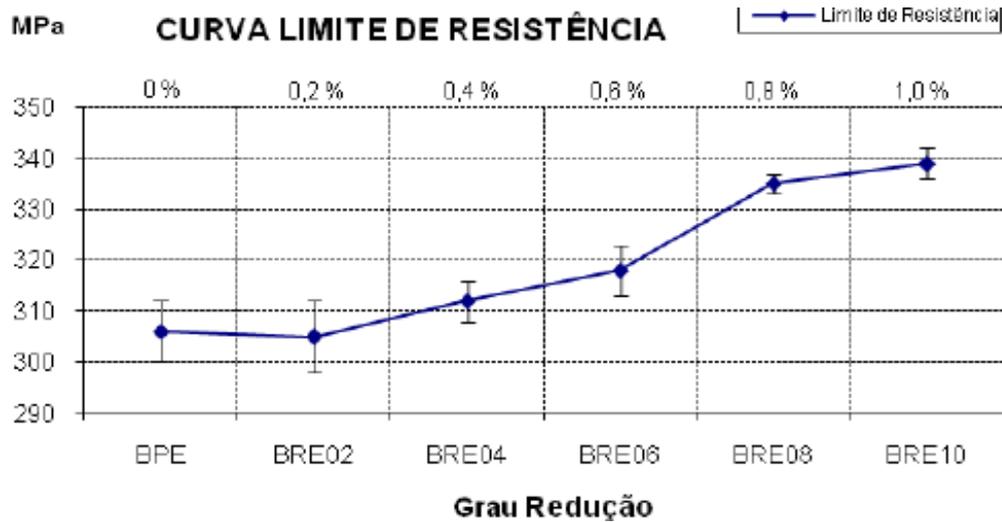


Figura 7- Variação da tensão limite de resistência da amostra por OLIVEIRA (2010)

Conforme os dados expressos na Figura 8, Mesmo com o grau de redução se elevando, não houve decréscimo significativo de alongamento total, significando que o mesmo varia pouco com relação a pequenas deformações, além do experimento ter sido feito em escala industrial, segundo o autor, fazendo com que este seja de maior precisão e confiabilidade

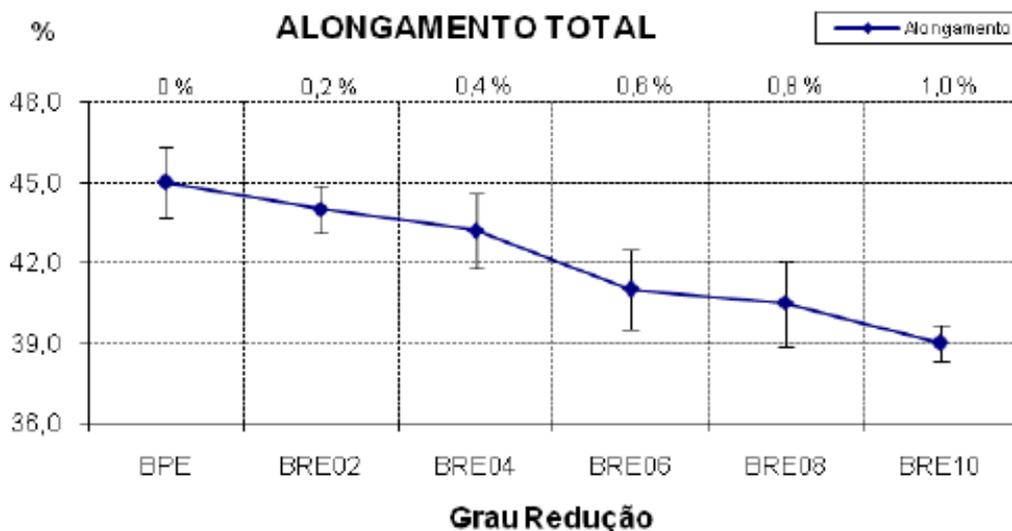


Figura 8 - Variação do Alongamento Total da Amostra por OLIVEIRA (2010)

LOPES e AZEVEDO (2016) realizaram uma análise sobre uma chapa de aço IF estabilizado ao nióbio e titânio pelo qual foi submetido a processos termo-mecânicos e avaliado quanto aos efeitos na microestrutura e às propriedades mecânicas da mesma após tais tratamentos com ênfase na capacidade de embutimento profundo e estampagem. A composição química das chapas previamente laminadas à quente é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1- Composição química (% em peso) das chapas de aço IF-Ti/Nb utilizadas por LOPES e AZEVEDO (2016), modificada.

C	Mn	P	S	Al	N	Nb	Ti
0,002	0,17	0,01	0,01	0,031	0,0032	0,02	0,011

As amostras foram introduzidas, mantendo-se uma constante direção de laminação, em um laminador reversível e, através de uma sequência de passes, se chegou à 80-85% da espessura inicial da chapa de aço IF-Ti/Nb, ou seja, aproximadamente 1 milímetro de espessura. Após a laminação controlada, foi realizado um tratamento térmico de recozimento em torno de 850°C, para a recuperação, recristalização, e crescimento de grãos, objetivando a finalidade teórica de melhorar suas propriedades mecânicas para estampagem e para a realização dos ensaios de dureza e de tração com os devidos corpos de prova.

A figura 9 ilustra a micrografia do aço IF-Ti/Nb na forma como foi pós prévia laminação à quente. Tal microestrutura demonstra dissolução completa dos carbonitretos de micro ligantes devido à presença do Ti e do Nb presentes.

O aumento na dureza pós laminação à frio foi quantificado em 195 HV, comparado à dureza inicial de 107 HV do aço IF-Ti/Nb recebido pós laminação à quente, condizente com o que era esperado como resultado do encruamento. Já os ensaios de tração também realizados por LOPES e AZEVEDO (2016) conferiram um alongamento de 40,5% e tensão limite de escoamento de 219,4 MPa e resistência mecânica de 352,1 Mpa, valores superiores aos analisados pelo autor em relação ao estado anterior a laminação à frio.

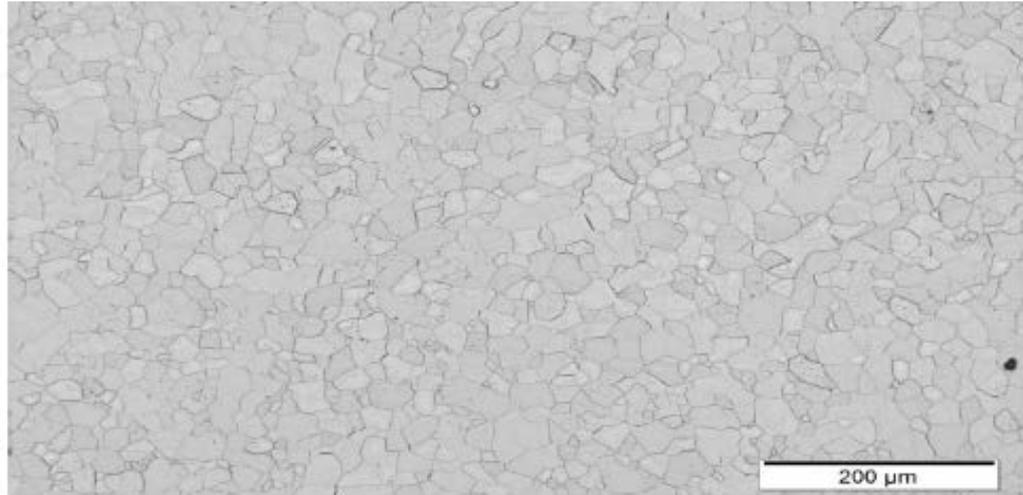


Figura 9 - Micrografia do aço IF-Ti/Nb laminado à quente. Aumento de 200X. Por LOPES e AZEVEDO (2016).

A figura 10 compreende a micrografia do mesmo aço IF-Ti/Nb após a laminação à frio, onde se percebe o alongamento dos grãos na direção de laminação, assim conferindo um aumento de resistência mecânica do mesmo e aumento da dureza devido ao encruamento do material.

