

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

JEAN CARLOS BORGES

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CHAPAS METÁLICAS LAMINADAS A FRIO
E A QUENTE**

JOINVILLE

2021

JEAN CARLOS BORGES

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CHAPAS METÁLICAS LAMINADAS A FRIO
E A QUENTE**

JOINVILLE

2021

JEAN CARLOS BORGES

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CHAPAS METÁLICAS LAMINADAS A FRIO
E A QUENTE**

**Submetido ao campus Joinville do Instituto Federal
de Santa Catarina como parte dos requisitos de
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.**

Orientador: Leonidas Cayo Mamani Gilapa, Dr.

JOINVILLE

2021

Borges, Jean C.

Análise Comparativa entre Chapas Metálicas Laminadas a Frio e a Quente. / Borges, Jean C. – Joinville: Instituto Federal de Santa Catarina, 2021. 74 f.

Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Federal de Santa Catarina, 2021. Graduação. Curso Superior de Engenharia Mecânica. Modalidade: Presencial.

Orientador: Leonidas Cayo Mamani Gilapa, Dr.

1. Conformação mecânica 2. Chapas metálicas 3. Ciência dos materiais 4. Propriedades mecânicas I. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CHAPAS METÁLICAS LAMINADAS A FRIO E A QUENTE.

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CHAPAS METÁLICAS LAMINADAS A FRIO
E A QUENTE**

JEAN CARLOS BORGES

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecânico e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Santa Catarina.

Joinville, 03 de agosto de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Leonidas Cayo Mamani Gilapa, Doutor
Orientador

Prof. Rubens Hesse, Doutor
Avaliador

Prof. Valter Vander de Oliveira, Mestre
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao campus Joinville do Instituto Federal de Santa Catarina e seus servidores pela excelente qualificação profissional fornecida aos alunos.

Ao professor Leonidas Cayo Mamani Gilapa pela dedicação e auxílio durante a orientação deste trabalho acadêmico.

À empresa Elmeca Eletromecânica Sul Brasileira por permitir a análise de equipamentos e ferramentas necessária para a execução deste estudo.

RESUMO

A temperatura de laminação de chapas metálicas pode influenciar diretamente nas propriedades mecânicas do aço, sendo de grande importância o conhecimento dos motivos que conduzem a estas características a fim de garantir a correta aplicação da matéria-prima em processos de estampagem e dobramento. Através de técnicas de caracterização de materiais foram analisadas as principais diferenças entre chapas de aço 1008 laminadas a frio e a quente. Com os resultados obtidos concluiu-se que o menor módulo de elasticidade, maior ductilidade e menor índice de anisotropia fazem com que as chapas laminadas a frio tenham melhor desempenho nos processos mencionados.

Palavras-chave: Conformação mecânica; Chapas metálicas; Ciência dos materiais; Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The temperature of sheet metal lamination can directly influence the mechanical properties of steel, being of great importance the knowledge of the reasons that lead to these characteristics in order to ensure the correct application of the raw material in stamping and bending processes. Through material characterization techniques, the main differences between cold and hot rolled 1008 steel sheets were analyzed. With the results obtained, it was concluded that the lower modulus of elasticity, higher ductility and lower anisotropy index make the cold rolled sheets have better performance in the mentioned processes.

Keywords: Mechanical forming; Metal sheets; Materials science; Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Laminação de chapas	26
Figura 2 – Estampagem por puncionamento	28
Figura 3 – Estampagem de conformação em geral.....	28
Figura 4 – Estampagem profunda.....	29
Figura 5 – Dobramento de chapas	30
Figura 6 – Linha neutra em uma peça dobrada	31
Figura 7 – Desenvolvimento de dobra.....	32
Figura 8 – Retorno elástico durante processo de dobramento.....	33
Figura 9 – Prensa mecânica (esq) e prensa hidráulica (dir).....	34
Figura 10 – Dobradeira CNC	35
Figura 11 – Estampo de corte	36
Figura 12 – Punções e matrizes para dobramento	36
Figura 13 – Equipamento para ensaio de dureza Vickers	40
Figura 14 – Impressão realizada em ferro nodular pelo método Vickers.....	40
Figura 15 – Esboço da curva obtida no ensaio de tração.....	41
Figura 16 – Micrografia do aço 1006	44
Figura 17 – Esboço das amostras produzidas	45
Figura 18 – Amostras produzidas.....	46
Figura 19 – Ângulos das peças produzidas	47
Figura 20 – Processo de dobra das amostras	47
Figura 21 – Equipamento para medição tridimensional.....	49
Figura 22 – Máquina universal de ensaios	49
Figura 23 – Corpos de prova após o ensaio de tração	50
Figura 24 – Corpos de prova embutidos em baquelite	50
Figura 25 – Máquina de lixamento metalográfico.....	51
Figura 26 – Politriz.....	51
Figura 27 – Microscópio para análise metalográfica.....	52
Figura 28 – Microdurômetro Vickers	52
Figura 29 – Curvas tensão-deformação obtidas	54
Figura 30 – Resultados dos ensaios de microdureza	60
Figura 31 – Microestrutura do aço plano	61
Figura 32 – Microestrutura do aço dobrado a 20°	62

Figura 33 – Microestrutura do aço dobrado a 0° 63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos aços 1010 e 1020	25
Quadro 2 – Propriedades mecânicas das chapas laminadas a quente.....	25
Quadro 3 – Propriedades mecânicas das chapas laminadas a frio.....	25
Quadro 4 – Composição química do aço 1008.....	46
Quadro 5 – Ferramentas de dobra utilizadas	48
Quadro 6 – Ângulos e raios obtidos	53
Quadro 7 – Dimensões da seção transversal após o ensaio de tração	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVO GERAL.....	21
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.3	PROBLEMA	22
1.4	JUSTIFICATIVA.....	22
2	REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1	AÇO CARBONO 1010, 1020.....	24
2.2	CONFORMAÇÃO MECÂNICA DOS METAIS.....	26
2.2.1	Laminação de chapas	26
2.2.2	Estampagem de chapas	27
2.2.3	Dobramento de chapas.....	29
2.2.3.1	Determinação da linha neutra.....	30
2.2.3.2	Raio mínimo de dobra	32
2.2.3.3	Retorno elástico.....	33
2.2.4	Equipamentos utilizados	34
2.2.5	Ferramentas de estampagem e dobramento	35
2.3	ESTAMPABILIDADE DOS METAIS.....	36
2.3.1	Anisotropia.....	37
2.3.2	Tensões residuais	38
2.4	CARACTERIZAÇÃO DOS METAIS.....	39
2.4.1	Ensaio de dureza.....	39
2.4.2	Ensaio de tração.....	41
2.4.3	Metalografia.....	43
3	METODOLOGIA	45
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	53
4.1	VARIAÇÃO DIMENSIONAL	53
4.2	RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO.....	54
4.3	RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA.....	59
4.4	ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	61
5	CONCLUSÕES	64
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
6	REFERÊNCIAS	67

7 APÊNDICE A.....71

1 INTRODUÇÃO

A correta seleção da matéria-prima é a etapa inicial para se obter produtos de qualidade e conforme as especificações de projeto. Indústrias destinadas à linha branca, automotiva, ou de maquinários em geral utilizam chapas de materiais variados, como alumínio, aço carbono e aço inoxidável, cada qual com suas propriedades intrínsecas, obtendo formas variadas através dos processos de conformação mecânica (BARBOSA, 2009; KARAAĞAÇ, 2017).

Mesmo chapas de igual composição química podem ser encontradas no mercado com algumas variações. É o caso do aço carbono que, em espessuras finas, é comercializado em chapas laminadas a quente ou laminadas a frio (CHIAVERINI, 2005). Apesar de serem processos de fabricação semelhantes, a temperatura de processamento pode atribuir características distintas ao material e que eventualmente podem interferir nos processos seguintes, dependendo de sua aplicação (CALLISTER, 2018).

O dobramento é um processo onde em alguns casos é perceptível um comportamento divergente das características mecânicas da matéria-prima quando comparados estes dois métodos de laminação de chapas. Como exemplo, pode-se citar a variação dimensional em ângulos e raios, maior dificuldade na obtenção da geometria desejada e marcas superficiais nas peças produzidas.

O dobramento é um processo de conformação que consiste na deformação plástica de chapas metálicas, principalmente com a utilização de ferramentas como punção e matriz, com o objetivo de obter geometrias funcionais ou aumentar a rigidez de peças (MARCONDES, 2014).

A variação observada em uma peça após um processo de dobramento muitas vezes é resultado de um fenômeno denominado retorno elástico, que consiste em uma tendência de recuperação da geometria original ao ser removida a carga aplicada no processo (BARBOSA, 2009; SPATHOPOULOS; STAVROULAKIS, 2020). Um dos fatores que favorecem esse comportamento é a anisotropia resultante das condições de laminação da matéria-prima (KARAAĞAÇ, 2017). Segundo Haus et al. (2012), o conhecimento acerca do comportamento do material empregado no processo é o fator de maior importância na previsão do retorno elástico.

Métodos de caracterização de materiais podem ser empregados para identificar suas propriedades químicas e mecânicas, e assim compreender algum comportamento inesperado durante sua utilização (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

A análise metalográfica põe em evidência a microestrutura de um material, expondo tamanho de grãos, influência do processo de fabricação na orientação dos grãos e principais fases presentes. Este ensaio é feito em seções do material previamente polidas e atacadas quimicamente e conduzem a informações que podem prever seu comportamento durante o uso (COLPAERT, 2008).

O ensaio de tração consiste em tracionar um corpo de prova até sua ruptura, medindo a variação no comprimento em função da carga aplicada, obtendo algumas características mecânicas importantes como ductilidade e limite de escoamento (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Já o ensaio de dureza produz uma marca superficial ou impressão no corpo de prova através da aplicação de uma carga, empregando um penetrador padronizado, sendo que as características desta marca de impressão fornecem dados quanto à deformação permanente do material analisado (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho acadêmico visa a análise comparativa de chapas metálicas com baixo teor de carbono obtidas por processo de laminação a quente e laminação a frio, nas espessuras de 2mm e 3,18mm a fim de verificar como estes métodos de fabricação da matéria-prima interferem em processos subsequentes de conformação mecânica, como o dobramento.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterização das chapas metálicas avaliadas neste estudo antes e após o dobramento, através de análise metalográfica, ensaio de tração e ensaio de dureza;
- Avaliação dos parâmetros de processamento (raio e ângulo de dobramento);
- Comparar a influência das características das chapas no processo de dobramento.

1.3 PROBLEMA

Em uma caldeiraria situada na zona norte de Joinville, verificou-se que as chapas metálicas podem apresentar comportamentos diferentes durante o processo de dobramento, de acordo com o método de laminação empregado na matéria-prima.

Peças que necessitam de dobras em raio ou com tolerância angular podem ser mais facilmente processadas em chapas laminadas a frio, quando comparadas espessuras iguais. Tem-se constatado que o material laminado a quente tende a apresentar maior variação dimensional ao longo de uma mesma peça após o processo de dobra, podendo comprometer tolerâncias solicitadas no projeto do cliente. Ainda, verifica-se maior qualidade visual em peças fabricadas com chapas laminadas a frio devido a ausência de carepa, comum em processos de trabalho a quente.

1.4 JUSTIFICATIVA

A ideia para o trabalho em questão surgiu do cotidiano profissional do acadêmico. Atuando no setor comercial de uma caldeiraria, em constante comunicação com os operadores de produção da fábrica, tomou-se conhecimento do problema mencionado.

Um estudo mais aprofundado sobre o comportamento do aço possibilitará a correta seleção da matéria-prima ou os parâmetros de dobra que permitam obter produtos de acordo com a finalidade pretendida.

Cerceau (2004) avaliou as características de estampabilidade de chapas laminadas a quente em comparação a laminação a frio. Verificou-se que ambos os materiais possuem propriedades mecânicas similares, como dureza e limite de resistência, porém as chapas laminadas a quente possuem estampabilidade superior pois resistem a valores maiores de estrição antes de ocorrer a falha. No entanto, esse estudo não avaliou a variação dimensional e geométrica que pode ocorrer em peças após esse processo, quando comparados ambos os métodos de laminação.

Filho, Gorni e Silveira (2002) avaliaram as alterações de propriedades mecânicas que a laminação a quente pode acarretar especificamente sobre chapas de aço I.F. (intersticial free).

Aços I.F. são produzidos com adição de elementos micro ligantes como nióbio e titânio, a fim de reduzir a quantidade de átomos intersticiais de carbono e nitrogênio e assim aumentar a sua estampabilidade, sendo normalmente processados por laminação a frio. Esse estudo concluiu que a laminação a quente influenciou no coeficiente de anisotropia das chapas, uma característica importante para definir a estampabilidade do material, sendo que as demais propriedades mecânicas não foram afetadas. Novamente, possíveis variações dimensionais e geométricas em processos subsequentes não foram abordadas.

A análise comparativa pretendida nesse estudo também contribuirá para o processo ensino-aprendizagem, colocando em prática o conhecimento teórico adquirido nas componentes curriculares, uma vez que esta pesquisa possui caráter interdisciplinar, envolvendo conhecimento em diversas áreas como ciência dos materiais, processos de fabricação e propriedades mecânicas dos materiais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste tópico serão apresentados os principais aspectos já conhecidos sobre os aços carbono e a conformação de metais, cujos conceitos contribuíram para a realização do estudo proposto neste trabalho.

2.1 AÇO CARBONO 1010, 1020

Aços são ligas ferro-carbono amplamente utilizados na indústria, podendo conter a adição de outros elementos de liga, dependendo da necessidade da aplicação. O teor de carbono, normalmente inferior a 1% em peso, influencia diretamente nas propriedades mecânicas do material (CALLISTER, 2018).

Devido à variedade de teor de carbono e suas ligas, tornou-se necessário a classificação dos aços através de um conjunto de quatro algarismos. Os dois primeiros algarismos indicam os elementos de liga adicionados ao material, sendo que a classificação 10xx compreende os aços carbono comuns, ou seja, aqueles sem adição de elementos, apresentando apenas concentrações residuais de impurezas, como manganês por exemplo. Já os dois últimos algarismos indicam os centésimos percentuais de carbono presente. Assim, a classificação 1010 indica um aço sem adição de elementos de liga com 0,10% em peso de carbono, assim como a classificação 1020 indica uma concentração de 0,20% em peso de carbono (VAN VLACK, 2003).

Quando o teor de carbono é inferior a 0,25% em peso, o material é denominado aço de baixo carbono, sendo sua microestrutura constituída apenas por perlita e ferrita. Esses aços são relativamente fáceis de serem processados, devido possuírem uma excelente ductilidade e tenacidade, sendo por isso largamente utilizados em processos de caldeiraria, como dobramento e estampagem (CALLISTER, 2018).

O Quadro 1 a seguir apresenta a composição química e principais propriedades mecânicas dos aços 1010 e 1020.

Quadro 1 – Características dos aços 1010 e 1020

Aço	Carbono [%p]	Manganês [%p]	Limite de resistência a tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Ductilidade [%AL em 50mm]
1010	0,1	0,45	325	180	28
1020	0,2	0,45	380	205	25

Fonte: Adaptado de Callister, 2018

No entanto, aços de baixo carbono destinados à processos de estampagem são padronizados por normas específicas: NBR5906 para chapas laminadas a quente e NBR5915 para chapas laminadas a frio.

O Quadro 2 a seguir apresenta algumas propriedades mecânicas das chapas laminadas a quente estabelecidas na norma NBR5906.

Quadro 2 – Propriedades mecânicas das chapas laminadas a quente

Especificação Grau do aço ^a	Limite de escoamento MPa máx.	Limite de resistência MPa máx.	Alongamento % mín. A ^{b, d}	
			Lo = 50 mm e < 3,0 mm	Lo = 80 mm e < 3,0 mm
EM	-	430	28	26
EP	300	410	30	28
EPA	280 ^{c)}	400	33	31

^a Para espessura inferior ou igual a 2,0 mm, acrescentar 20 MPa aos valores do limite de escoamento máximo e limite de resistência máximo especificados e três unidades a menos no valor do alongamento percentual mínimo especificado.