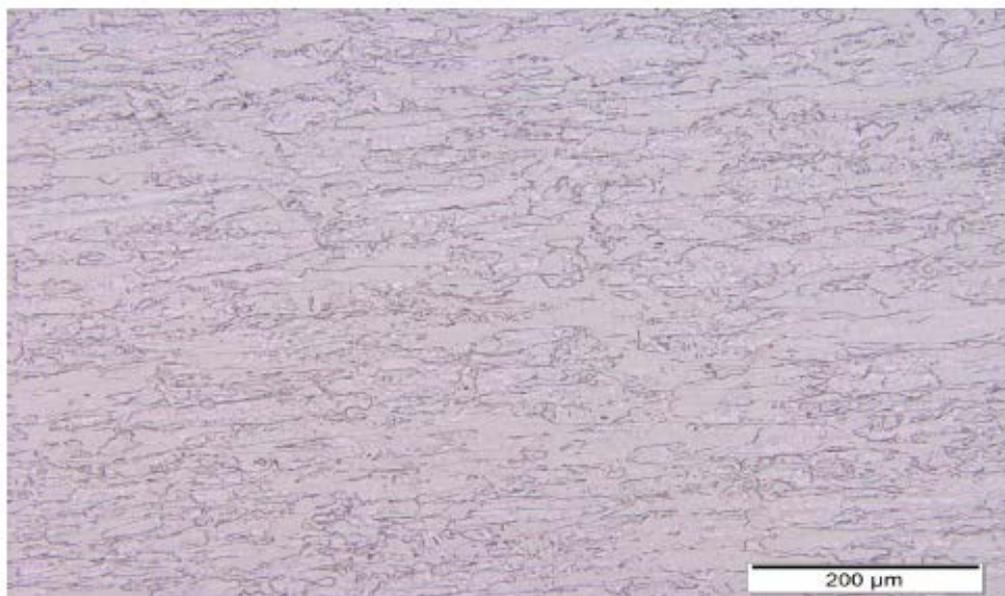


Figura 10 - Micrografia do aço IF-Ti/Nb laminado a frio. Aumento de 200X. Por LOPES e AZEVEDO (2016).

2.3 Tensões Residuais

Tensões residuais são caracterizadas como as tensões remanescentes em equilíbrio oriundas de processos termomecânicos ocorridos previamente em peças ou materiais, sem estes estarem mais submetidos a qualquer carregamento externo ou gradiente de temperatura (NORCINO, 2013). Tais tensões podem ter origem por processamento mecânico, sendo estas deformações plásticas sofridas pelo material; como também podem ter origem térmica, sendo estes tratamentos térmicos, tensões oriundas de processos de soldagem, entre outras mudanças de forma e propriedades do material.

Desta forma, a classificação das tensões residuais no material se dá entre três tipos, sendo estes de acordo com sua área de abrangência (KANDIL *et al*, 2001; MENEZES, 2015):

- Tipo I – Tensões residuais de nível macroscópico; representando as tensões residuais em escala maior que a do tamanho de grão do material analisado, ocorrem por exemplo geralmente em processos de laminação (onde se excede o limite elástico do material), gradientes térmicos, e têmpera em aço.

- Tipo II – Tensões residuais de nível microscópico; sendo estas as tensões residuais desenvolvidas dentro da escala de um grão; esperado entre fases de materiais multifásicos e monofásicos com devido grau de anisotropia; ocorre entre fases e precipitados e matriz.

- Tipo III – Tensões residuais de nível supermicroscópico; são tensões residuais que ocorrem dentro dos grãos, classificados como defeitos na estrutura cristalográfica do material, vazios, impurezas e falhas de empilhamento. Normalmente aparecem acompanhadas das tensões tipo II.

A Figura 11 ilustra o estado total de tensões, composto como uma superposição de cada categoria de tensão residual analisada no material, podendo estas serem do tipo I, II e III simultaneamente em determinado ponto ou região.

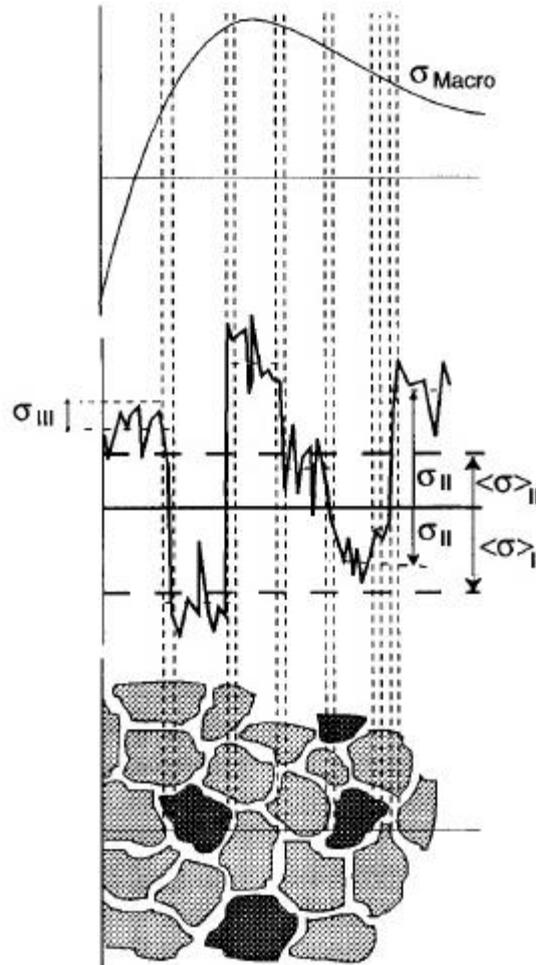


Figura 11 - Superposição de tensões residuais realizado por WITHERS e BHADESHIA (2001)

A natureza das tensões residuais podem ser aferidas como trativas ou compressivas sendo estas quantificações importantes para determinação se as mesmas seriam deletérias ou benéficas ao estado total de tensões (KANDIL *et al*, 2001).

Da mesma forma que as tensões residuais trativas podem ser negativas para a estrutura quando somadas à tensão de serviço, algumas tensões podem ser consideradas benéficas por atuar no mesmo plano de tensão aplicada, entretanto, com seu sentido oposto, sendo estas compressivas desejadas após um estudo de superposição de tensões .(KANDIL *et al*, 2001; CAMPOS, 2012).

Para análise de tensões residuais, pode-se utilizar métodos de ensaio conforme três categorias: ensaios destrutivos e não-destrutivos, sendo esta classificação variável de acordo com o dano sofrido pelo material para a quantificação de dados experientais. A escolha de cada método difere de acordo com a profundidade a se analisar da amostra, sendo estes:

- Métodos Destrutivos: realizados através da alteração dimensional total ou parcial da amostra, comprometendo o uso da amostra utilizada; como método do furo cego; método do furo incremental; método da remoção de camadas e o método da amostragem;

-Métodos não-destrutivos: De forma a não danificar a amostra nem as propriedades do material, como método de difração de raios-X; método magnético; método de difração de nêutrons e o método de ultrassom. (SOARES e REIS, 2016).

A figura 12 correlaciona a profundidade de análise com o método mais utilizado para aferição de tensões residuais (CAMPOS, 2012).

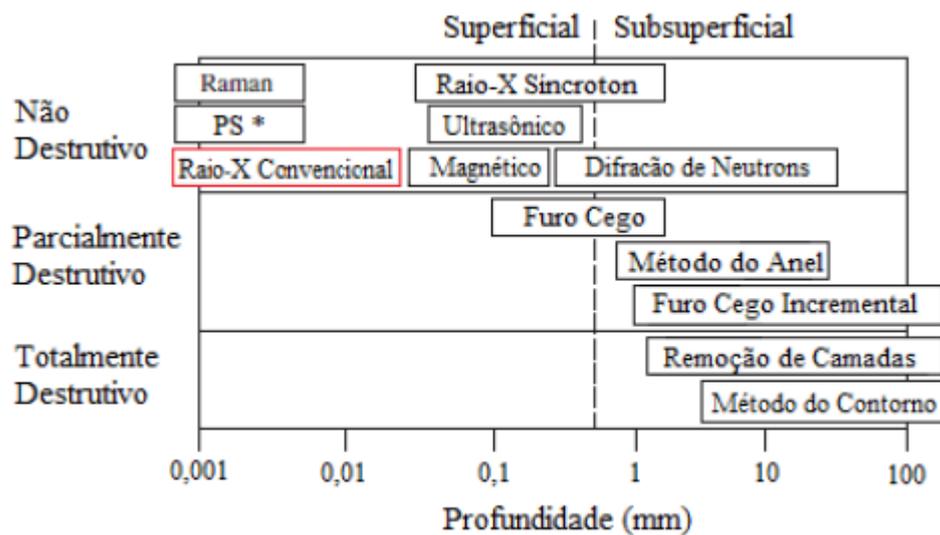


Figura 12 – Comparação entre métodos de medição de tensão residual (CAMPOS, 2012)

2.3.1 Tensometria por difração de raios-X

Como técnica experimental superficial, a tensometria por difração de raios-X se encontra como uma das mais utilizadas para análise de tensões residuais de forma não-destrutiva. Os materiais cristalinos podem atuar como uma rede de difração, assim, os padrões de difração proporcionam as informações necessárias à análise de tensões residuais (KANDIL *et al*, 2001), sendo esta realizada pela obtenção da razão da variação da distância interplanar pela distância livre de deformação plástica do material policristalino (SOARES e REIS, 2016).

Para que a reflexão dos raios X sobre os planos cristalinos obtenha um resultado construtivo ao estudo, é necessário que haja uma conversão desta variação de distância em tensão (SOARES e REIS, 2016), sendo esta primeira inicialmente medida conforme a Lei de Bragg, expressa como a equação (3), onde ' λ ' é dado como o comprimento de onda constante e monocromático de raios X paralelos e incidentes no material com um ângulo de incidência ' θ ' e com ' d ' sendo a distância interplanar, sendo esta última relação melhor descrita na figura 13 (MENEZES, 2015).