Fonte: adaptado de NBR5906, 2008

Analogamente, o Quadro 3 a seguir apresenta as propriedades mecânicas das chapas laminadas a frio estabelecidas na norma NBR5915.

Quadro 3 – Propriedades mecânicas das chapas laminadas a frio

Grau do aço	Limite de escoamento (LE) ^{a, d} MPa	Limite de resistência (LR) MPa	Alongamento total (al) mín % ^{b, d}	
			Lo = 50 mm	Lo 80 mm
EM	140 – 280	270 – 390	30	28
EP	140 – 260	270 – 370	35	33

Fonte: adaptado de NBR5915-2, 2013

2.2 CONFORMAÇÃO MECÂNICA DOS METAIS

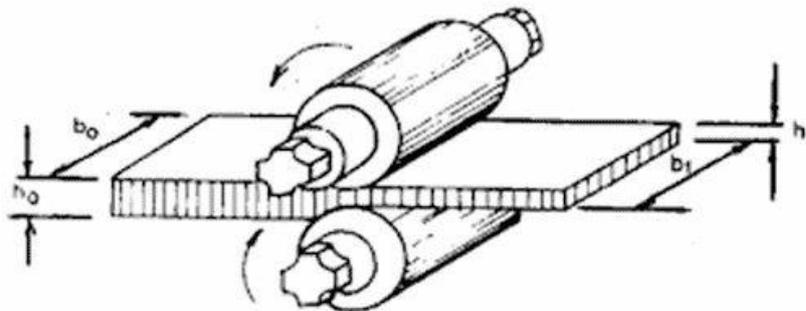
A conformação mecânica consiste na modificação da forma de um corpo metálico para outra forma pretendida através da aplicação de tensões externas, podendo esse processo ocorrer à temperatura ambiente ou a altas temperaturas, porém mantendo o metal em sua fase sólida. De grande importância para a produção de componentes industriais, militares e bens de consumo, estão presentes na maioria dos produtos metálicos, sendo estes por vezes submetidos a mais de um estágio de conformação (ALTAN; TEKKAYA, 2012).

O objetivo da conformação mecânica é a deformação plástica do metal, ou seja, uma alteração permanente em sua forma. Para tanto, aplicam-se valores de tensão acima do limite de escoamento do material, porém abaixo do seu limite de resistência à ruptura a fim de evitar trincas ou fraturas (BRESCIANI FILHO, 2011).

2.2.1 Laminação de chapas

A laminação de chapas consiste em forçar a passagem de um *blank* ou tarugo entre dois cilindros que giram a mesma velocidade, porém em sentidos contrários. O material, que inicialmente possui uma dimensão maior que o espaçamento entre os cilindros, sofre uma deformação plástica, reduzindo a sua espessura e aumentando o comprimento e largura. A Figura 1 a seguir ilustra este processo.

Figura 1 – Laminação de chapas



Fonte: Chiaverini, 1986

Esse processo pode ser feito à altas temperaturas (acima da temperatura de recristalização do material) ou à temperatura ambiente (abaixo da temperatura de recristalização), caracterizando a laminação a quente e laminação a frio, respectivamente.

A recristalização é um tratamento térmico aplicado a um material processado a temperatura ambiente (frio), consistindo na formação de novos grãos microscópicos, livres de deformação e com baixa densidade de discordâncias. A recristalização corrige o fenômeno de encruamento, caracterizado pela interação de discordâncias que restringe a deformação elástica, portanto exerce forte influência sobre algumas propriedades do material, como resistência mecânica e alongamento. A temperatura de recristalização, onde ocorre a formação destes novos grãos, geralmente situa-se entre um terço e metade da temperatura de fusão do metal (CALLISTER, 2018).

A laminação a quente permite grandes reduções de seções transversais devido à menor resistência do material à deformação plástica, possibilitada pela alta temperatura de trabalho. Entretanto, também devido à alta temperatura, chapas obtidas por esse processo apresentam óxidos superficiais que podem prejudicar processos posteriores, como redução de vida útil de ferramentas, defeitos superficiais e dificuldade de aderência de revestimentos (BRESCIANI FILHO, 2011; CHIAVERINI, 1986).

A laminação a frio geralmente é aplicada em chapas previamente laminadas a quente. Como o processo é realizado a temperatura ambiente, há maior resistência do material à deformação, sendo necessário mais energia para efetuar a conformação, elevando seu custo. Entretanto, confere ao material laminado melhores propriedades mecânicas. É considerado um processo de acabamento, portanto as reduções de seções transversais são menores, sendo aplicado quando há necessidade de um acabamento superficial com melhor qualidade (BRESCIANI FILHO, 2011; CHIAVERINI, 1986).

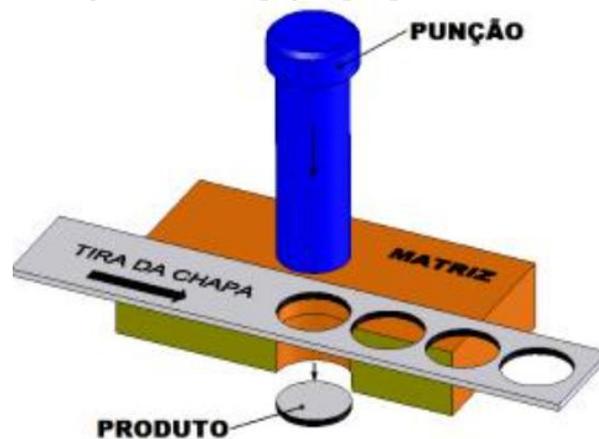
2.2.2 Estampagem de chapas

A estampagem de chapas consiste na transformação de um produto semi-acabado plano de espessura fina, geralmente chapas ou tiras, em uma forma tridimensional. Muito aplicada na fabricação de carrocerias automotivas e autopeças, eletrodomésticos, talheres e embalagens, tem por característica a produção de itens com boa tolerância dimensional, qualidade superficial

e rigidez. Ainda, propicia a otimização do processo fabril, visto a alta taxa de produção que pode ser alcançada, sendo ideal para fabricação de peças em larga escala (OLIVEIRA, 2011).

A estampagem ocorre basicamente com a utilização de um punção e uma matriz. O processo de corte também pode estar presente devido à ação de cisalhamento entre estes dois componentes, recebendo o nome de puncionamento (BRESCIANI FILHO, 2011). A Figura 2 a seguir ilustra este processo.

Figura 2 – Estampagem por puncionamento



Fonte: Guru, 2021

A estampagem de maneira geral é aplicada para fabricação de peças conformadas superficialmente, sem que haja alteração na espessura do material, ocorrendo apenas a deformação plástica a fim de se obter a peça final. Muitos componentes automotivos são produzidos com este processo, como portas e capôs, conforme apresentado na Figura 3 a seguir.

Figura 3 – Estampagem de conformação em geral



Fonte: ETW Cloud, 2021

Na estampagem profunda, também chamada de embutimento ou repuxo, o processo tem maior intensidade, ocorrendo o estiramento do material, ou seja, uma redução na espessura para que a forma pretendida seja alcançada. Deste modo, a matéria-prima precisa ter propriedades superiores para que não se rompa durante a ação (BRESCIANI FILHO, 2011). A Figura 4 a seguir apresenta exemplos de peças produzidas por este processo.

Figura 4 – Estampagem profunda



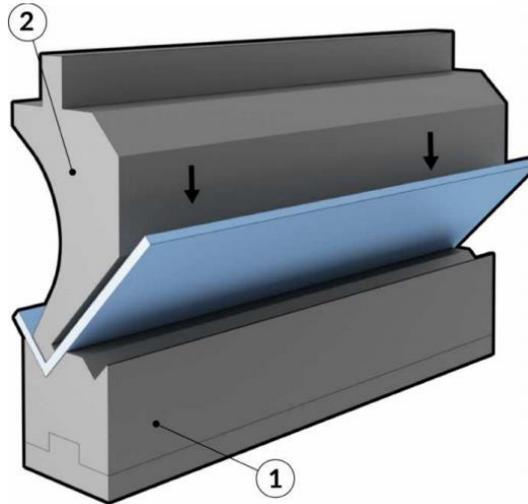
Fonte: Sipxmach, 2021

2.2.3 Dobramento de chapas

O dobramento é um processo que transforma chapas metálicas em seções com raios, ângulos, bordas e flanges através da deformação plástica. A face interna dobrada sofre esforços de compressão, enquanto a face externa é tracionada. Normalmente, o dobramento produz pouca ou nenhuma alteração na espessura do material, pois seu principal objetivo é obter peças com maior rigidez e geometria funcional (ALTAN; TEKKAYA, 2012; MARCONDES, 2014).

Apesar de existirem várias técnicas de dobramento, a que possibilita a maior variedade de geometrias consiste na utilização de um punção e uma matriz. O punção pressiona a chapa metálica para dentro da cavidade da matriz, que possui o formato necessário para obtenção do ângulo de dobra requerido (ALTAN; TEKKAYA, 2012). Na representação do processo da Figura 5, vê-se a matriz em (1) e o punção em (2).

Figura 5 – Dobramento de chapas



Fonte: Faria; Rego, 2021

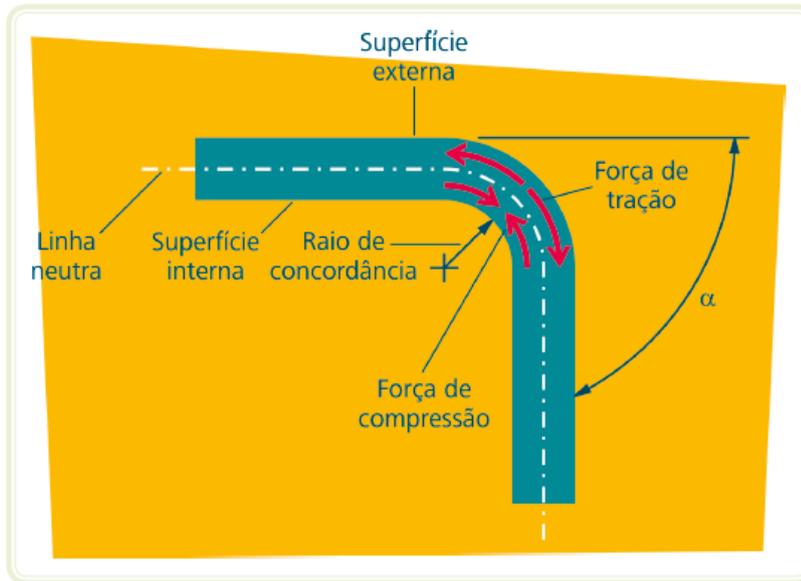
Alguns fatores são cruciais neste processo e precisam ser avaliados para a obtenção das dimensões de dobra corretas, como determinação da linha neutra, retorno elástico e presença de tensões residuais (MARCONDES, 2014).

2.2.3.1 Determinação da linha neutra

As dimensões de uma chapa ou tira metálica tendem a sofrer alteração durante o processo de dobra, assim o tamanho da peça planificada não será o mesmo da peça conformada. A face interna à dobra sofre tensões de compressão, tendendo a encurtar sua dimensão, enquanto a face externa fica sujeita a tensões de tração, sofrendo alongamento (ROCHA, 2012).

Como a solicitação de uma face é oposta à presente na outra face, há uma linha ao longo do plano transversal do material em que as forças se anulam, ou seja, não há esforços de conformação nesta região. Esta linha recebe o nome de linha neutra. O comprimento da linha neutra não sofre alteração durante o dobramento, devido à ausência de esforços, sendo o mesmo antes e após o processo. Assim, a linha neutra é utilizada como referência para se obter as dimensões do material planificado que resultarão na peça pretendida (BRESCIANI FILHO, 2011). Na Figura 6 a seguir é representada a posição da linha neutra em uma peça dobrada.

Figura 6 – Linha neutra em uma peça dobrada



Fonte: Rocha, 2012

Antes do dobramento, a linha neutra estará localizada na metade da espessura da chapa. Após a conformação, segundo Rocha (2012), a posição continuará a mesma caso a peça tenha espessura de até 1mm, e em caso de espessura superior estará localizada a 1/3 da espessura, em direção à superfície interna.

De forma resumida, supondo a espessura da peça apresentada na Figura 6 igual a 1mm, a dimensão planificada (também chamada de peça desenvolvida) terá o mesmo comprimento da linha neutra. Assim, deve-se somar os segmentos de reta (antes e após o raio de dobra) com o comprimento do raio na linha neutra. Conforme Rocha (2012), o perímetro do raio pode ser obtido com a equação a seguir.

$$D = \frac{2\pi \cdot R_x}{360} \cdot (180 - \alpha) \quad (1)$$

Onde:

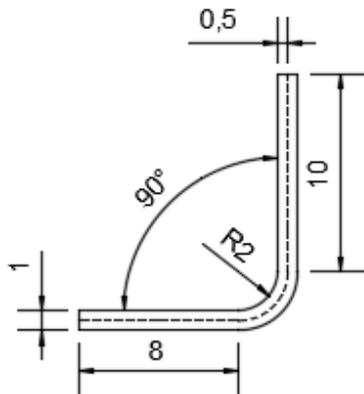
D – perímetro do raio na linha neutra;

R_x – raio na linha neutra (raio de dobra interno + distância da linha neutra em relação à face interna);

α – ângulo de dobra.

Na Figura 7 a seguir está exemplificado o cálculo do desenvolvimento de uma peça dobrada, sendo o comprimento planificado representado pela letra L. Supondo a espessura de 1mm, a linha neutra (representada pela linha tracejada) estará a 0,5mm de ambas as faces.

Figura 7 – Desenvolvimento de dobra



$$L = 8 + \left(\frac{2\pi \cdot 2,5}{360} \cdot (180 - 90) \right) + 10 = 21,93$$

Fonte: elaborado pelo autor, 2021

2.2.3.2 Raio mínimo de dobra

No processo de dobramento, dependendo do material empregado, podem ocorrer trincas na linha de dobra caso o raio seja inferior a um determinado valor, denominado raio mínimo de dobra, variável conforme a espessura da chapa. Alguns materiais altamente dúcteis podem ser dobrados sobre si mesmos sem que haja fraturas, ou seja, possuem raio mínimo de dobra igual a zero.

De acordo com Marcondes (2014), quando excedido o raio mínimo, chapas finas tendem a trincar nas bordas e chapas grossas geralmente trincam no centro.

A fim de evitar o aparecimento de trincas e eventuais falhas, o raio mínimo de dobra pode ser calculado através da equação a seguir.

$$R_{min} = \frac{t}{2 \cdot \epsilon_{esc}} \quad (2)$$

Onde:

R_{min} – raio mínimo de dobra;

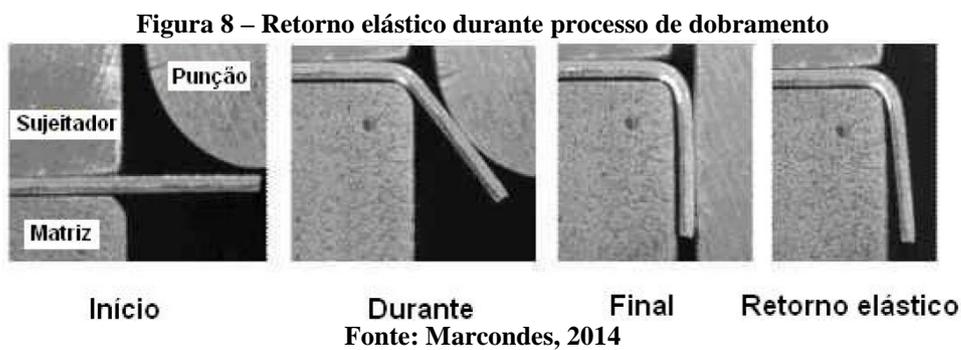
t – espessura da chapa;

ϵ_{esc} – deformação percentual na tensão de escoamento (σ_{esc}).