Lei de Bragg :

$$n\lambda = 2d \cdot \text{sen } \theta \quad \text{Equação (3)}$$

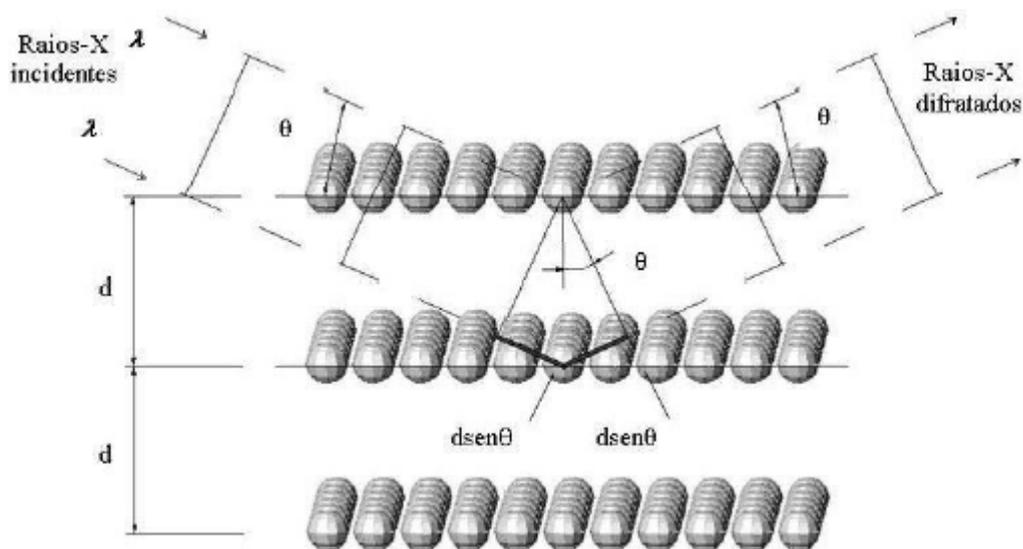


Figura 13 – Relações interplanares e modelo esquemático na incidência e difração de raios-X (MENEZES, 2015).

Quando um material se encontra sob tensão trativa ou compressiva, ocorre uma variação da distância interplanar ' Δd ' acarretando em uma variação do ângulo de difração $\Delta 2\theta$ (BOECHAT, 2016). Ao se diferenciar a equação da Lei de Bragg descrita na equação 3, obtém-se a equação 4, que pode ser correlacionada com a deformação ' ε ':

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} = -\Delta\theta \cdot \cot g \theta \quad \text{Equação (4)}$$

Desta forma, pela Lei de Hooke em teoria da elasticidade dos materiais sólidos, tem-se para o estado triaxial as seguintes relações entre tensão e deformação, nas equações 6, 7, e 8 (MENEZES, 2015):

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)}{E} \quad \text{Equação (6)}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \nu \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{E} \quad \text{Equação (7)}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E} - \nu \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{E} \quad \text{Equação (8)}$$

Onde ' σ_1 ', ' σ_2 ' e ' σ_3 ' representam as tensões principais; assim como ' ε_1 , ε_2 , ε_3 ' representam as deformações principais; sendo ' E ' o Módulo de elasticidade do material e ' ν ' o coeficiente de Poisson.

Desta forma, a adequação do modelo do estado plano de tensões ao se utilizar coordenadas polares fica representado conforme a figura 14 e a equação (9), sendo ' φ ' como ângulo azimutal e ' Ψ ' o ângulo polar.

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = (\sigma_1 \cdot \cos^2 \varphi + \sigma_2 \cdot \sin^2 \varphi) \sin^2 \Psi - \nu \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{E} \quad \text{Equação (9)}$$

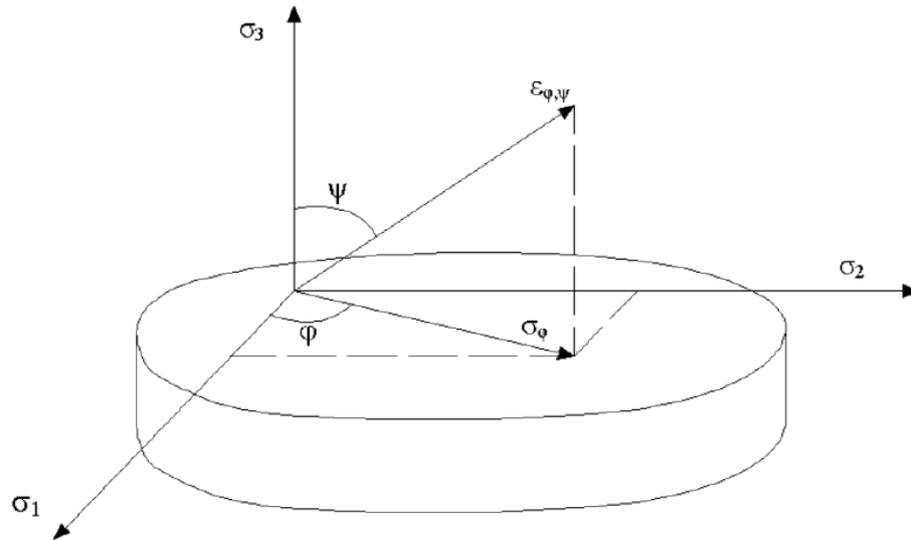


Figura 14 - Representação do estado plano de tensões (MENEZES, 2015)

Sendo assim, a tensão na direção perpendicular à superfície (σ_3) dada como nula, sendo que esta é uma medição superficial, portanto, a equação de deformação na direção (φ, Ψ) pode ser descrita conforme a equação (10), relacionando-a com a tensão superficial em qualquer direção definida pelo ângulo Ψ e com as tensões principais existentes (BOECHAT, 2016):

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \frac{(1 + \nu)}{E} \sigma_{\varphi} \cdot \text{sen}^2 \Psi - \nu \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{E} \quad \text{Equação 10}$$

Finalmente, o cálculo da tensão (σ_{φ}) é determinado pela equação (11):

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1 + \mu)} \cdot \text{cotg } \theta_o \cdot \frac{(\theta_{\varphi, \psi_2} - \theta_{\varphi, \psi_1})}{(\text{sen}^2 \Psi_2 - \text{sen}^2 \Psi_1)} \quad \text{Equação 11}$$

Sendo assim, a tensão residual existente no material é diretamente proporcional à derivada de 2θ em função de $\text{sen}^2 \Psi_2$, determinando-se essa derivada a partir de um método gráfico para os ângulos 2θ medidos em função de $\text{sen}^2 \Psi_2$, conforme ilustrado na figura 15 (CAMPOS, 2012).

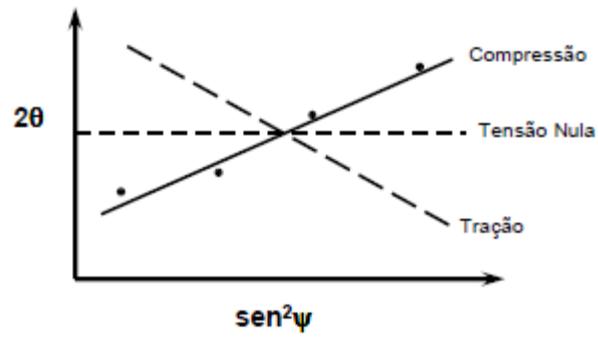
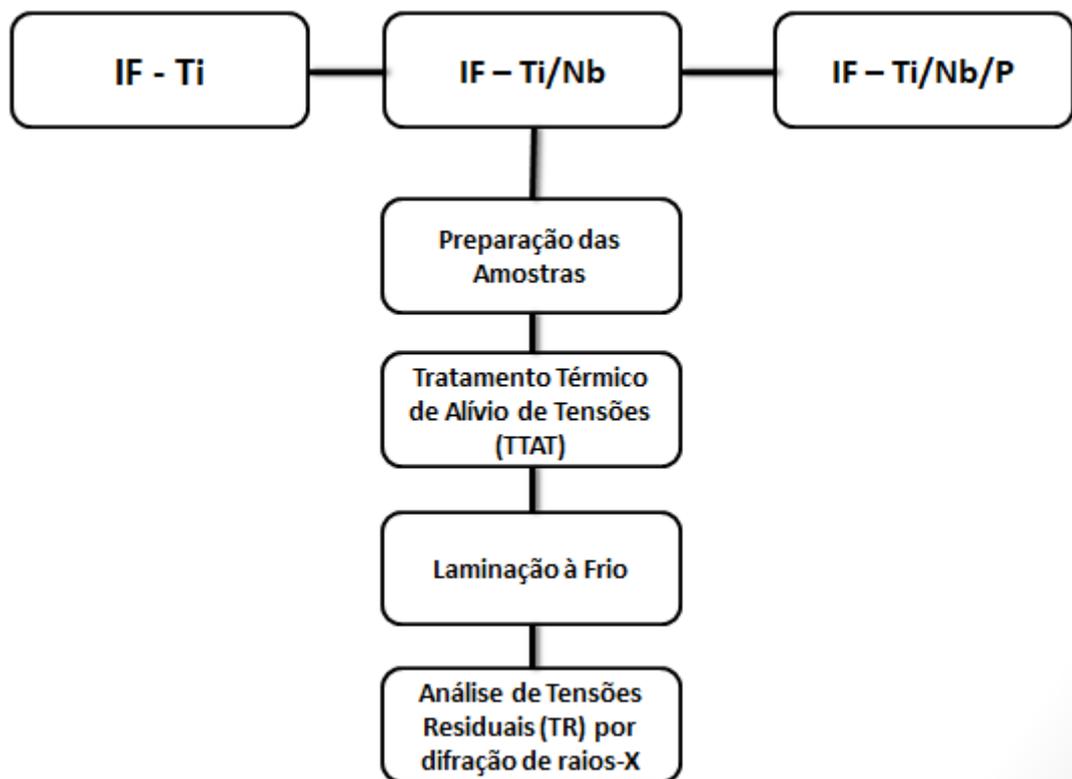