2.2.3.3 Retorno elástico

Materiais metálicos submetidos a um processo de conformação mecânica tendem a apresentar um comportamento de recuperação da sua forma original, fenômeno conhecido como retorno elástico (MARCONDES, 2014).

Nos processos de dobramento e estampagem, o retorno elástico ocorre ao ser retirada a carga aplicada pelo punção sobre o material, podendo resultar em ângulos ou raios divergentes dos esperados, comprometendo a aplicação da peça (HAUS ET AL., 2012). Na Figura 8 a seguir verifica-se que o ângulo de dobra obtido é ligeiramente maior após a ação do punção devido a este comportamento.



O retorno elástico é ocasionado pelas tensões residuais retidas na chapa metálica após esses processos de conformação mencionados (KARAAĞAÇ, 2017). Após o descarregamento do esforço no punção, as tensões no material são redistribuídas, ocasionando alteração nas deformações e conseqüentemente variações nas dimensões da peça conformada (SPATHOPOULOS; STAVROULAKIS, 2020).

Outros fatores que contribuem para este fenômeno, segundo Karaağaç (2017), são: anisotropia resultante dos processos de laminação, condições de lubrificação durante o processo, força aplicada na conformação, espessura da chapa e tamanho do *blank*.

O efeito do retorno elástico pode ser aproximado pela equação a seguir.

$$\frac{R_0}{R_f} = 4 \cdot \left(\frac{R_0 \cdot \sigma_{LE}}{E \cdot t} \right)^3 - 3 \cdot \frac{R_0 \cdot \sigma_{LE}}{E \cdot t} + 1 \quad (3)$$

Onde:

R_0 – raio inicial (mm);

R_f – raio final (mm);

σ_{LE} – tensão limite de escoamento (MPa);
E – módulo de elasticidade (MPa);
t – espessura (mm).

No entanto, conforme Garcia, Spim e Santos (2012), torna-se mais viável proceder com um método empírico, aplicando uma carga de dobramento maior a fim de compensar o retorno do material.

2.2.4 Equipamentos utilizados

Na maioria dos processos de conformação de chapa finas são utilizadas prensas mecânicas ou hidráulicas. As prensas mecânicas são mais empregadas nos processos de puncionamento, caracterizadas por ação rápida e com golpes de curta duração, permitindo a fabricação de peças seriadas com alta taxa de produção. As prensas hidráulicas possuem ação mais lenta, porém aplicam maior força em golpes mais longos, sendo normalmente utilizadas nos processos de estampagem profunda e dobramento. A Figura 9 apresenta estes equipamentos mencionados.

Figura 9 – Prensa mecânica (esq) e prensa hidráulica (dir)



Fonte: Harsle, 2021

A dobradeira CNC, representada na Figura 10, também é muito utilizada na indústria, tendo o princípio de funcionamento das prensas hidráulicas, porém com certo nível de automação proporcionado pelo Comando Numérico Computadorizado. Estes equipamentos

garantem maior precisão nas dimensões obtidas, principalmente em ângulos, maior agilidade na operação e trocas de configuração, além da padronização em peças seriadas.

Figura 10 – Dobradeira CNC



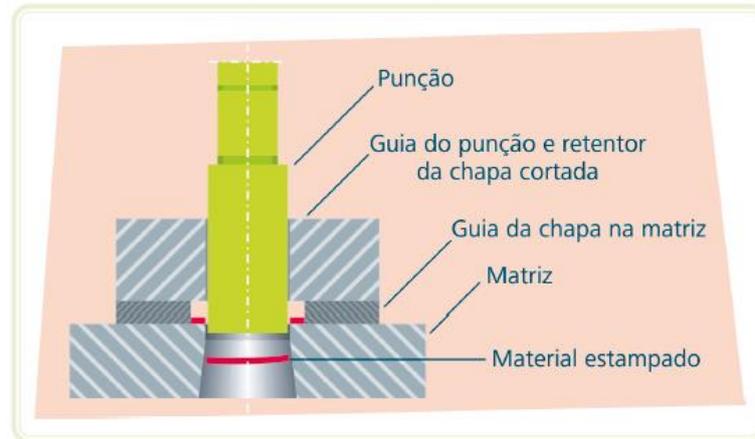
Fonte: Gasparini, 2021

2.2.5 Ferramentas de estampagem e dobramento

Tanto os processos de estampagem quanto de dobramento utilizam como ferramentas basicamente um punção e uma matriz. O primeiro é responsável por aplicar força ao material, forçando-o para o interior da matriz com a geometria apropriada para a forma pretendida.

No processo de puncionamento, as ferramentas são também chamadas de estampos de corte, ilustrado na Figura 11, sendo constituídos também por guias para o punção e para a matéria-prima.

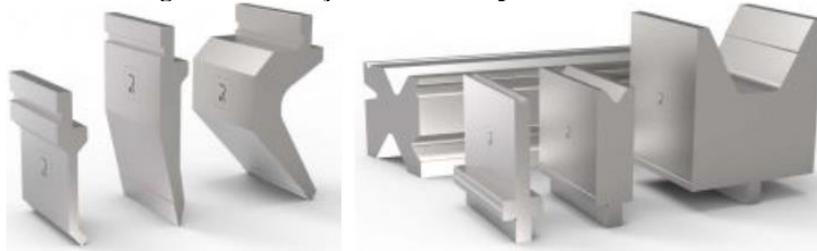
Figura 11 – Estampo de corte



Fonte: Rocha, 2012

Punções e matrizes destinadas ao dobramento de chapas metálicas são normalmente confeccionados em aço-liga usinados e temperados. Na Figura 12 a seguir são apresentados alguns modelos destas ferramentas.

Figura 12 – Punções e matrizes para dobramento



Fonte: Rolleri, 2021

2.3 ESTAMPABILIDADE DOS METAIS

A estampabilidade de um material caracteriza o limite ao qual o mesmo pode ser deformado antes de apresentar falhas ou ruptura. Segundo Altan e Tekkaya (2012), algumas propriedades mecânicas do material, como tensão de escoamento (σ_{esc}) e anisotropia, são as principais responsáveis pela capacidade de deformação (ϵ) e consequente viabilidade de produção de peças complexas.

Informações quanto à estampabilidade são úteis para prever falhas durante o processo e em ferramentas, para avaliar a capacidade de fabricação de peças projetadas e para correta seleção de matéria-prima baseada na complexidade de peças e requisitos de resistência (ALTAN; TEKKAYA, 2012).

2.3.1 Anisotropia

As propriedades mecânicas de determinado material podem sofrer variações se mensuradas em diferentes direções do corpo metálico. Este fenômeno é denominado anisotropia, sendo resultado principalmente dos processos de conformação plástica empregados para obtenção do material (BRESCIANI FILHO, 2011).

Conforme Altan e Tekkaya (2012), a anisotropia é uma característica importante para se determinar a capacidade de um material à estampagem profunda, onde há redução da espessura, porém exerce pouca influência nos processos de dobramento de chapas.

A anisotropia normal pode avaliar a variação nas características do material em função de sua espessura, enquanto a anisotropia planar pode mensurar esta variação em várias direções no plano da chapa.

A anisotropia planar em chapas metálicas é causada principalmente pela direção de laminação. Durante o processamento das chapas, os grãos da microestrutura do material são alongados e alinhados pelos rolos laminadores. Assim, as propriedades do material podem ser divergentes quando avaliadas na mesma direção da laminação ou nas direções transversal ou perpendicular (ALTAN; TEKKAYA, 2012).

O grau de anisotropia de uma chapa metálica pode ser definido pela relação de deformação plástica (ou índice de anisotropia plástica), através da equação a seguir.

$$r = \frac{\varepsilon_{rb}}{\varepsilon_{rt}} \quad (4)$$

Onde:

r – índice de anisotropia plástica (adimensional);

ε_{rb} – deformação real na largura (adimensional);

ε_{rt} – deformação real na espessura (adimensional).

No entanto, conforme Garcia, Spim e Santos (2012), a espessura do material está sujeita a maior variação dimensional devido a processos anteriores, bem como maior erro relativo. Assim, também é possível obter o índice de anisotropia através da equação seguinte:

$$r = \frac{\ln\left(\frac{b_0}{b_{18}}\right)}{\ln\left(\frac{b_{18} \cdot L_{18}}{b_0 \cdot L_0}\right)} \quad (5)$$

Onde:

b_0 e L_0 – largura e comprimento iniciais do corpo de prova, respectivamente (mm);

b_{18} e L_{18} – largura e comprimento após 18% de deformação (valor arbitrário dentro da região de deformação plástica uniforme), respectivamente (mm).

Materiais com alto índice r possuem maior resistência à redução de espessura, sendo ideais para aplicação na estampagem profunda, enquanto materiais com baixo valor de r são mais propensos à ruptura durante a conformação (ALTAN; TEKKAYA, 2012).

2.3.2 Tensões residuais

Outra característica relevante para determinação da estampabilidade dos materiais se refere a presença de tensões residuais, que influenciam significativamente na deformação plástica e na susceptibilidade à fratura e fadiga.

Estas tensões são definidas como aquelas que permanecem no material após a remoção de uma força aplicada ou após uma variação significativa de temperatura, gerando deformações plásticas não uniformes (SOUZA, 2012).

Durante processos de conformação mecânica, cujo objetivo é a deformação plástica, determinadas regiões do material poderão deformar apenas elasticamente. Após a remoção da força externa, a região deformada elasticamente tenderá a retornar à sua forma original, mas será impedida pelo material deformado plasticamente, acarretando na retenção de tensões.

Ao aquecer determinado material a altas temperaturas, este será exposto a diferentes taxas de resfriamento ao longo de seu corpo. A superfície resfriará a uma taxa mais alta, comprimindo o material ainda quente ao centro, ocasionando tensões não uniformes.

As tensões residuais podem provocar mudanças dimensionais em peças, afetando sua estabilidade e resistência à deformação, além de exercer grande influência sobre a nucleação e/ou propagação de trincas (SOUZA, 2012).

2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS METAIS

Os métodos de caracterização analisam os aspectos de composição e estrutura de um material, expondo eventuais defeitos e propriedades relevantes no contexto de determinado processo. “O comportamento mecânico de qualquer material utilizado na engenharia é função de sua estrutura interna e de sua aplicação em projeto” (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012, p.1).

Através dos métodos que serão apresentados nos tópicos seguintes é possível obter informações importantes do material estudado, relativas à sua microestrutura (tamanho, forma, distribuição e fases presentes), bem como propriedades mecânicas como resistência, elasticidade e plasticidade.

2.4.1 Ensaio de dureza

Este ensaio consiste em aplicar uma carga na superfície da amostra utilizando um penetrador padronizado esférico ou pontiagudo fixado em um aparelho denominado durômetro, produzindo uma impressão superficial. A medida de dureza do material é obtida com base na profundidade e dimensões da impressão em função da carga aplicada. Com o resultado deste ensaio pode-se avaliar características de resistência à deformação permanente do material analisado.

O método Rockwell é o mais empregado internacionalmente, utilizando apenas a profundidade da impressão para medição da dureza, sem necessidade de correlacionar a área de impressão. O penetrador pode ser no formato esferocônico em diamante ou uma esfera de aço endurecido ou carboneto de tungstênio (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Já o método de dureza Vickers relaciona a carga aplicada a área superficial de impressão feita por um penetrador piramidal de diamante com base quadrada, sendo comumente aplicado em corpos de prova de espessura muito fina, pequenos e irregulares. A dureza Vickers é expressa pelo símbolo HV, seguido do valor de carga utilizado no ensaio e pelo tempo de aplicação da mesma. A Figura 13 apresenta um equipamento digital que pode calcular a dureza Vickers automaticamente através da indicação dos limites da impressão feitas pelo usuário.

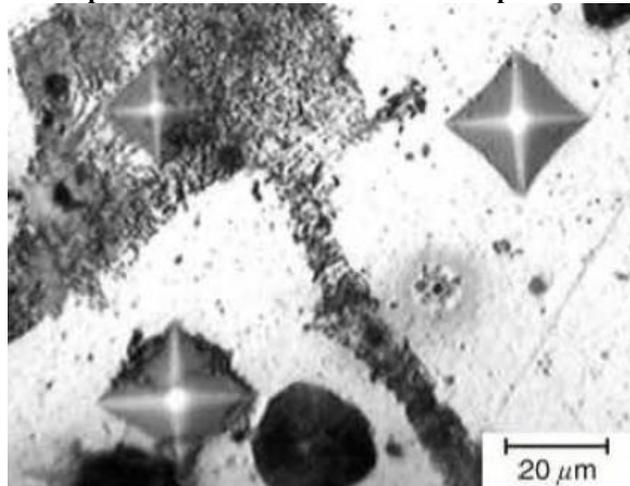
Figura 13 – Equipamento para ensaio de dureza Vickers



Fonte: Garcia; Spim; Santos, 2012

Para determinação da dureza em constituintes individuais de uma microestrutura é utilizado o ensaio de microdureza, aplicando o método Vickers com cargas inferiores a 1 kgf, sendo que a área de impressão resultante deve ser mensurada com auxílio de um microscópio. Por este motivo, este ensaio exige a preparação do corpo de prova através de polimento e ataque químico a fim de expor as fases presentes e as regiões onde serão realizadas as medições (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012). A Figura 14 apresenta a impressão resultante em uma amostra de ferro fundido nodular, onde se observa a fase clara constituída por ferrita e a fase escura constituída por perlita.

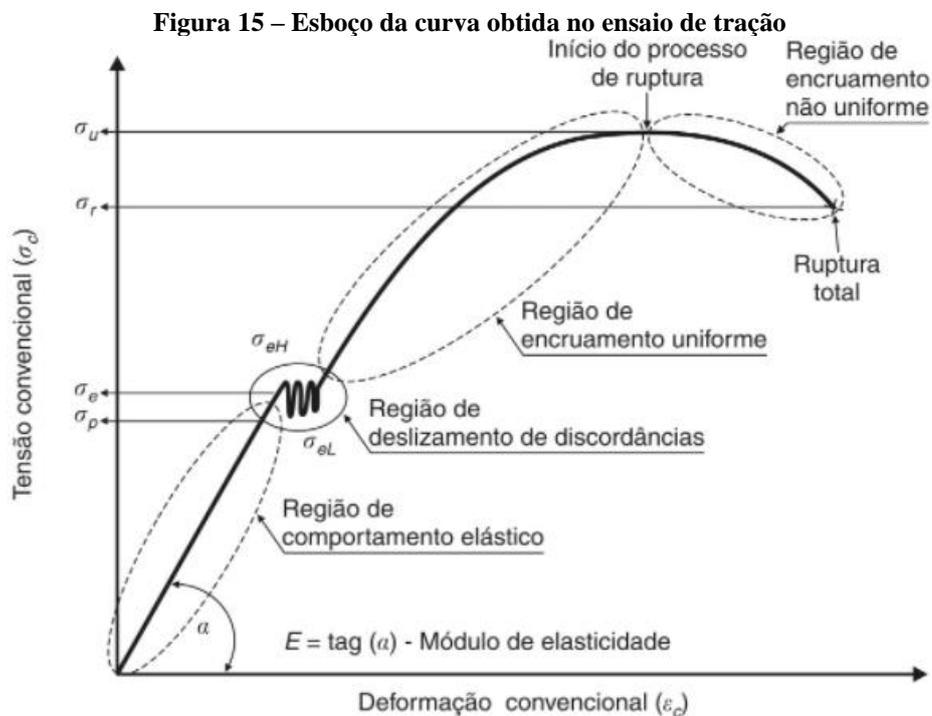
Figura 14 – Impressão realizada em ferro nodular pelo método Vickers



Fonte: Garcia; Spim; Santos, 2012

2.4.2 Ensaio de tração

Este ensaio mecânico consiste em tracionar lentamente uma amostra de material através de uma força axial até sua ruptura. Os corpos de prova devem possuir formato e dimensões padronizados por normas técnicas. Assim, é possível medir a variação de comprimento em função da carga aplicada, obtendo uma curva tensão *versus* deformação do material analisado, conforme exemplificado na Figura 15 a seguir.



Fonte: Garcia; Spim; Santos, 2012

As principais características mecânicas que podem ser avaliadas neste ensaio são: limite de resistência a tração (σ_u na Figura 15), limite de proporcionalidade (σ_p na Figura 15), limite de escoamento (σ_e na Figura 15), módulo de elasticidade, módulo de tenacidade, coeficiente de encruamento, coeficiente de resistência e dados relativos à ductilidade como estricção e alongamento (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Tendo a carga aplicada durante o ensaio e dimensões do corpo de prova conforme preconiza a norma técnica, a tensão aplicada na amostra é calculada com a equação a seguir:

$$\sigma = \frac{P}{S_0} \quad (6)$$

Onde:

σ – tensão (Pa);

P – carga aplicada (N);

S_0 – seção transversal original (m²).

A deformação sofrida pelo material é calculada por:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (7)$$

Onde:

ε – deformação (adimensional);

L – comprimento para carga P aplicada (mm);

L_0 – comprimento inicial (mm);

ΔL – alongamento (mm).

A deformação elástica pode ser calculada conforme segue:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (8)$$

O módulo de elasticidade (E) pode ser calculado com alguns dos parâmetros mencionados nas equações anteriores, conforme abaixo:

$$E = \frac{P \cdot L_0}{S_0 \cdot \Delta L} \quad (9)$$

Os limites de proporcionalidade (σ_p) e escoamento (σ_e) podem ser obtidos diretamente na curva tensão-deformação resultante do ensaio de tração, conforme apresentado na Figura 15. A região da curva anterior ao limite de proporcionalidade é denominada região elástica. Ao exceder o limite de escoamento, a deformação sofrida pelo material torna-se permanente (deformação plástica). Por serem valores bastante próximos, é comum se atribuir que $\sigma_p \cong \sigma_e$ (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Nos casos em que o limite de escoamento não é perceptível na curva resultante, adota-se uma deformação padrão correspondente ao limite de escoamento, denominado limite n de escoamento. Segundo Garcia, Spim e Santos (2012), para aços e ligas em geral, assume-se $n =$

0,2% ($\varepsilon = 0,002$) e para metais de grande ductilidade $n = 0,5\%$ ($\varepsilon = 0,005$). Nestes casos, deve-se traçar uma linha paralela à região elástica da curva, partindo deste valor de deformação (ε), e definir σ_e na intersecção da linha paralela com a curva tensão-deformação.

Ao atingir a tensão máxima (σ_{max}) e iniciar a fase de ruptura, ocorre na amostra uma rápida redução local da seção de fratura, denominada estrição, sendo seu coeficiente calculado conforme equação a seguir.

$$\varphi = \left(\frac{S_0 - S_f}{S_0} \right) \cdot 100\% \quad (10)$$

Onde:

φ – coeficiente de estrição (%);

S_0 – seção transversal inicial da mostra (m²);

S_f – seção estrita medida após a fratura (m²).

2.4.3 Metalografia

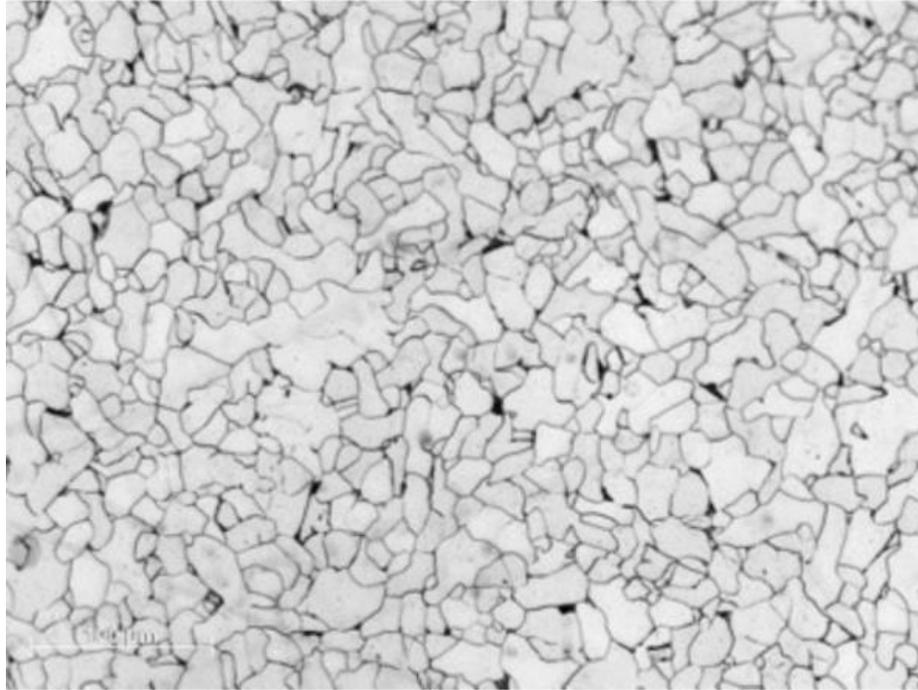
A metalografia visa expor dados acerca do histórico de fabricação do material através da análise visual da sua superfície previamente polida e atacada quimicamente.

O exame macroscópico pode ser feito a olho nu ou com aumento óptico de até 10 vezes, resultando em informações quanto à homogeneidade, processos de fabricação e presença de eventuais impurezas e sua natureza. Já o exame microscópico é realizado com aumento óptico superior a 10 vezes, podendo se observar a granulação do material, natureza, distribuição e forma de diversos constituintes e certas inclusões (COLPAERT, 2008; SANTOS, 2019).

Para os materiais metálicos, uma das principais aplicações da análise metalográfica é a verificação de defeitos cristalinos. Com esta técnica é possível avaliar tamanho de grão, linhas de fluxo, variação da composição química como regiões de segregação e inclusões, bem como a presença de eventuais trincas e fraturas (SANTOS, 2019).

A Figura 16 a seguir apresenta a micrografia de uma amostra de aço 1006 com aumento óptico de 200 vezes. Nesta microestrutura é possível observar ferrita em cor clara e inclusões de cementita nos pontos aglomerados de cor escura.

Figura 16 – Micrografia do aço 1006

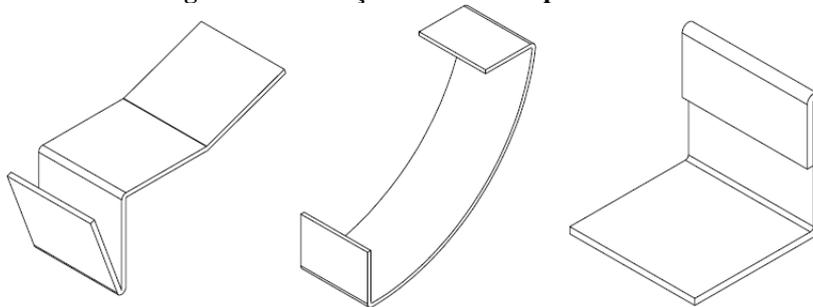


Fonte: Santos, 2019

3 METODOLOGIA

Com o intuito de avaliar o comportamento do material e suas propriedades mecânicas, foram produzidas algumas amostras com diferentes dobras, como apresentado na Figura 17. As dimensões destas peças podem ser conferidas no APÊNDICE A. Conforme relatam os profissionais do setor de dobra de uma caldeiraria na zona norte de Joinville, as diferenças entre chapas laminadas a frio e a quente tendem a ser mais evidentes em peças com estas geometrias.

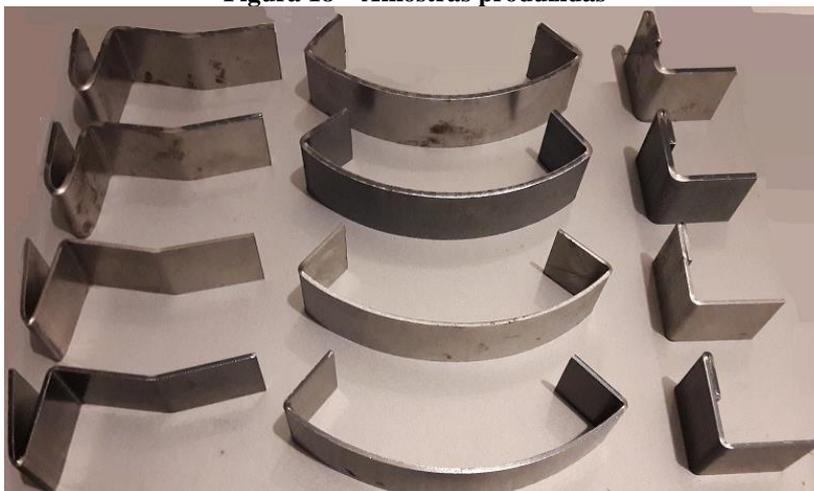
Figura 17 – Esboço das amostras produzidas



Fonte: elaborado pelo autor, 2021

Cada um destes modelos foi produzido em quatro variações de material: aço 1008 laminado a frio em espessura de 2mm (neste trabalho denominado como LF-2), aço 1008 laminado a quente em espessura de 2mm (LQ-2), aço 1008 laminado a frio em espessura de 3,18mm (LF-3) e aço 1008 laminado a quente em espessura de 3,18mm (LQ-3). Deste modo, os fatores variados foram: temperatura de laminação (frio e a quente), espessura da chapa (2 e 3,18mm) e a geometria do corpo de prova (três modelos), ou seja, dois fatores com dois níveis de variação e um fator com três níveis, cada qual com três repetições, totalizando 36 amostras. Na Figura 18 observa-se uma peça de cada material e espessura.

Figura 18 – Amostras produzidas



Fonte: elaborado pelo autor, 2021

A empresa Multiaços, fornecedora da matéria-prima, informou a composição química do aço 1008, conforme listado no Quadro 4

Quadro 4 – Composição química do aço 1008

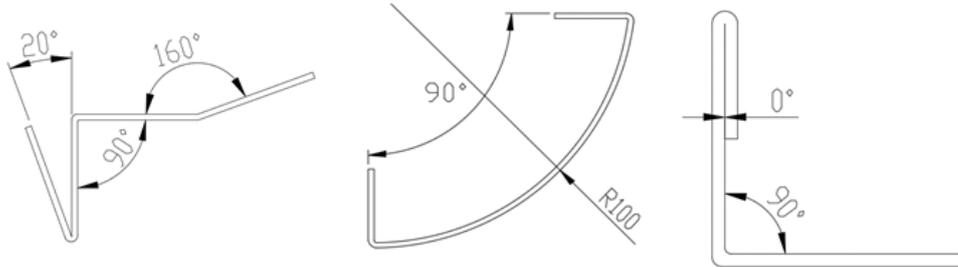
	Percentual em peso						
	C	Mn	Si	P	S	Al	Cr
Aço 1008 2,00mm	0,063	0,333	0,005	0,013	0,006	0,038	0,027
Aço 1008 3,18mm	0,063	0,280	0,010	0,013	0,017	0,055	0,007

Fonte: Multiaços Indústria e Comércio de Produtos Técnicos LTDA

Conforme norma NBR11888, a variação permissível de carbono para este material é de 0,03% para mais ou para menos. Já a variação permissível de manganês é de 0,05% para mais ou para menos.

Com estas amostras de dobra buscou-se cobrir diferentes faixas de ângulos, desde os mais abertos como 160° até os casos mais críticos com ângulos de 20° e 0° (material dobrado sobre si próprio), conforme mostrado em esboço na Figura 19. O desenvolvimento destas dobras foi realizado pelo método da linha neutra, conforme apresentado na seção 2.2.3.1 e em seguida as peças planificadas foram cortadas a laser em uma empresa de caldeiraria na zona norte de Joinville.

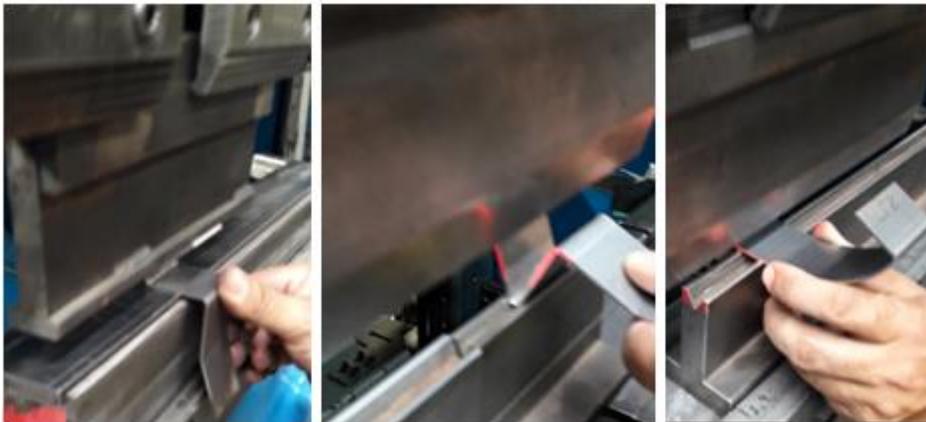
Figura 19 – Ângulos das peças produzidas



Fonte: elaborado pelo autor, 2021

As peças cortadas foram então dobradas na mesma empresa, utilizando uma dobradeira CNC da marca Gasparini modelo PSG 200, Figura 10, cuja carga máxima é de 200 toneladas. Para as dobras de 90°, 160° e R100mm foi utilizada a carga de 10 toneladas para a espessura de 2mm e 10,6 toneladas para a espessura de 3,18mm, valores calculados automaticamente pela interface CNC da máquina. Para as dobras mais críticas de 0° e 20° foi utilizada a carga de 53 toneladas para ambas as espessuras. A velocidade de dobramento para todos os casos foi de 10mm/s. A Figura 20 mostra algumas das etapas do processo de dobra realizado nas amostras mencionadas.

Figura 20 – Processo de dobra das amostras

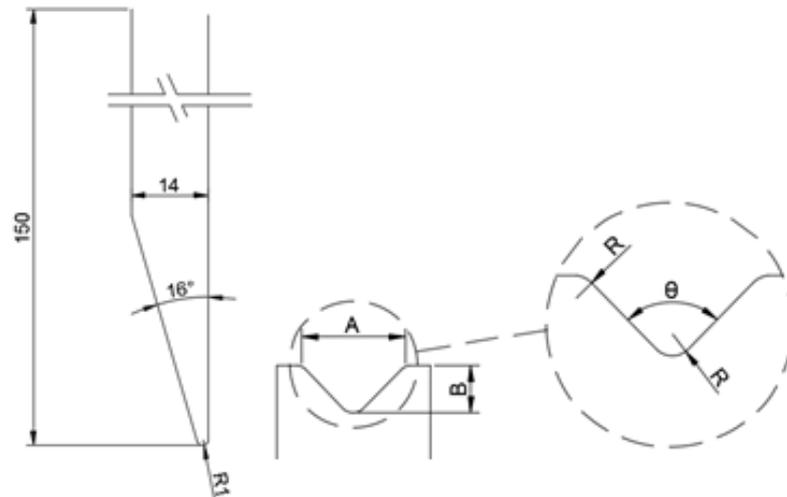


Fonte: elaborado pelo autor, 2021

Para realização do processo, foram utilizadas quatro matrizes com dimensões distintas, variando conforme a combinação de ângulo e espessura de chapa, conforme apresentado no Quadro 5. O punção utilizado foi o mesmo em todas as dobras. A interface CNC da máquina calcula o posicionamento da chapa sobre a matriz e o avanço do punção para obtenção da geometria pretendida, bastando ao operador informar alguns parâmetros de entrada como ângulo, espessura e largura da peça. Para os ângulos de 0° e 20°, além das ferramentas apresentadas no Quadro 5, também foi utilizado um pressionador para achatar a aba até o ângulo

pretendido, visto que estas dobras mais críticas não são possíveis de se obter apenas com a utilização das matrizes disponíveis.