Figura 15 – Estado de tensão do material em função do declive da curva $2\theta \times \text{sen}^2\psi$ (SOARES e REIS, 2016)

Capítulo 3

Materiais e Métodos

O procedimento de análise experimental consiste basicamente as seguintes operações: preparação das amostras de diferentes aços IF; tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT); laminação à frio; medição de tensões residuais por difração de raios-x; Cada fase é contemplada neste capítulo conforme o seguinte fluxograma:



Fluxograma 1 – Procedimento de análise experimental

3.1 Material estudado

O material utilizado para estudo neste trabalho consiste em três diferentes amostras de aços IF anteriormente cedidas pela Companhia Siderúrgica do Atlântico da *ThyssenKrupp* (TKCSA), sendo uma delas estabilizada com Ti, outra com Ti+Nb e, outra com Ti+Nb+P, denominados como M3A33 (titânio), M3A61 (titânio e nióbio) e M3A71 (titânio, nióbio e fósforo), respectivamente. A composição química de cada uma das amostras de aço IF se encontra na Tabela 2, conforme já analisada por VIEIRA (2016) em um estudo de microestrutura dos aços IF.

Tabela 2 – Composição química (% em peso) dos aços IF utilizados

Composição Química (% em peso)	Aço IF-Ti (M3A33)	Aço IF-TiNb (M3A61)	Aço IF-Ti/Nb/P (M3A71)
C	0,0021	0,0022	0,0022
Mn	0,1250	0,1120	0,1750
Si	0,0180	0,0710	0,0500
P	0,0099	0,0083	0,0298
S	0,0063	0,0093	0,0071
Al	0,0346	0,0361	0,0384
Ti	0,0820	0,0700	0,0334
Nb	0,0018	0,0160	0,0288
N	0,0025	0,0038	0,0037

3.2 Preparação das amostras

Para a preparação das amostras para laminação, em cada chapa de aço IF recebida foi delimitada a marcação de corte de forma a se obter 6 amostras de dimensões razoavelmente próximas, como demonstrado na Figura 16, respeitando desta forma a orientação de laminação 0° sugerida conforme a identificação previamente gravada nas mesmas.

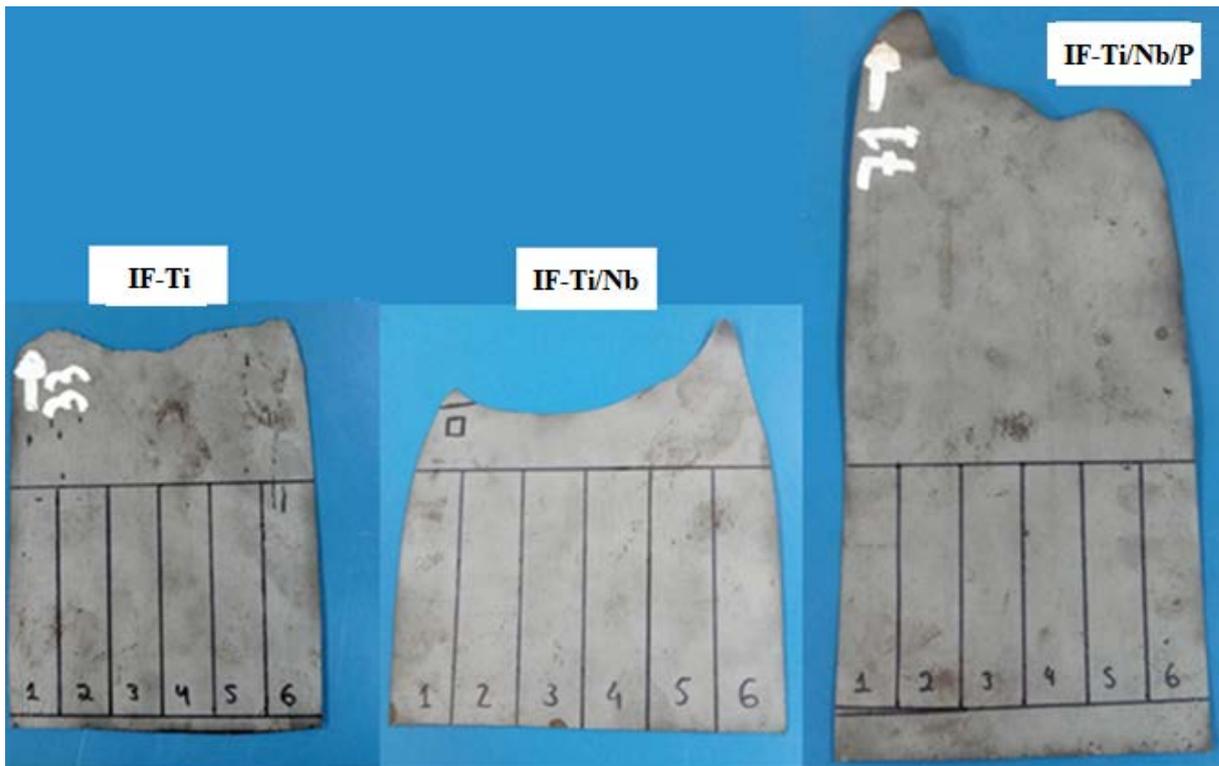


Figura 16 – Chapas demarcadas IF-Ti, IF-Ti/Nb, IF-Ti/Nb/P, respectivamente.

Foram realizados os cortes das amostras e estas foram separadas devidamente para medição utilizando-se um micrômetro digital, com o intuito de se obter as dimensões iniciais antes dos próximos passos da análise. A figura 17 ilustra em cada linha as amostras de aço IF-Ti, IF-Ti/Nb, IF-Ti/Nb/P, respectivamente após os cortes.

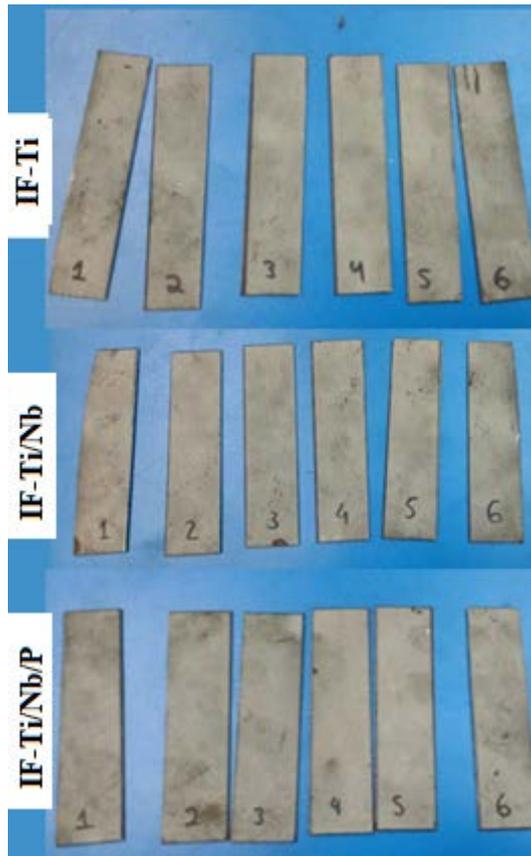


Figura 17 – Amostras dos três aços cortadas pela guilhotina

As Tabelas 3, 4 e 5 representam as dimensões iniciais de cada amostra de aço-IF pós-corte estudado. Um maior rigor de medição foi aplicado ao se quantificar a espessura ‘h’ de cada amostra, utilizando o micrômetro digital, enquanto para as medidas de comprimento ‘L’ e de largura ‘W’ se utilizou o paquímetro, posto que estas medidas não eram foco desta análise.