Quadro 5 – Ferramentas de dobra utilizadas

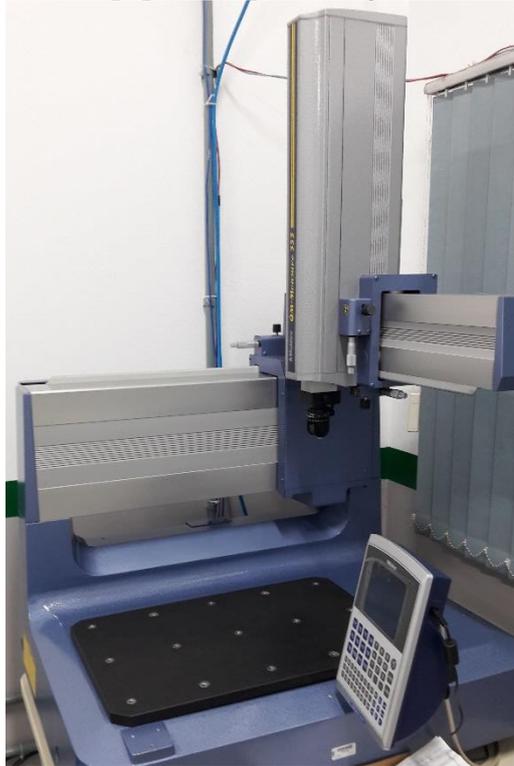


	A	B	R	Θ
Dobra 0° esp. 2,00mm	12mm	6mm	0,8mm	90°
Dobra 0° esp. 3,18mm	22mm	11mm	2mm	90°
Dobra 20° esp. 2,00mm	12mm	6mm	0,8mm	90°
Dobra 20° esp. 3,18mm	30mm	16mm	3mm	86°
Dobra 90° esp. 2,00mm	12mm	6mm	0,8mm	90°
Dobra 90° esp. 3,18mm	22mm	11mm	2mm	90°
Dobra 160° esp. 2,00mm	12mm	6mm	0,8mm	90°
Dobra 160° esp. 3,18mm	22mm	11mm	2mm	90°
R100mm esp. 2,00mm	16mm	8,3mm	2mm	88°
R100mm esp. 3,18mm	22mm	11mm	2mm	90°

Fonte: elaborado pelo autor, 2021

Com as amostras concluídas, as dimensões apresentadas na Figura 19 foram aferidas no laboratório de metrologia do IFSC Joinville, utilizando o equipamento de medição tridimensional apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Equipamento para medição tridimensional



Fonte: elaborado pelo autor, 2021

Os ensaios de tração foram realizados no laboratório de materiais do IFSC Joinville, em uma máquina universal de ensaios da marca Emic apresentada na Figura 22, cuja capacidade máxima é de 100 kN, sendo que os ensaios foram conduzidos a uma velocidade de 5mm/min.

Figura 22 – Máquina universal de ensaios

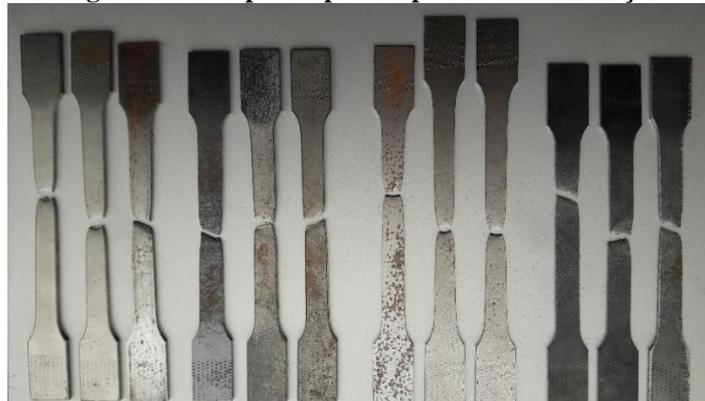


Fonte: elaborado pelo autor, 2021

Os corpos de prova para ensaios de tração foram produzidos através de corte a laser, respeitando a geometria e dimensões padronizadas pela norma técnica NBR6673. Os fatores variados foram: temperatura de laminação (a quente e a frio) e espessura da chapa (2 e 3,18mm), ou seja, dois fatores com dois níveis e três repetições. Todos estes corpos de prova foram cortados no sentido longitudinal da chapa, no mesmo sentido da laminação.

Na Figura 23 observa-se os corpos de prova após o rompimento pelo ensaio de tração. Da esquerda para direita tem-se: LF-2, LQ-2, LF-3 e LQ-3.

Figura 23 – Corpos de prova após o ensaio de tração



Fonte: elaborado pelo autor, 2021

Na análise metalográfica buscou-se observar a microestrutura das amostras nas linhas de dobra, comparando-as com regiões planas das mesmas peças. Para tanto, extraiu-se pequenos corpos de prova das amostras apresentadas na Figura 18, sendo que estes foram então embutidos em baquelite, conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Corpos de prova embutidos em baquelite



Fonte: elaborado pelo autor, 2021

A fim de eliminar riscos superficiais, as amostras embutidas foram preparadas em máquina de lixamento metalográfico, conforme Figura 25, utilizando lixas de granulometria 100, 220, 320, 400 e 600.

Figura 25 – Máquina de lixamento metalográfico



Fonte: elaborado pelo autor, 2021

Na sequência as amostras foram polidas em uma politriz apresentada na Figura 26, utilizando alumina como agente polidor.

Figura 26 – Politriz



Fonte: elaborado pelo autor, 2021

Após realizar o ataque químico da superfície utilizando solução de Nital a 2%, as amostras foram analisadas no microscópio Olympus do laboratório de materiais do IFSC Joinville, mostrado na Figura 27, com aumentos de 40x e 100x.

Figura 27 – Microscópio para análise metalográfica



Fonte: elaborado pelo autor, 2021

A dureza dos materiais foi mensurada nestes mesmos corpos de prova embutidos em baquelite, após a preparação metalográfica. Foi utilizado o microdurômetro Vickers do laboratório de materiais do IFSC Joinville, apresentado na Figura 28. Nestes ensaios foi aplicada uma carga de 100 gf durante 15 segundos, sendo que para efeitos de repetitividade foram realizadas três identações em cada corpo de prova.

Figura 28 – Microdurômetro Vickers



Fonte: elaborado pelo autor, 2021

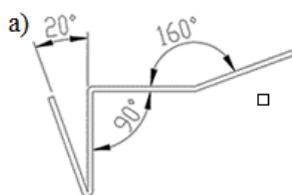
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Aplicando os conceitos apresentados anteriormente, bem como as técnicas de caracterização de materiais, foram obtidos os dados necessários para a análise comparativa das amostras produzidas.

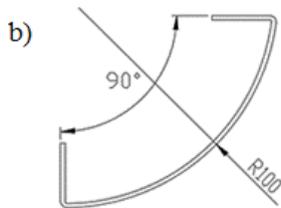
4.1 VARIAÇÃO DIMENSIONAL

As dimensões de ângulos e raios de todas as 36 amostras produzidas foram examinadas através de medição tridimensional conforme apresentado na Figura 21. No Quadro 6 a seguir observa-se a média e amplitude obtida para cada tipo de material.

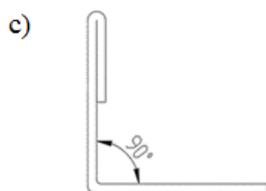
Quadro 6 – Ângulos e raios obtidos



	LF-2		LQ-2		LF-3		LQ-3	
	Média	Amplitude	Média	Amplitude	Média	Amplitude	Média	Amplitude
20°	17,27°	8,08	18,73	3,44	9,56	6,01	9,77	7,02
90°	89,90°	3,93	90,21°	0,33	90,02°	2,22	90,90°	3,15
160°	159,13°	1,04	159,46°	0,03	159,28°	0,13	159,60°	0,92



	LF-2		LQ-2		LF-3		LQ-3	
	Média	Amplitude	Média	Amplitude	Média	Amplitude	Média	Amplitude
90°	91,88°	2,49	91,67°	2,55	92,97°	1,94	92,38°	3,11
R100mm	97,13	12,17	101,39	14,07	98,62	12,43	101,04	11,42



	LF-2		LQ-2		LF-3		LQ-3	
	Média	Amplitude	Média	Amplitude	Média	Amplitude	Média	Amplitude
90°	89,45°	0,96	89,53°	3,05	89,52°	0,01	89,87°	1,33

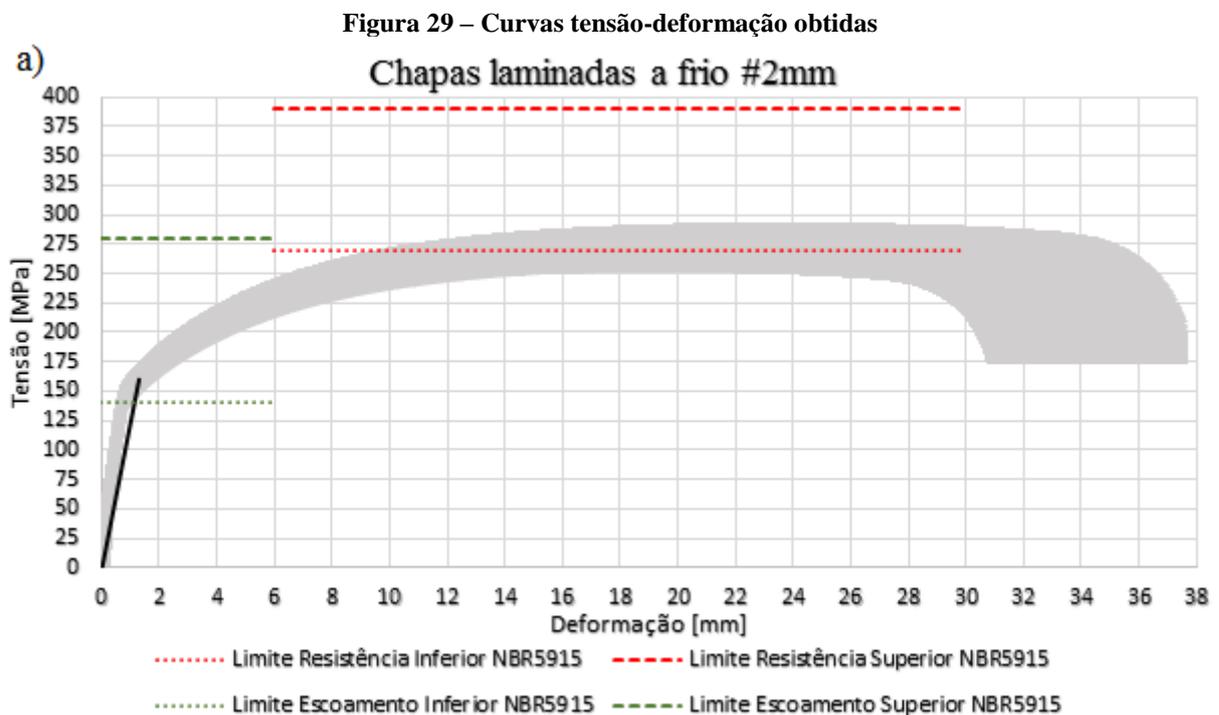
Fonte: elaborado pelo autor, 2021

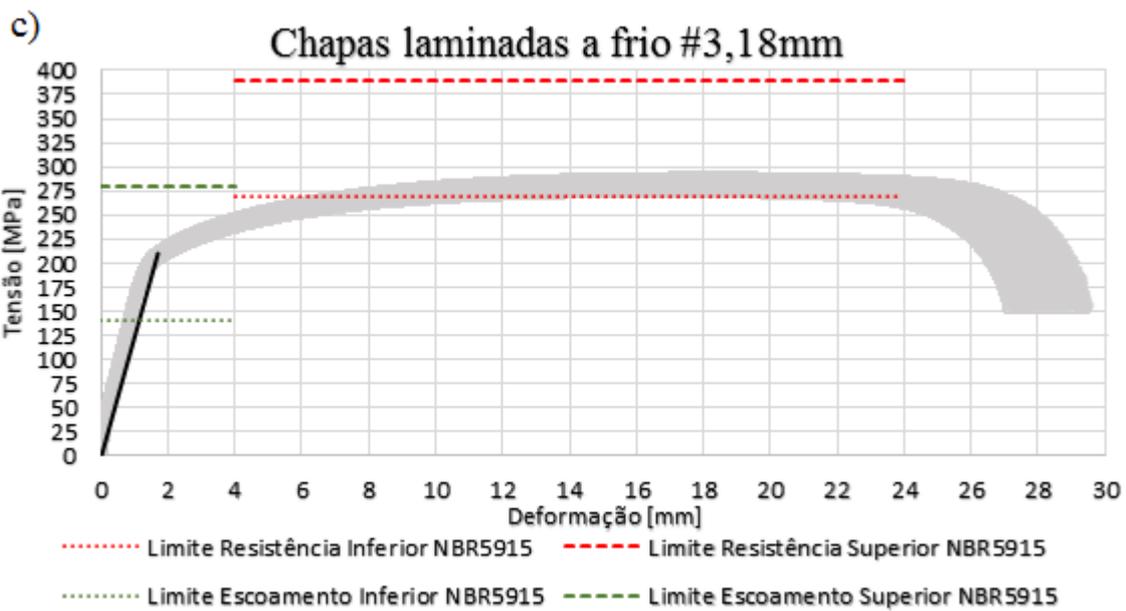
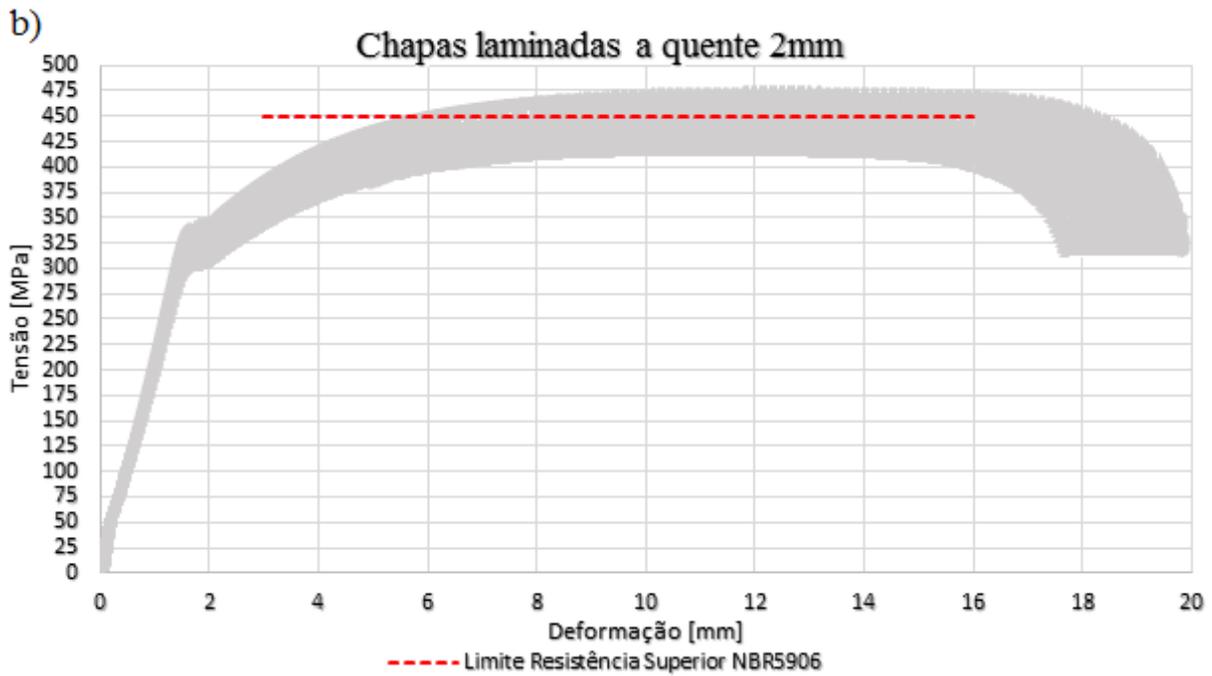
Com estes dados é possível notar que na espessura de 3,18mm a laminação a frio apresentou menor variação dimensional, já na espessura de 2mm não houve a mesma tendência entre os três modelos de peças. O ângulo de 20° em (a) apresentou maior discrepância em relação ao ângulo de projeto pois esta dobra não foi realizada no conjunto punção-matriz, e sim