Tabela 3– Dimensões iniciais das amostras de IF-Ti

IF-Ti	h0 (mm)	L0 (mm)	W0 (mm)
1	1,10	100	23
2	1,16	100	22
3	1,19	100	23
4	1,18	100	23
5	1,18	100	23
6	1,15	100	23
média	1,17	100	23

Tabela 4 - Dimensões iniciais das amostras de IF-Ti/Nb

IF-Ti/Nb	h0 (mm)	L0 (mm)	W0 (mm)
1	1,31	100	23
2	1,35	100	25
3	1,33	100	25
4	1,33	100	25
5	1,33	100	25
6	1,29	100	24
média	1,33	100	25

Tabela 5 – Dimensões iniciais das amostras de IF-Ti/Nb/P

IF-Ti/Nb/P	h0 (mm)	L0 (mm)	W0 (mm)
1	1,18	101	27
2	1,21	101	27
3	1,24	101	27
4	1,24	101	26
5	1,20	101	26
6	1,16	101	27
média	1,21	101	27

3.3 Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT)

A partir de uma prévia medição de tensões por tensometria por difração de raios-X, realizado no Laboratório de Análise de Tensões (LAT) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense (UFF), em cada amostra, concluiu-se que era necessário um tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT), posto que as medidas feitas se encontravam de maneira demasiadamente heterogêneas para se dar continuidade aos próximos passes da análise.

Desta forma, as amostras foram assim levadas para o laboratório de soldagem (LASOL) do CEFET/RJ, a fim de se dar prosseguimento ao tratamento térmico. As peças aquecidas a aproximadamente 34,3 °C / min até alcançar a temperatura estabilizada de 600 °C, permanecendo nesta condição por 30 minutos (tempo de encharque), de acordo com (CAMPOS, 2012). O resfriamento foi realizado no forno. A curva temperatura / tempo do tratamento térmico realizado está representada na Figura 18.

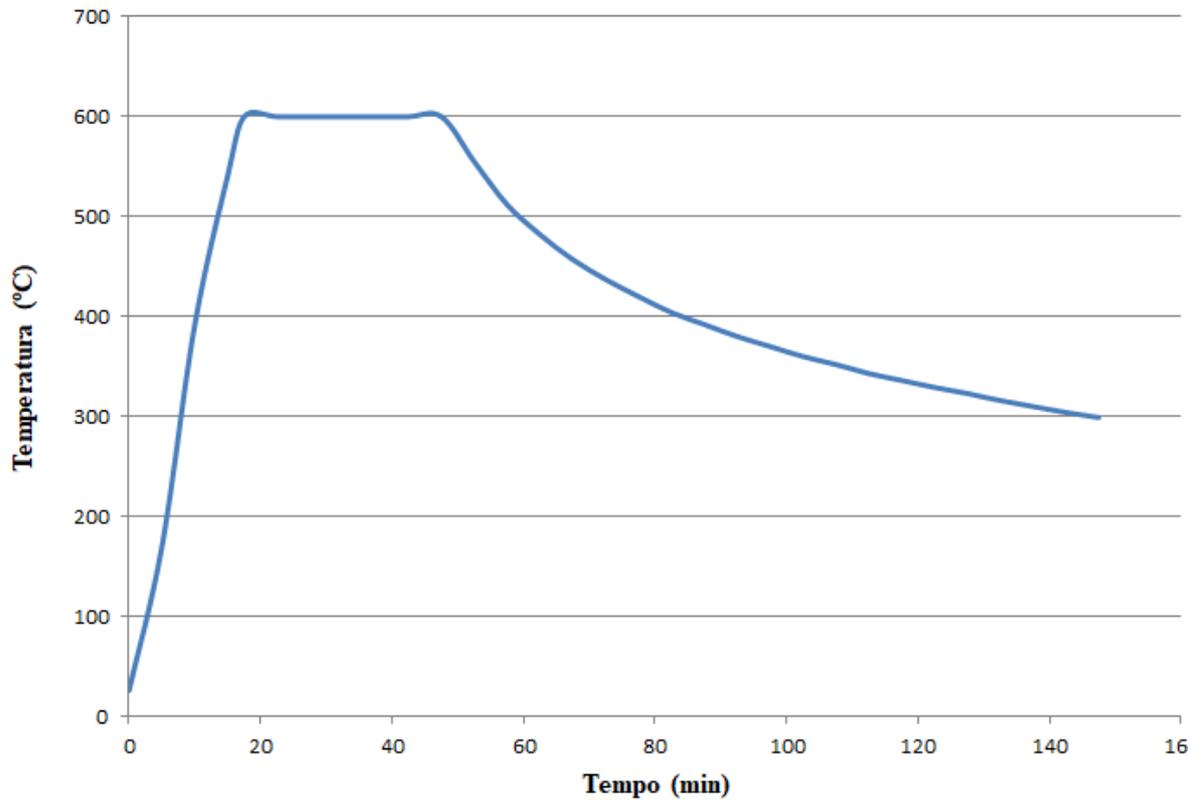


Figura 18 – Curva gráfica de Temperatura / Tempo no TTAT; Aquecimento: 34,3 °C / min

3.4 Laminação à Frio

As operações de laminação foram realizadas no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) do CEFET – RJ, utilizando um laminador para trabalho à frio do tipo duo reversível, conforme figura 19. A tabela 6 apresenta as características técnicas da máquina, que opera com um motor trifásico de 5 HP para trabalho dos dois rolos com transmissão por corrente e polia e lubrificação forçada. O equipamento contém rolos de aço VC131 temperados e retificados, inicialmente utilizado para operações de laminação de joalheria e limite de espessura de trabalho conforme a tabela do fabricante.

Tabela 6 - Características técnicas do equipamento (MÁQUINAS COELHO, 2016 – Modificado)

Diâmetro da área de trabalho do rolo	110 mm
Comprimento da área de trabalho do rolo	200 mm
Capacidade aproximada de laminação	25 a 0,1 mm
Velocidade aproximada de laminação	8 m/min
Velocidade de rotação do rolo	23 voltas/min

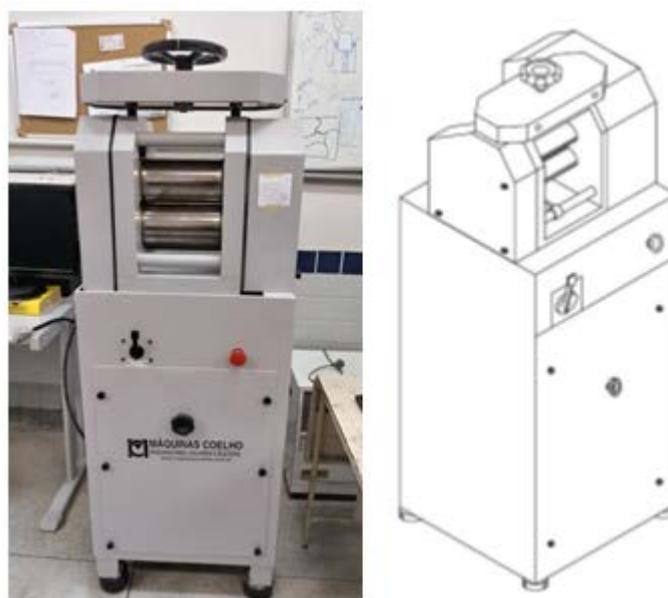


Figura 19 - Laminador Elétrico Modelo LE 200 - CM Indústria de Máquinas Operatrizes Ltda (MÁQUINAS COELHO, 2016)

Foram realizados de um a três passes nas amostras, respeitando a orientação de laminação 0° de cada chapa de material, objetivando-se uma redução uniforme de espessura em todas as amostras seguindo a medida de 0,15 mm por passe. As reduções de espessura de cada amostra foram medidas e organizadas de forma a garantir um maior reaproveitamento dos dados experimentais individualmente.

3.5 Análise de Tensões Residuais por Raios-X

As análises de tensões residuais foram feitas no Laboratório de Análise de Tensões (LAT) do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense (UFF), utilizando-se o equipamento de marca *Stresstech*, modelo Xstress 3000 (Figura 20). Os dados experimentais foram coletados a partir de um computador e software próprio do equipamento.



Figura 20 – Difratorômetro de Raios-X modelo Xstress 3000

A tensão trabalhada pela máquina foi de 20 kV; enquanto a corrente operada foi de 2mA. Com o plano cristalográfico da ferrita (211), a radiação configurada foi de $\text{CrK}\alpha$ ($\lambda=2,2809\text{\AA}$). Os ângulos Ψ utilizados na medição foram 0-20-30-35-40 graus respectivamente, com tempo de exposição de 40 segundos para cada ângulo. As medidas foram realizadas no sentido de laminação, conforme detalha a Figura 21.

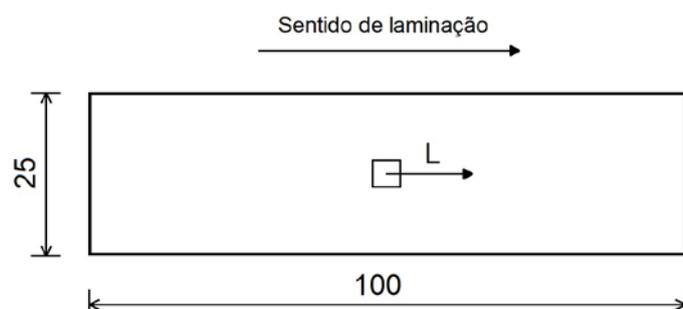


Figura 21 – Sentido longitudinal utilizado na medição de tensões residuais (unidade em milímetros).

Capítulo 4

Resultados e discussão

4.1 Laminação do aço IF-Ti

Para a laminação do aço IF-Ti (M3A33) foram realizados de um a três passes nas amostras de cerca de 0,134 mm cada passe. A amostra 1 ficou como base para análise de tensões inicial pós TTAT, enquanto amostra 2 recebeu apenas um passe de redução de espessura, amostras 3 e 4 sofreram dois passes e, finalmente, as amostras 5 e 6 passaram por três passes de redução de espessura. A redução de espessura (h_0 , h_1 , h_2 e h_3) e média são demonstradas na tabela 7.

Tabela 7 – Espessuras das amostras de M3A33 após cada passe

Amostra IF-Ti	h_0 (mm)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	h_3 (mm)
1	1,10	-	-	-
2	1,16	1,02	-	-
3	1,19	1,05	0,92	-
4	1,18	1,08	0,94	-
5	1,18	1,07	0,94	0,78
6	1,15	1,05	0,92	0,80
média	1,17	1,05	0,93	0,79

De posse dos dados obtidos, através das equações (1) e (2) obteve-se os valores de deformação verdadeira em laminação ' ϵ_t ', contidos na tabela 8 para cada amostra laminada.

Tabela 8 – Deformação verdadeira por passe. Aço IF-Ti

Deformação Verdadeira (ϵ_t)	1º passe	2º passe	3º passe	Total
1	-	-	-	-
2	0,129	-	-	0,129
3	0,125	0,132	-	0,257
4	0,089	0,139	-	0,227
5	0,098	0,130	0,187	0,414
6	0,091	0,132	0,140	0,363
média	0,106	0,133	0,163	-

4.1.1 Laminação do aço IF-Ti/Nb

Diferentemente do material anterior, a laminação das chapas de aço IF-Ti/Nb (M3A61) foi realizada por meio de três passes de cerca de 0,108 mm cada. Obteve-se a amostra de número 6 como a mais discordante das demais, então, esta se configurou como base para análise de tensões inicial pós TTAT desta vez, enquanto a amostra 1 recebeu apenas um passe de redução de espessura, as amostras 2 e 3 sofreram dois passes desta vez e as amostras 4 e 5 passaram por três passes de redução de espessura. A redução de espessura (h_0 , h_1 , h_2 e h_3) e média são demonstradas na tabela 9.

Tabela 9 – Espessuras das amostras de IF-Ti/Nb após cada passe

IF-Ti/Nb	h_0 (mm)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	h_3 (mm)
1	1,31	1,17	-	-
2	1,35	1,19	1,07	-
3	1,33	1,19	1,07	-
4	1,33	1,18	1,08	0,96
5	1,33	1,19	1,09	0,98
6	1,29	-	-	-
média	1,33	1,18	1,08	0,97

Utilizando-se da mesma metodologia do material anterior, através das equações 1 e 2 obteve-se os valores de deformação verdadeira em laminação ' ϵ_t ', contidos na tabela 10 para cada amostra laminada.

Tabela 10 – Deformação verdadeira por passe. Aço IF-Ti/Nb

Deformação Verdadeira (ϵ_t)	1° passe	2° passe	3° passe	Total
1	0,113	-	-	0,113
2	0,126	0,106	-	0,232
3	0,111	0,106	-	0,218
4	0,120	0,089	0,118	0,326
5	0,111	0,088	0,106	0,305
6	-	-	-	-
média	0,116	0,097	0,112	

4.1.2 Laminação do aço IF-Ti/Nb/P

Da mesma forma, para a laminação do aço IF-Ti/Nb/P (M3A71) foram realizados de um a três passes nas amostras com cerca de 0,13mm cada. Neste material, a amostra de número 6 também foi escolhida por se diferenciar mais em dimensões iniciais e, assim, retirada dos testes com o objetivo de servir como análise inicial pós TTAT, enquanto a amostra 1 recebeu apenas um passe de redução de espessura, as amostras 2 e 3 sofreram dois passes e, finalmente, as amostras 4 e 5 passaram por três passes de redução. A redução de espessura (h_0 , h_1 , h_2 e h_3) e média se encontram na tabela 11 abaixo.

Tabela 11 – Espessuras das amostras de IF-Ti/Nb/P após cada passe

IF-Ti/Nb/P	h_0 (mm)	h_1 (mm)	h_2 (mm)	h_3 (mm)
1	1,18	1,03	-	-
2	1,21	1,06	0,91	-
3	1,24	1,06	0,94	-
4	1,24	1,08	0,98	0,85
5	1,20	1,06	0,93	0,83
6	1,26	-	-	-
média	1,21	1,06	0,94	0,84

Novamente, para este material, através das equações 1 e 2 obteve-se os valores de deformação verdadeira em laminação ' ϵ_t ', contidos na tabela 12 para cada amostra laminada.

Tabela 12 – Deformação verdadeira por passe. Aço IF-Ti/Nb/P

Deformação Verdadeira (ϵ_t)	1º passe	2º passe	3º passe	Total
1	0,136	-	-	0,136
2	0,132	0,153	-	0,285
3	0,157	0,120	-	0,277
4	0,138	0,097	0,142	0,378
5	0,124	0,131	0,114	0,369
6	-	-	-	-
média	0,137	0,125	0,128	-

4.2 Resultados da Análise de Tensões residuais

As medidas de tensões residuais das amostras do material como recebido encontravam-se muito heterogêneas, justificando o tratamento térmico de alívio de tensões para reduzir o nível de tensões das amostras antes do processo de laminação. Após o tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) as tensões possuíam valores de -8 ± 6 MPa.

A Figura 22 apresenta as amostras após a laminação de cada material. É possível observar que, em algumas amostras, ocorreu uma formação de arco após o processo de deformação plástica, caracterizando que o laminador poderia estar desalinhado (câmbor) ou que a espessura inicial das amostras não era homogênea. Em algumas amostras também foi observada a formação de ondulações.

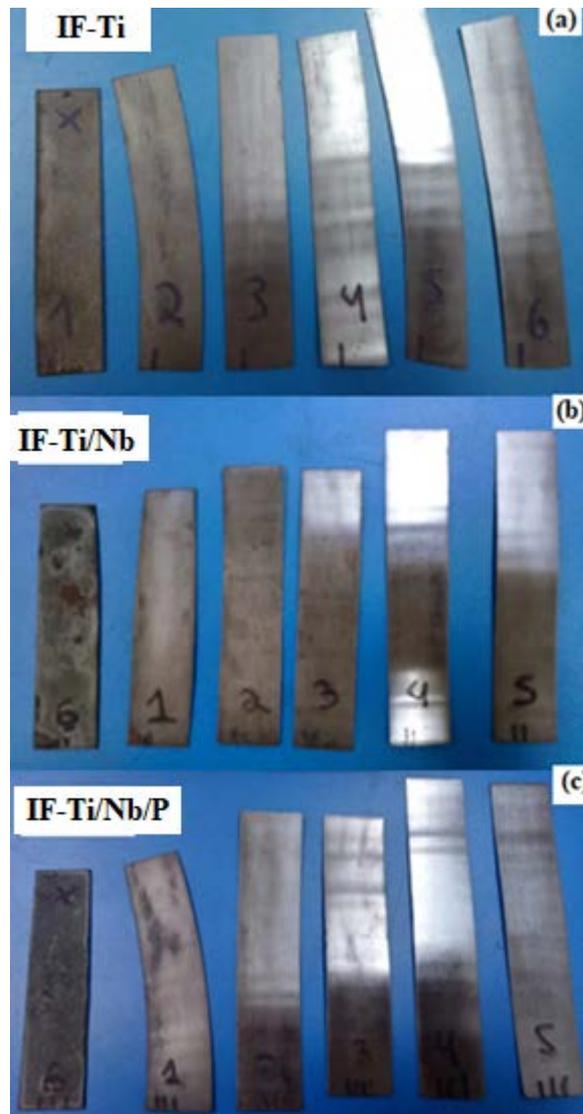


Figura 22 – Amostras aço IF pós laminação (a) IF-Ti, (b) IF-Ti/Nb e (c) IF-Nb.

Após a laminação do material, as análises de tensões foram feitas no sentido longitudinal das amostras, conforme a tabela 13.