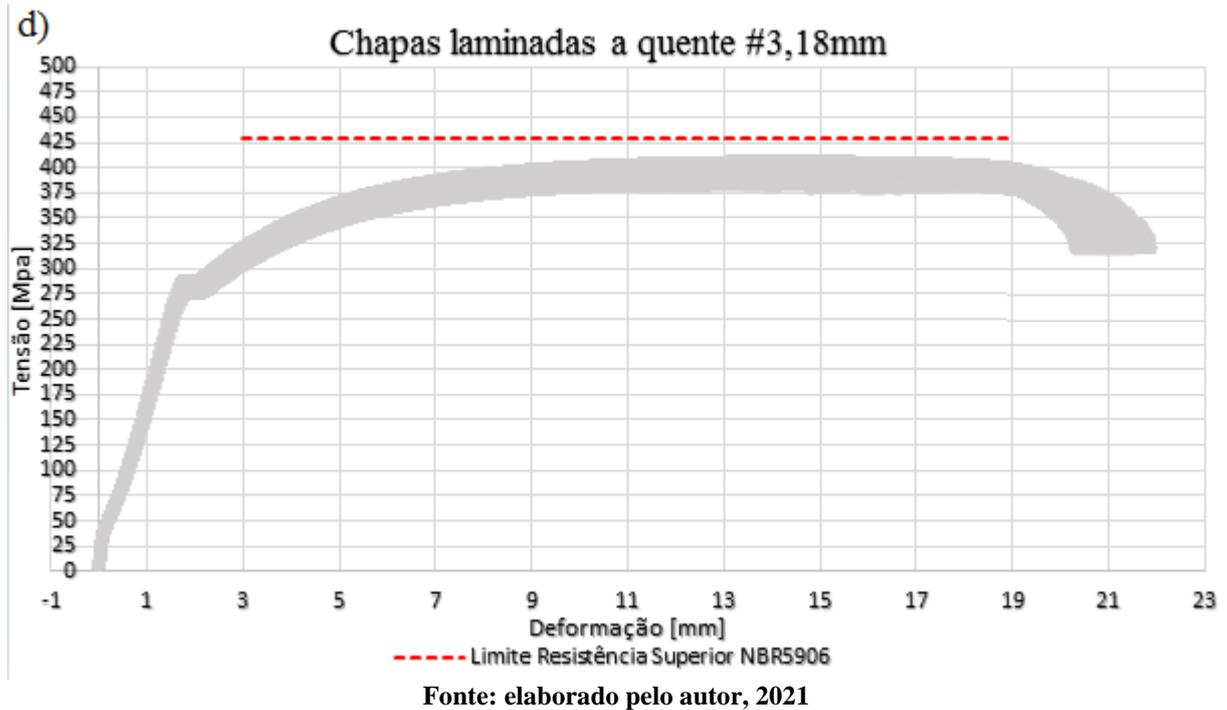
com o uso de um pressionador para amassar a aba, não sendo possível garantir muita precisão nesta operação.

4.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Na Figura 29, de (a) a (d), estão apresentadas as curvas tensão-deformação (T-d) obtidas nos ensaios de tração com as respectivas faixas de variação, visto que foram ensaiados doze corpos de prova (três para cada material). Nas curvas onde a região de escoamento não ficou perceptível (materiais LF), foi utilizada a técnica da linha paralela de deformação padrão, adotando $\varepsilon = 0,002$ (linha preta nos gráficos), conforme abordado na seção 2.4.2. Para fins de referência, nas curvas de materiais laminados a frio é apresentado também os limites de tensão máxima e tensão de escoamento expostos na norma NBR5915 para chapas destinadas a estampagem moderada (EM), conforme Quadro 3. Para os materiais laminados a quente, a norma NBR5906 apresenta apenas o valor máximo para o limite de resistência, sem especificar valores de tensão de escoamento nos materiais de estampagem moderada, conforme Quadro 2.







Através dos gráficos T-d algumas características importantes podem ser avaliadas. O módulo de elasticidade exerce influência nas demais propriedades mecânicas e pode ser calculado com a equação (9). Os valores de carga aplicada com o respectivo alongamento sofrido foram retirados da região elástica das curvas T-d.

$$\text{LF-2:} \quad E = \frac{2751,6 \cdot 0,075}{\frac{12,5 \cdot 2}{10^6} \cdot 4,7493 \cdot 10^{-4}} = 17,38 \text{ GPa} \quad (11)$$

$$\text{LQ-2:} \quad E = \frac{2750 \cdot 0,075}{\frac{12,5 \cdot 2}{10^6} \cdot 4,5442 \cdot 10^{-4}} = 18,16 \text{ GPa} \quad (12)$$

$$\text{LF-3:} \quad E = \frac{4125 \cdot 0,075}{\frac{12,5 \cdot 3,18}{10^6} \cdot 6,9007 \cdot 10^{-4}} = 11,28 \text{ GPa} \quad (13)$$

$$\text{LQ-3:} \quad E = \frac{4129 \cdot 0,075}{\frac{12,5 \cdot 3,18}{10^6} \cdot 6,702 \cdot 10^{-4}} = 11,62 \text{ GPa} \quad (14)$$

Utilizando a equação (2) calcula-se o menor raio de dobra possível de se obter com estes materiais. Para a deformação percentual, analogamente a equação (7), considera-se o

comprimento útil do corpo de prova com sua respectiva variação no ponto σ_{esc} obtido nos gráficos.

$$\text{LF-2:} \quad R_{min} = \frac{2,00}{2 \cdot \frac{76,4 - 75}{75} \cdot 100} = 0,5357mm \quad (15)$$

$$\text{LQ-2:} \quad R_{min} = \frac{2,00}{2 \cdot \frac{76,3 - 75}{75} \cdot 100} = 0,5769mm \quad (16)$$

$$\text{LF-3:} \quad R_{min} = \frac{3,18}{2 \cdot \frac{76,7 - 75}{75} \cdot 100} = 0,7015mm \quad (17)$$

$$\text{LQ-3:} \quad R_{min} = \frac{3,18}{2 \cdot \frac{76,6 - 75}{75} \cdot 100} = 0,7453mm \quad (18)$$

Com os dados do material é possível prever o efeito do retorno elástico através da equação (3). Supondo uma conformação com raio inicial de 3mm, após a liberação da carga, devido ao retorno elástico, o raio final da dobra será:

$$\text{LF-2:} \quad \frac{3}{R_f} = 4 \cdot \left(\frac{3 \cdot 160}{17380 \cdot 2} \right)^3 - 3 \cdot \left(\frac{3 \cdot 160}{17380 \cdot 2} \right) + 1 = 3,130mm \quad (19)$$

$$\text{LQ-2:} \quad \frac{3}{R_f} = 4 \cdot \left(\frac{3 \cdot 300}{18160 \cdot 2} \right)^3 - 3 \cdot \left(\frac{3 \cdot 300}{18160 \cdot 2} \right) + 1 = 3,241mm \quad (20)$$

$$\text{LF-3:} \quad \frac{3}{R_f} = 4 \cdot \left(\frac{3 \cdot 210}{11280 \cdot 3,18} \right)^3 - 3 \cdot \left(\frac{3 \cdot 210}{11280 \cdot 3,18} \right) + 1 = 3,167mm \quad (21)$$

$$\text{LQ-3:} \quad \frac{3}{R_f} = 4 \cdot \left(\frac{3 \cdot 280}{11620 \cdot 3,18} \right)^3 - 3 \cdot \left(\frac{3 \cdot 280}{11620 \cdot 3,18} \right) + 1 = 3,219mm \quad (22)$$

Os valores de retorno elástico obtidos não foram testados devido ao equipamento utilizado para realizar as dobras ser uma máquina CNC, não sendo possível introduzir estes valores na programação do equipamento.

Com o alongamento sofrido pelos corpos de prova ao final do ensaio, calcula-se a deformação dos materiais conforme equação (7).

$$\text{LF-2:} \quad \varepsilon = \frac{34}{75} = 0,453 \quad (23)$$

$$\text{LQ-2:} \quad \varepsilon = \frac{18}{75} = 0,240 \quad (24)$$

$$\text{LF-3:} \quad \varepsilon = \frac{28}{75} = 0,373 \quad (25)$$

$$\text{LQ-3:} \quad \varepsilon = \frac{21}{75} = 0,280 \quad (26)$$

Após a fratura, a seção transversal dos corpos de prova é alterada devido ao efeito de estricção. O Quadro 7 a seguir apresenta a média e amplitude das dimensões de largura e espessura após o ensaio.

Quadro 7 – Dimensões da seção transversal após o ensaio de tração

	LF-2		LQ-2		LF-3		LQ-3	
	Média	Amplitude	Média	Amplitude	Média	Amplitude	Média	Amplitude
Largura [mm]	7,70	0,80	9,83	0,40	7,97	0,70	9,67	0,5
Espessura [mm]	1,47	0,10	1,73	0,20	2,00	0,40	2,50	0

Fonte: elaborado pelo autor, 2021

Com a área da seção transversal pode-se obter o coeficiente de estricção, conforme equação (10).

$$\text{LF-2:} \quad \varphi = \frac{(12,5 \cdot 2) - (7,7 \cdot 1,47)}{12,5 \cdot 2} \cdot 100\% = 54,724\% \quad (27)$$

$$\text{LQ-2:} \quad \varphi = \frac{(12,5 \cdot 2) - (9,83 \cdot 1,73)}{12,5 \cdot 2} \cdot 100\% = 31,976\% \quad (28)$$

$$\text{LF-3:} \quad \varphi = \frac{(12,5 \cdot 3,18) - (7,97 \cdot 2)}{12,5 \cdot 3,18} \cdot 100\% = 59,899\% \quad (29)$$

$$\text{LQ-3:} \quad \varphi = \frac{(12,5 \cdot 3,18) - (9,67 \cdot 2,5)}{12,5 \cdot 3,18} \cdot 100\% = 39,182\% \quad (30)$$

Ainda com o valor de ϵ na seção transversal, é possível calcular o índice de anisotropia plástica conforme equação (4).

$$\text{LF-2:} \quad r = \frac{\frac{7,7 - 12,5}{12,5}}{\frac{1,47 - 2}{2}} = 1,449 \quad (31)$$

$$\text{LQ-2:} \quad r = \frac{\frac{9,83 - 12,5}{12,5}}{\frac{1,73 - 2}{2}} = 1,582 \quad (32)$$

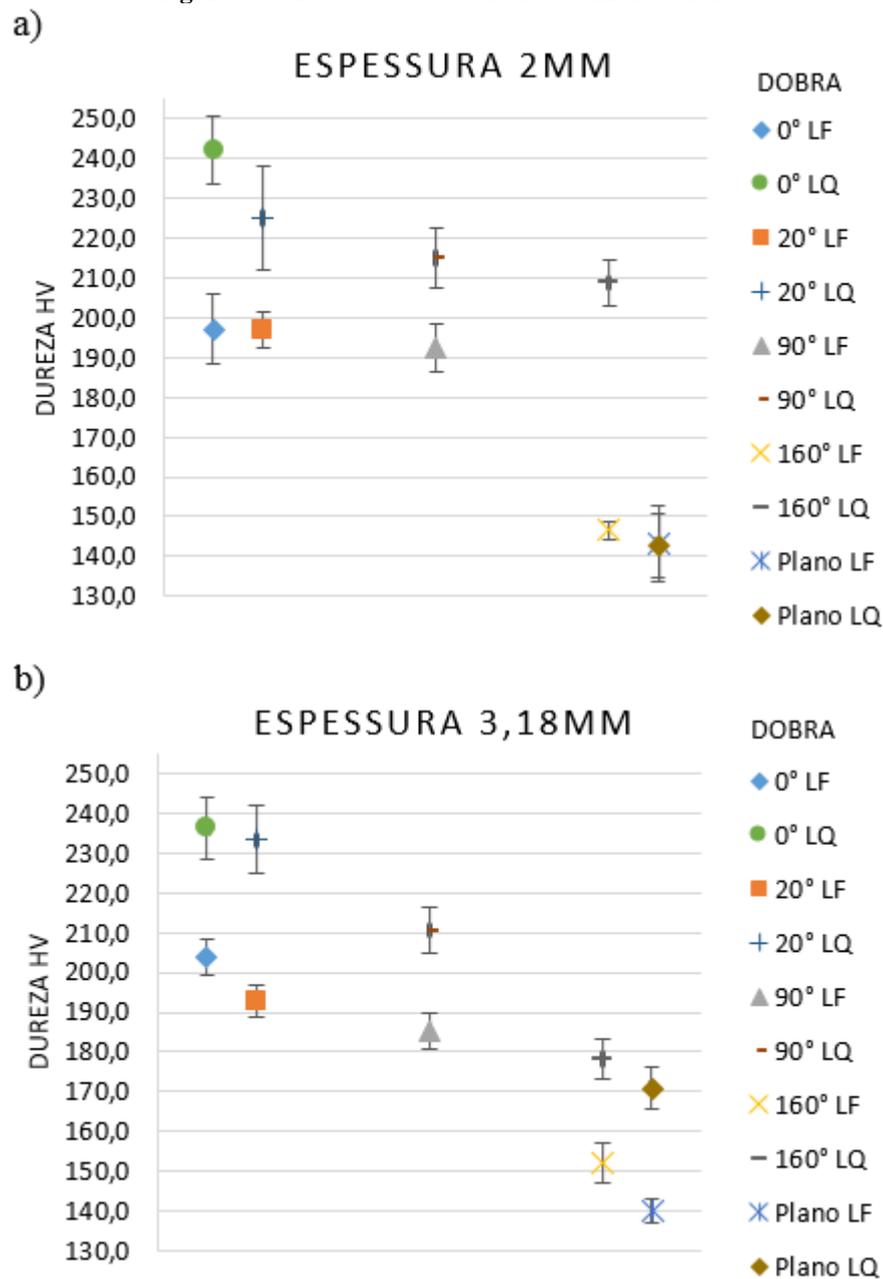
$$\text{LF-3:} \quad r = \frac{\frac{7,97 - 12,5}{12,5}}{\frac{2 - 3,18}{3,18}} = 0,977 \quad (33)$$

$$\text{LQ-3:} \quad r = \frac{\frac{9,67 - 12,5}{12,5}}{\frac{2,5 - 3,18}{3,18}} = 1,06 \quad (34)$$

4.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA

Os ensaios de microdureza foram realizados em amostras retiradas das linhas de dobra das peças produzidas, bem como da região plana das mesmas para comparação, como pode ser observado na Figura 24. Os gráficos da Figura 30 a seguir apresentam a faixa de valores (máximo e mínimo) para dureza Vickers obtida em cada situação de conformação.

Figura 30 – Resultados dos ensaios de microdureza



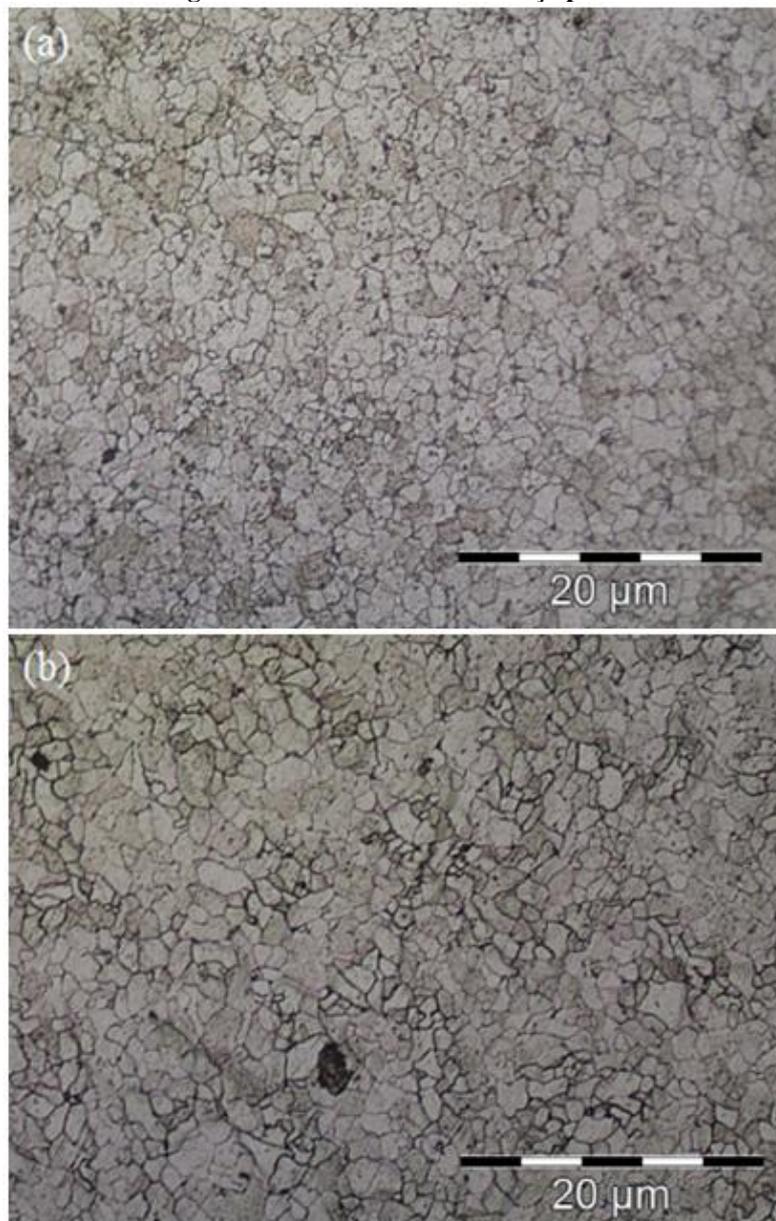
Com os ensaios de microdureza é possível quantificar o encruamento do material nas linhas de dobra analisadas, com maiores valores de dureza representando maior deformação sofrida pelo material. Ainda, percebe-se maior resistência à deformação nas chapas LQ, de forma análoga aos maiores valores de tensão observados na Figura 29 para este material.

4.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA

A análise metalográfica revelou a microestrutura do aço hipoeutetóide composta predominantemente por ferrita, com poucos pontos de perlita presentes (pontos pretos nas imagens). Todas as fotos a seguir foram feitas em microscópio óptico com ampliação de 100 vezes.

A Figura 31 a seguir apresenta a microestrutura do aço plano, antes do processo de dobramento, sendo (a) chapa laminada a frio e (b) chapa laminada a quente.

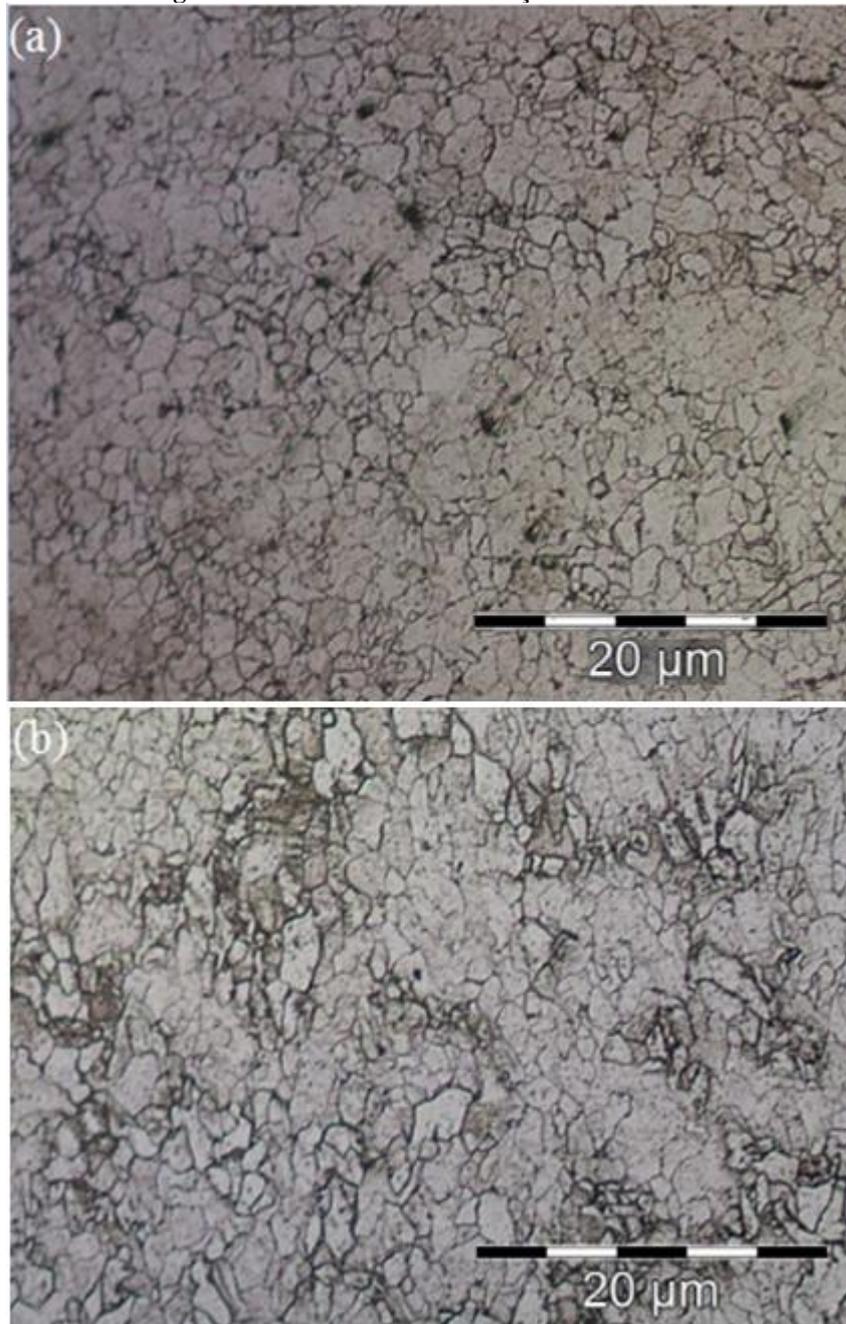
Figura 31 – Microestrutura do aço plano



Fonte: elaborado pelo autor, 2021

A Figura 32 apresenta a microestrutura do aço após a dobra de 20°, em (a) chapa laminada a frio e (b) chapa laminada a quente. Nestas imagens nota-se alguma deformação dos grãos, sobretudo na chapa laminada a quente.

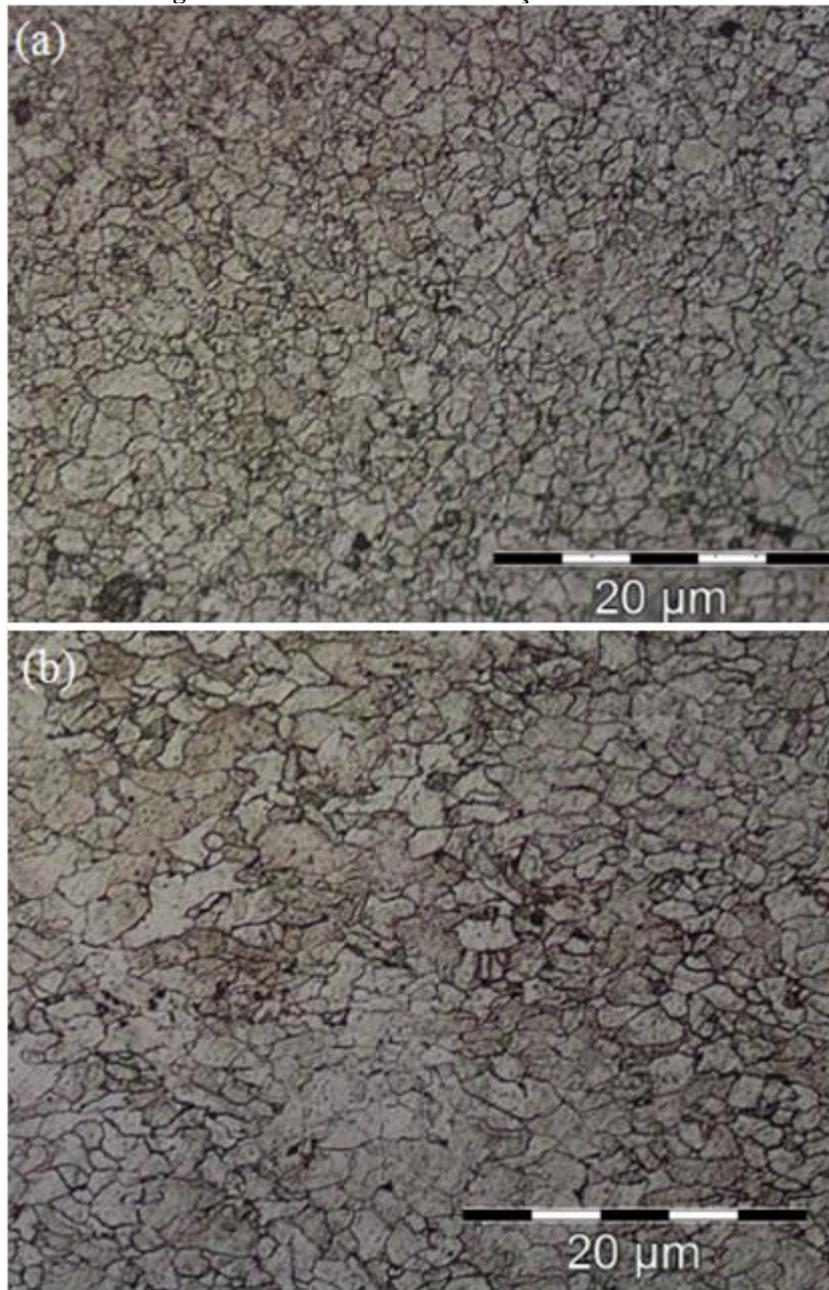
Figura 32 – Microestrutura do aço dobrado a 20°



Fonte: elaborado pelo autor, 2021

Já na Figura 33 observa-se a microestrutura após a dobra de 0°, sendo (a) chapa laminada a frio e (b) chapa laminada a quente. Neste caso, em ambos os materiais é possível perceber que os grãos à esquerda estão alongados horizontalmente se comparados com os grãos à direita, evidenciando a deformação sofrida na linha de dobra.

Figura 33 – Microestrutura do aço dobrado a 0°



Fonte: elaborado pelo autor, 2021

A metalografia nas linhas de dobra a 90° e 160° não apresentou notável variação no tamanho e formato dos grãos, sendo bastante semelhante à Figura 31, evidenciando que estes ângulos de dobra não afetam o padrão microestrutural do material de forma explícita.

5 CONCLUSÕES

A análise dimensional apresentada no Quadro 6 demonstra por método empírico que as chapas laminadas a quente possuem maior propensão ao efeito de retorno elástico. Considerando dimensões iguais, o mesmo processo de dobra foi realizado em todas as amostras, sem processo de calibração posterior. Assim, ângulos e raio mais abertos indicam a tendência do material ao retorno a seu estado plano, exceto no ângulo de 90° do Quadro 6(b) onde, devido à geometria da peça, valores menores indicam maior retorno elástico. Verificou-se também que em alguns casos este efeito pode ser benéfico, como no ângulo de 160° e no raio de 100mm, onde o retorno elástico resultou em medidas mais próximas à do projeto, no entanto este comportamento tende a ser bastante imprevisível.

O retorno elástico também foi avaliado por método algébrico nas equações (19) a (22), evidenciando que este comportamento é mais expressivo nas chapas LQ. Este resultado corrobora com aquele obtido na prática e exposto no Quadro 6.

Os diagramas tensão-deformação obtidos nos ensaios de tração, Figura 29, deixam claro que as chapas laminadas a frio não apresentam uma região de escoamento perceptível, ao contrário das chapas laminadas a quente. A região de escoamento indica a presença de discordâncias na microestrutura do material que estão deslizando durante o ensaio, conforme apresentado na Figura 15. Este deslizamento de discordâncias pode acarretar em tensões residuais no material, situação indesejada nos processos de dobramento e estampagem, conforme abordado na seção 2.3.2. Assim é possível concluir que as chapas LF constituem um material mais homogêneo, apresentando uma curva mais suave e com escoamento contínuo devido à ausência de discordâncias em sua microestrutura.

Ainda, observa-se nos gráficos que os valores de σ_{max} , σ_{esc} e ϵ estão dentro dos valores expostos na norma NBR 5915 para um aço de estampagem moderada (EM) laminado a frio e na norma NBR 5906 para um aço EM laminado a quente.

O módulo de elasticidade, calculado nas equações (11) a (14), determinou a rigidez do material, concluindo que as chapas LQ são mais rígidas que as LF. Conforme apresentado na equação (9), esta propriedade é inversamente proporcional ao alongamento, como foi demonstrado na Figura 23 e nas equações (23) a (26), onde os corpos de prova laminados a frio tiveram deformação (ϵ) consideravelmente maior que aqueles laminados a quente, evidenciando maior ductilidade das chapas laminadas a frio.

Esta característica de rigidez também foi perceptível nos cálculos de raio mínimo de dobra, equações (15) a (18), indicando que menores raios são possíveis com chapas LF devido sua menor rigidez, apesar de a diferença não ser muito expressiva. Ainda, os valores de raio mínimo obtidos são inferiores ao raio do punção utilizado (Quadro 5), o que indica que as dobras realizadas têm baixa possibilidade de apresentar trincas, fato que foi observado visualmente e através de estereoscópio nas amostras produzidas.

Os coeficientes de estricção, obtidos nas equações (27) a (30), indicam que as chapas LF constituem a melhor opção para o processo de estampagem profunda, onde há necessidade de uma redução considerável na espessura sem o rompimento do material.

Nas equações (31) a (34), o índice de anisotropia plástica sugere que os materiais LQ podem ter suas propriedades mecânicas afetadas com maior intensidade dependendo da direção da chapa analisada. Esta é uma característica prejudicial pois, considerando um lote de peças seriadas, pode resultar em atributos divergentes no produto. Ainda, os valores de anisotropia elevados (acima de 1,0) indicam que a resistência a redução de espessura é elevada, o que está dentro das características de um material EM apresentado na NBR 5915.

Os ensaios de dureza revelaram uma linearidade em todos os materiais, considerando a situação de conformação analisada. Quanto menor o ângulo de dobra verificado, maior é a deformação sofrida pelo material, resultando em maior encruamento e, por consequência, maior valor de dureza.

De modo geral, as chapas laminadas a quente apresentaram dureza superior as chapas laminadas a frio. Este resultado era esperado, tendo por base os resultados do ensaio de tração, pois a dureza quantifica a resistência do material à deformação permanente. Como as chapas LQ demonstraram maior resistência nos diagramas T-d, maiores valores de dureza se mostraram coerentes.

Com a análise metalográfica das amostras foi possível constatar que o processo de dobramento não acarreta em trincas ou falhas na microestrutura dos materiais. O alongamento dos grãos observado na Figura 32 e Figura 33 era esperado, porém este efeito não ficou visível em todos os ângulos de dobra. Vale destacar também a diferença no tamanho dos grãos, que nas chapas LQ são ligeiramente maiores, efeito das altas temperaturas de processamento durante a laminação.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho acadêmico analisou as principais diferenças nas propriedades mecânicas entre chapas metálicas laminadas a frio e laminadas a quente.

Com os resultados obtidos, concluiu-se que as chapas laminadas a frio constituem melhor opção para o processo de dobramento. Maior ductilidade e menor rigidez são as principais características que corroboram com esta afirmação que, aliado ao menor índice de anisotropia, fazem com que o material LF seja menos propenso ao retorno elástico. Ainda, a ausência de discordâncias microestruturais atribuem melhor qualidade superficial, conferindo às peças produzidas melhor aspecto visual.