Tabela 13 – Tensões residuais aferidas após laminação

Amostra	Tensões residuais (MPa)		
	IF-Ti	IF-Ti/Nb	IF-Ti/Nb/P
1	-8 ± 1	-16 ± 5	-73 ± 11
2	95 ± 3	54 ± 7	36 ± 2
3	79 ± 4	56 ± 8	36 ± 4
4	61 ± 6	73 ± 7	-99 ± 14
5	67 ± 3	-43 ± 3	-75 ± 4
6	50 ± 2	-4 ± 9	-12 ± 9

Analisando os dados na Tabela 13 observa-se que os valores de TR foram bem diferentes entre os materiais utilizados, mesmo sendo os níveis de deformação semelhantes. A Figura 23 apresenta o comportamento da tensões residuais para o aço IF-Ti em função do nível de deformação aplicado.

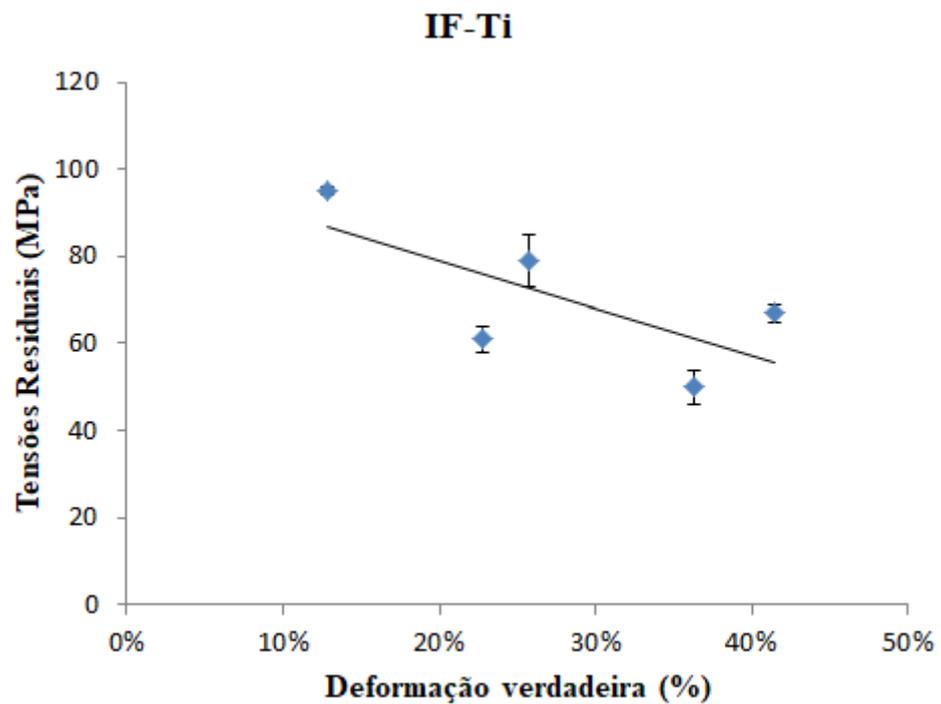


Figura 23 – Gráfico Tensão Residual vs Deformação verdadeira, aço IF-Ti

De acordo com o gráfico tensão residual por deformação verdadeira do aço IF estabilizado ao titânio (Figura 23), nota-se uma decrescente tensão residual conforme o aumento da deformação, sendo esta sempre de natureza trativa, sendo assim, de forma deletéria à posteriores conformações. Contudo, pode-se supor que para maiores níveis de deformação, haveria uma tendência das tensões residuais mudarem sua natureza para compressiva, o que seria benéfico.

Diferentemente das amostras analisadas estabilizadas ao titânio, a adição de nióbio acarretou na apresentação de tensões residuais de natureza compressiva em algumas amostras (Figura 24), sendo estas desejadas estruturalmente em termos de projeto. Entretanto, mesmo com algumas amostras apresentando tensões residuais compressivas, nota-se uma crescente tensão residual trativa conforme o aumento da deformação, diferentemente das amostras estabilizadas ao titânio apenas. Assim, a laminação desta classe de aço seria mais deletéria conforme o aumento da deformação. Tal variação como trativa e compressiva pode ser devido a vários fatores, como deformação pre-existente, possíveis erros do operador ou diferença de espessura ao longo de cada amostra. Contudo, a composição química do material deve ser o fator mais influente nesse comportamento tendo em vista que pode modificar as características de deformação plástica em nível microestrutural (deslocamento das discordâncias, por exemplo).

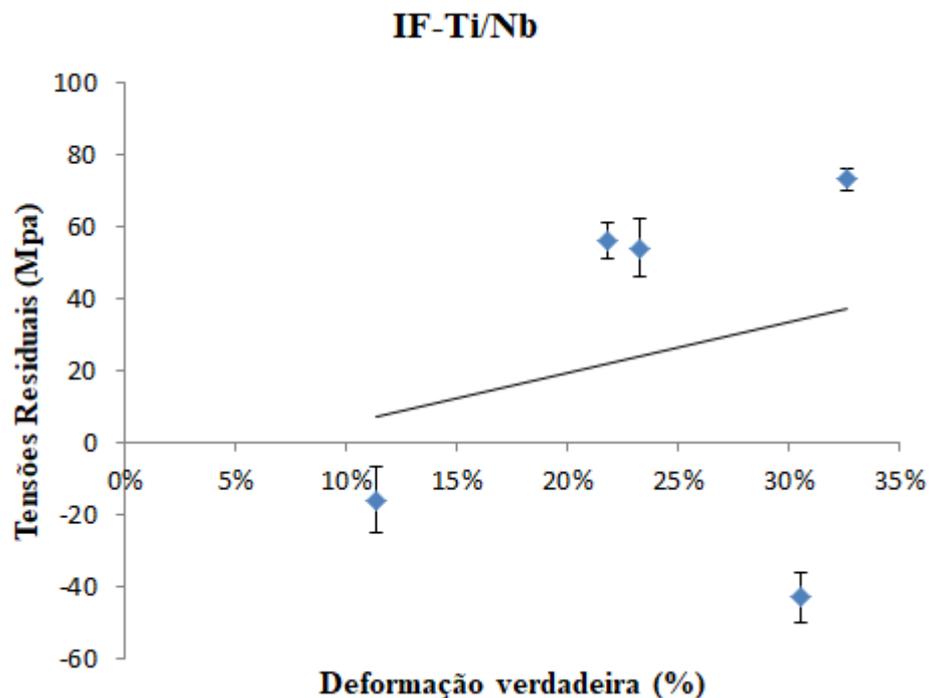


Figura 24 – Gráfico Tensão Residual vs Deformação verdadeira, aço IF-Ti/Nb

As amostras contendo fósforo obtiveram maior número de exemplares contendo tensões residuais compressivas (Figura 25), mas sem a ausência de amostras com tensões trativas, sendo estas observadas nas análises dos primeiros passes de laminação.

Desta forma, de acordo com o gráfico tensão residual por deformação verdadeira do aço IF estabilizado ao titânio/nióbio/fósforo, nota-se um aumento das tensões residuais compressivas conforme o aumento da deformação, sendo esta de forma desejada às propriedades do material na maioria das amostras. Esse comportamento é o mais esperado em processos de conformação pois com as deformações plásticas o material modifica suas distâncias interplanares do material, o que tende a gera um estado de tensões compressiva. Entretanto, ainda se observa variação como tensão residual trativa e compressiva, assim como nas amostras de titânio/nióbio.

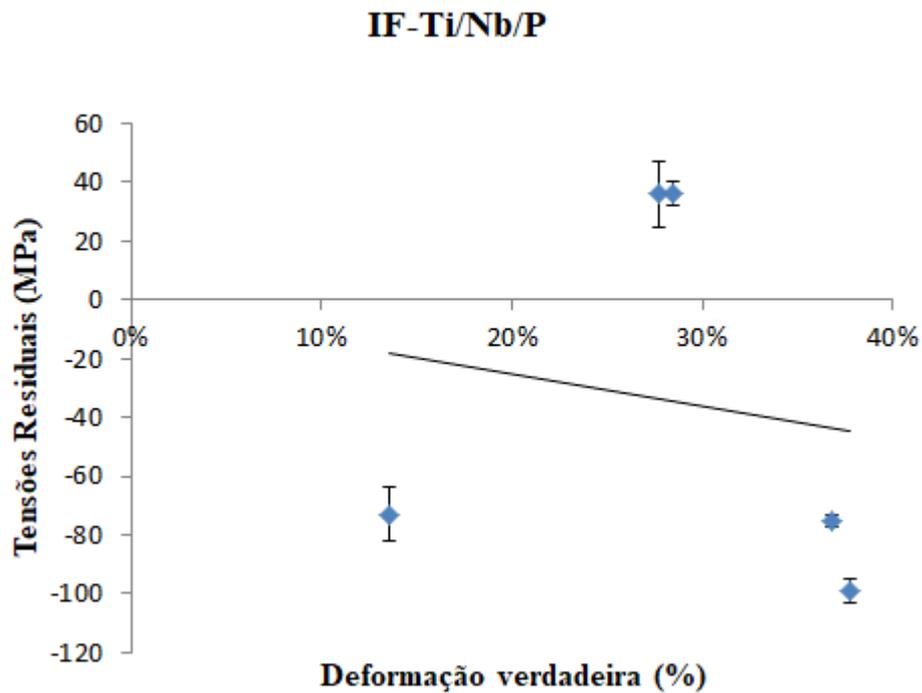


Figura 25 – Gráfico Tensão Residual vs Deformação verdadeira, aço IF-Ti/Nb/P

A Figura 26 apresenta um comparativo entre os materiais estudados e o estado de tensões residuais após os processos de laminação. Observa-se nos gráficos uma grande heterogeneidade nos valores obtidos. Contudo, nota-se que, de modo geral a composição química do material influencia significativamente na natureza e magnitude das tensões residuais. As amostras de aço IF-Ti tiveram predominância de tensões trativas enquanto que os outros dois materiais já possuíam regiões em compressão.

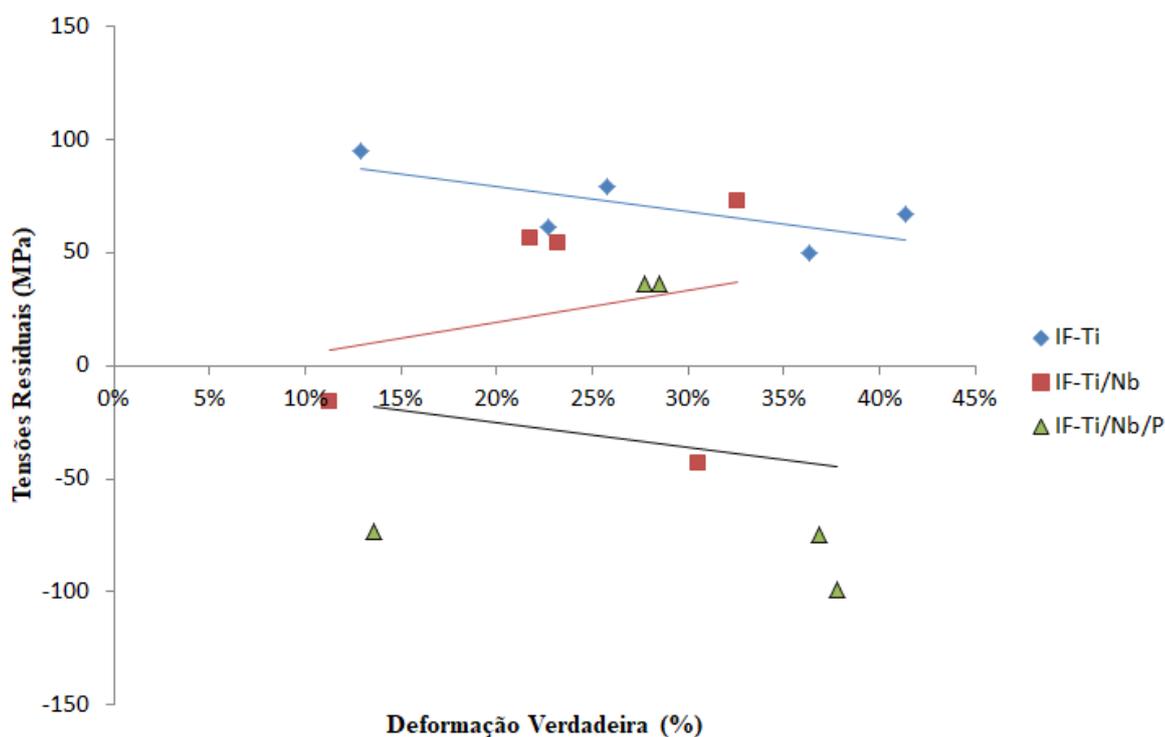


Figura 26 – Superposição dos gráficos de Tensão Residual vs Deformação verdadeira dos três materiais.

Durante os processos de conformação espera-se que as distâncias interplanares dos materiais cristalinos seja modificada e que tensões residuais compressivas sejam obtidas (CAMPOS, 2012). Contudo, quando se observa a Figura 22 é possível perceber que não houve uma deformação homogênea em todas as amostras, o que caracteriza que em diferentes pontos ao longo da largura das amostras foram obtidos diferentes níveis de deformação. Desta forma, o comportamento trativo em algumas amostras mostra-se resultado dessas deformações heterogêneas. Mesmo assim, o padrão observado nas amostras de aço IF-Ti pode ser considerado decorrente da composição química do material tendo em vista que em nenhum nível de deformação foram obtidos valores de TR compressivo.

Capítulo 5

Conclusões

O presente trabalho, que teve como objetivo estudar os efeitos da deformação plástica nas tensões residuais de chapas de aço IF com diferentes composições químicas permite as seguintes conclusões:

1. Os valores de tensões residuais nas amostras foram bem heterogêneos.
2. O nível de deformação influencia nos estados de tensões residuais.
3. A composição química do material está diretamente relacionada com a natureza (trativa ou compressiva) e a magnitude das tensões residuais.
4. A adição de nióbio e fósforo tenderam a gerar tensões residuais compressivas nas chapas após a laminação, o que seria benéfico para o material.

Capítulo 6

Sugestões para trabalhos futuros

- Analisar as tensões residuais nas laterais de cada amostra para levantar um perfil ao longo dessa dimensão.

- Fazer a caracterização microestrutural de amostras com diferentes níveis de deformação para tentar correlacionar possíveis modificações metalúrgicas com os valores de tensões obtidos no presente trabalho.

- Análise de dureza em cada uma das amostras relacionando-as com a deformação aferida em cada passe.

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, 1991.

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

BOECHAT N.; *Análise de tensões residuais por ruído magnético barkhausen e difração de raios-x em aço api 51 x70 com diferentes carregamento*. UFF, Rio de Janeiro, 2016.

CAMPOS. T.; *Estudo da influência dos parâmetros de tratamento de alívio das tensões residuais por vibração mecânica em juntas soldadas a plasma.*; UFF, Rio de Janeiro, 2012.

CHIAVERINI, V; *Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos*, 7ª Edição - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2005.

DIETER. G. E.; *Metalurgia Mecânica*. 2ª Edição. Editora Guanabara Dois, 1981.

FIETO B.; *Evolução da Microestrutura e das Propriedades Mecânicas de Aços IF Tratados Termomecanicamente*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

GORNI, A.A.; DA SILVEIRA, J.H.D.; FILHO, C. A.: *Efeito do processo de laminação a quente sobre as propriedades mecânicas de chapas finas de aço IF laminadas a frio*. 39º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Ouro Preto MG (2002).

HELD. R. H.; *Recrystallization of Low-Carbon Titanium Stabilized Steel*, Metallurgic Transactions vol.1, 1970.

HELMAN, H.; CETLIN P. R.; *Fundamentos da Conformação, Mecânica dos Metais*. 2ª Edição. Artliber Editora, 2005.

KANDIL F. A.; LORD J. D.; FRY A. T.; GRANT, P. V. Grant.; *A Review of Residual Stress Measurement, NPL Materials Centre, Teddington, Middlesex, UK, 2001.*

LOPES. A.; AZEVEDO. F.; *Análise da Microestrutura e das Propriedades Mecânicas do Aço IF - Nb/Ti, CEFET/RJ. Rio de Janeiro, 2016.*

MÁQUINAS COELHO; *Manual Laminador Elétrico Modelo LE 200, CM Indústria de Máquinas Operatrizes Ltda. São Paulo, 2016.*

MENEZES, T.; *Análise das tensões residuais geradas nos processos de soldagem MIG/MAG e Plasma. CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2015.*

MOREIRA. F.; VALLIM. F. A.; GUIARD. C.; *Textura e comportamento mecânico de aços IF estabilizados ao Ti e Nb-Ti, Technol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 9, n. 4, p. 294-301, out.-dez. 2012.*

NORCINO, A.B.; *Uma Contribuição ao Estudo de Tensões Residuais no Fresamento, Dissertação de M.Sc., UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil, 2013.*

OLIVEIRA. A. F.; *Caracterização de um aço IF após relaminação no Laminador de Encruamento, São Paulo, 2010.*

PRADHAN, R.; *Cold-rolled interstitial-free steels: a discussion of some metallurgical topics, Tokyo, ISIJ INTERNATIONAL, 1996, p.165-177.*

SARDINHA N. A.; *Comparação da Textura e Propriedades Mecânicas de um Aço para Estampagem Resultante da Laminação Convencional e Simétrica, Rio de Janeiro, 2012.*

SOARES. M.; REIS. R.; *Análise das Tensões Residuais Geradas no Torneamento em Altas Velocidades de um Aço SAE 4140; CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2016.*

SONG, X.L.; Z.X. YUAN, J. Jial., *Phosphorus segregation behavior at the grain boundary in a Ti-IF steel after annealing. Scr. Mater. 63(4), 446–448 (2010).*

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

SUHARTO J.; GUN Y.; *Annealing behavior of severely deformed IF steel via the differential speed rolling method*, School of Materials Science and Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749. Republic of Korea, 2012.

WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. D. H.; *Residual stress: Part 1 – Measurement techniques*. Materials Science and Technology, Vol. 17, pp. 355-365, 2001.