6 REFERÊNCIAS

ALTAN, Taylan; TEKKAYA, Erman. **Sheet metal forming: fundamentals**. 1. ed. Ohio: ASM International, 2012. 231 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5906**: Bobinas e chapas laminadas a quente de aço carbono para estampagem - Especificação. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5915-2**: Chapas e bobinas de aço laminados a frio – Parte 2: aços para estampagem. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6673**: Produtos planos de aço – Determinação das propriedades mecânicas à tração. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11888**: Bobinas e chapas finas a frio e a quente de aço carbono e de aço de alta resistência e baixa liga – Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2015.

BARBOSA, Geraldo M. Processo de dobramento de chapas metálicas. **Exacta**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 109-120, 2009.

BRESCIANI FILHO, Ettore. **Conformação plástica dos metais**. 6. ed. Campinas: UNICAMP, 2011. 254 p.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 882 p.

CERCEAU, Cristiano R. **Estampabilidade de chapas finas laminadas a quente**. 2004. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2004.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2005. 599 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**: processos de fabricação e tratamento. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 315 p.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2008. 652 p.

ETW CLOUD. **Stamping die for car door panel**. Disponível em: < <https://www.etwinternational.mx/5-automotive-mold201093-63483.html>>. Acesso em 20 mar 2021.

FARIA, Alfredo R; REGO, Ronnie. **Conformação de chapas**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2021. 104 p. Disponível em: < http://www.mec.ita.br/~arfaria/MT717_08.pdf>. Acesso em 20 mar 2021.

FILHO, Célio A.; GORNI Antonio A; SILVEIRA, José H. D. Efeito do processo de laminação a quente sobre as propriedades mecânicas de chapas finas de aço I.F. laminadas a frio. **Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos**. Ouro Preto, v.39, p.1-10, 2002.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A.; SANTOS, Carlos A. **Ensaio dos materiais**. 2ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 365 p.

GASPARINI. **Press brakes**. Disponível em: < <https://www.gasparini.com/en/press-brakes/>>. Acesso em 27 mar 2021.

GURU. **Estampos de corte**: o que são, para que servem e quais as principais operações. Disponível em: < <https://cad.cursosguru.com.br/estampo-de-corte-o-que-sao-para-que-servem-e-quais-as-principais-operacoes>>. Acesso em 20 mar 2021.

HARSLE. **Products**. Disponível em: < <https://www.harsle.com/product-list.html>>. Acesso em 27 mar 2021.

HAUS, S. A. et al. Estudo do retorno elástico em dobramento de chapas metálicas. **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. São Luís, p.1-8, 2012.

KARAAĞAÇ, İbrahim. The evaluation of process parameters on springback in v-bending using the flexforming process. **Materials Research**, Ancara, v.20, n.5, p.1291-1299, 2017.

MARCONDES, Paulo V. P. **Manufatura de chapas metálicas – dobramento**. 1 ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2014. 6p.

OLIVEIRA, Valter V. **Estampagem**. Joinville: Instituto Federal de Santa Catarina, 2011. 51 p. Disponível em:

<http://joinville.ifsc.edu.br/~valterv/Tecnologia_de_Fabricacao/Aula%209_Estampagem.pdf>. Acesso em 27 mar 2021.

ROCHA, Otávio F. L. **Conformação mecânica**. Belém: Instituto Federal do Pará, 2012. 68 p. Disponível em:

<http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_metal/conform_mec/161012_confor_mec.pdf>. Acesso em 27 mar 2021.

ROLLERI. **Bending solutions**. Disponível em: <

<https://www.rolleritools.com/products/bending-solutions/tools.html>>. Acesso em 27 mar 2021.

SANTOS, Givanildo A. **Tecnologia dos Materiais Metálicos**. São Paulo: Érica, 2019. 192 p.

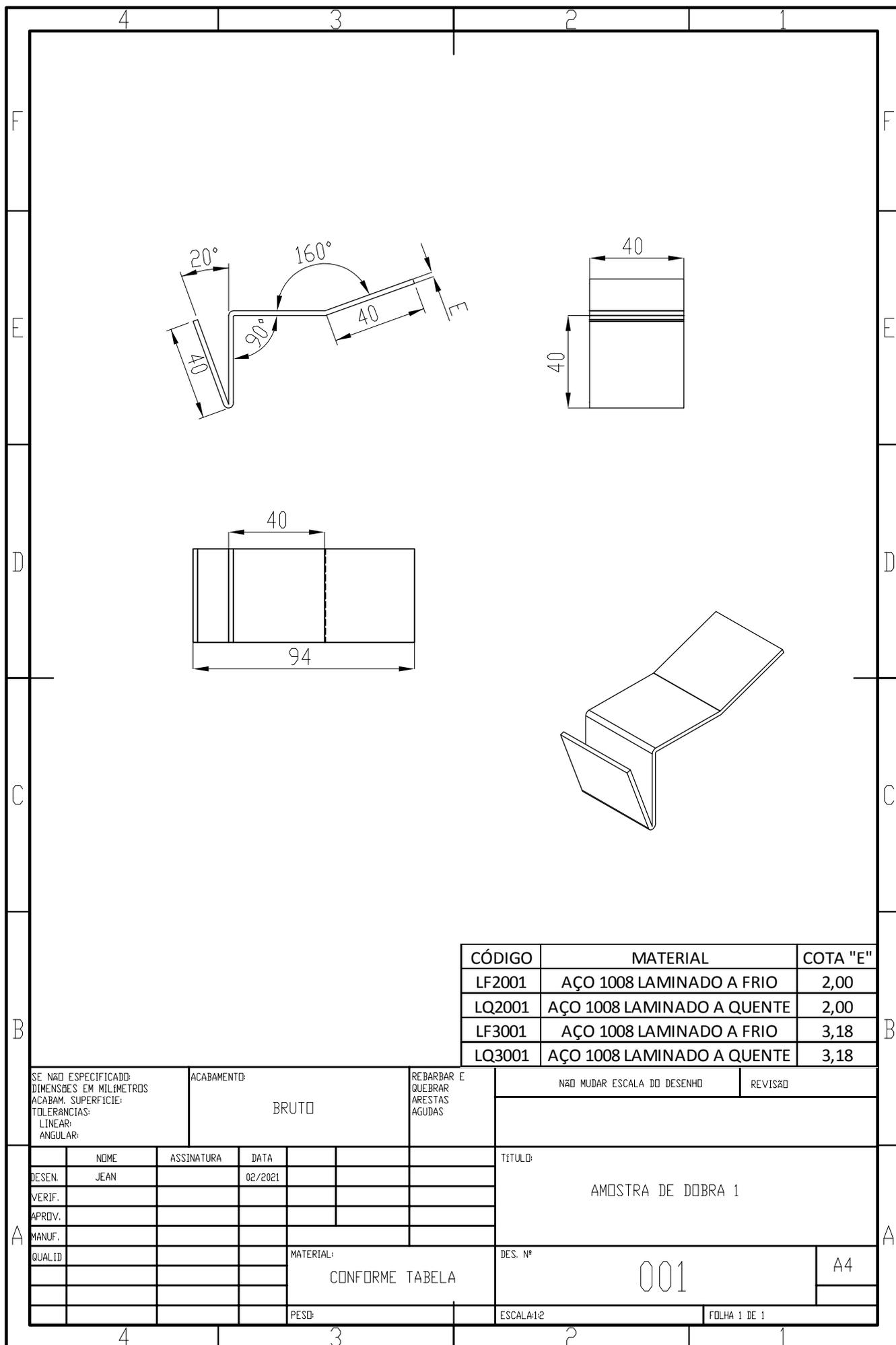
SIPXMACH. **Sipxmach deep drawing products**. Disponível em <<https://sipxmach.com/deep-drawing/>>. Acesso em 20 mar 2021.

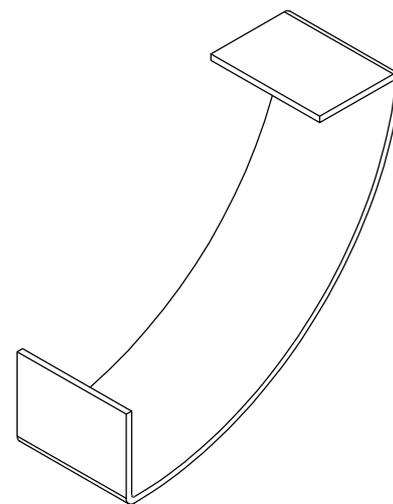
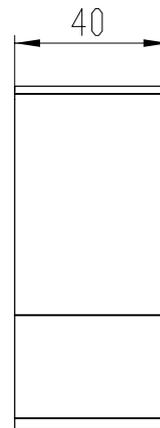
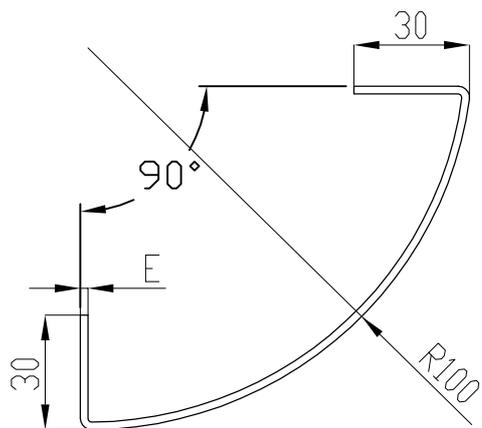
SOUZA, Diego A. **Determinação de tensões residuais em materiais metálicos por meio de ensaio de dureza**. 2012. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de São João Del-Rei, Minas Gerais, 2012.

SPATHOPOULOS, Stefanos C.; STAVROULAKIS, Georgios E. Springback prediction in sheet metal forming, based on finite element analysis and artificial neural network approach. **Applied Mechanics**, Chania, n. 1, p. 97-110, 2020.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios da ciência e tecnologia dos materiais**. Rio de Janeiro: Campus, 2003. 567 p.

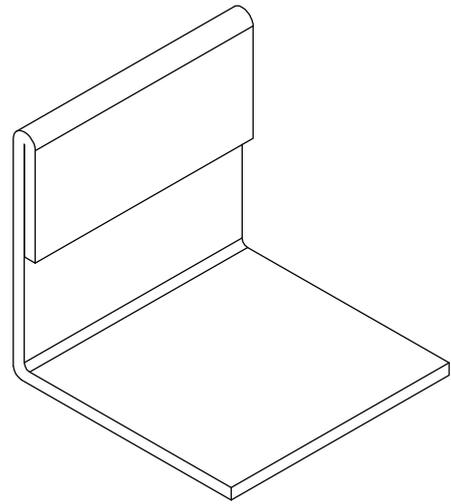
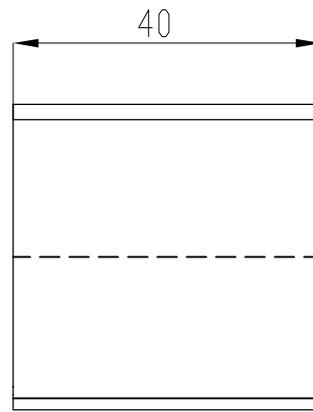
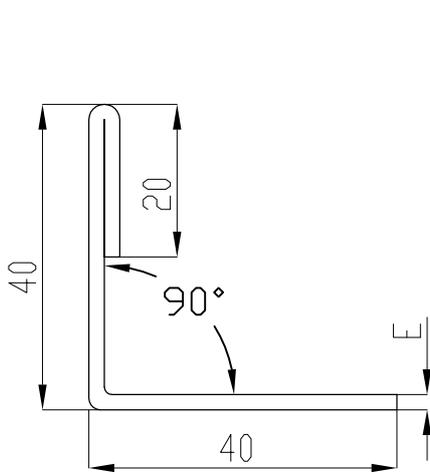
7 APÊNDICE A - Desenhos das amostras produzidas





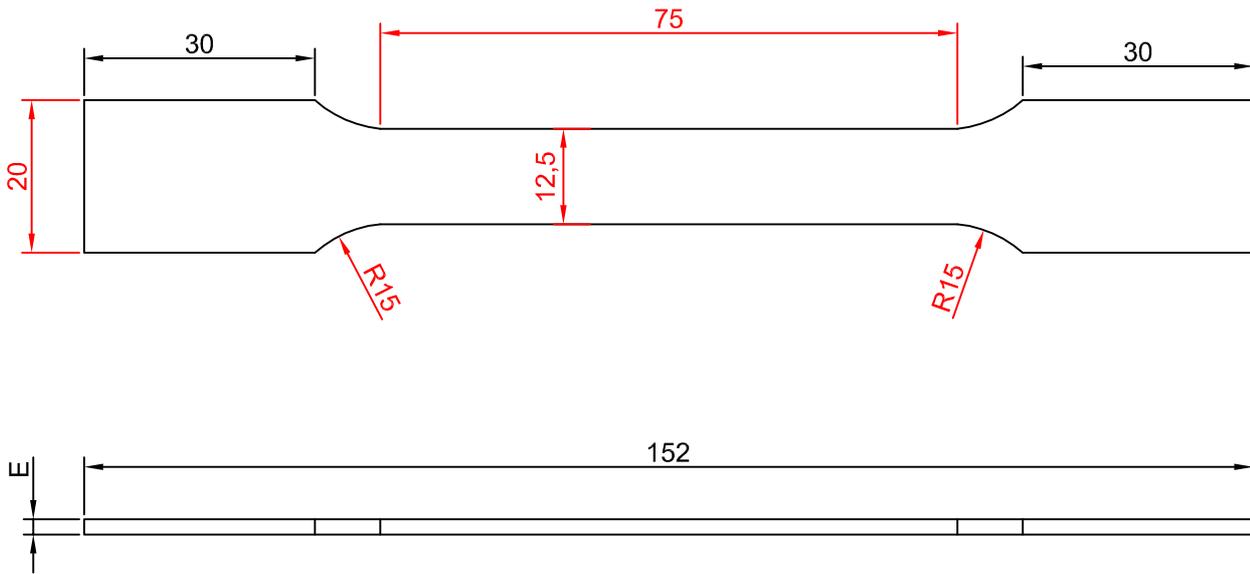
CÓDIGO	MATERIAL	COTA "E"
LF2002	AÇO 1008 LAMINADO A FRIO	2,00
LQ2002	AÇO 1008 LAMINADO A QUENTE	2,00
LF3002	AÇO 1008 LAMINADO A FRIO	3,18
LQ3002	AÇO 1008 LAMINADO A QUENTE	3,18

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DESEN.	JEAN	ASSINATURA	DATA	02/2021	TÍTULO: AMOSTRA DE DOBRA 2				
VERIF.					DES. Nº 002				
APROV.									
MANUF.					MATERIAL: CONFORME TABELA				
QUALID									
PESO:		ESCALA: 1:2		FOLHA 1 DE 1		A4			



CÓDIGO	MATERIAL	COTA "E"
LF2003	AÇO 1008 LAMINADO A FRIO	2,00
LQ2003	AÇO 1008 LAMINADO A QUENTE	2,00
LF3003	AÇO 1008 LAMINADO A FRIO	3,18
LQ3003	AÇO 1008 LAMINADO A QUENTE	3,18

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:				ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DESEN. JEAN				ASSINATURA		DATA 02/2021		TÍTULO: AMOSTRA DE DOBRA 3			
VERIF.											
APROV.											
MANUF.											
QUALID						MATERIAL: CONFORME TABELA		DES. Nº 003		A4	
						PESO:		ESCALA:1:1		FOLHA 1 DE 1	



Cotas em vermelho conforme NBR6673

CÓDIGO	MATERIAL	COTA "E"
LF2004	AÇO 1008 LAMINADO A FRIO	2,00
LQ2004	AÇO 1008 LAMINADO A QUENTE	2,00
LF3004	AÇO 1008 LAMINADO A FRIO	3,18
LQ3004	AÇO 1008 LAMINADO A QUENTE	3,18

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
ACABAM. SUPERFÍCIE:									
TOLERÂNCIAS:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DESEN.		JEAN		02/2021		CORPO DE PROVA TRAÇÃO			
VERIF.									
APROV.									
MANUF.									
QUALID				MATERIAL:		DES. Nº		A4	
				CONFORME TABELA		004			
				PESD:		ESCALA: 1:2		FOLHA 1 DE 1	