

UFRJ - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

BERNARDO POMPERMAYER EDUARDO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA
CHAPA DE AÇO AUSTENÍTICO 304 POR MEIOS DE ENSAIOS DE TRAÇÃO
UNIAXIAL E LAMINAÇÃO A FRIO**

MACAÉ

2017

BERNARDO POMPERMAYER EDUARDO

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA
CHAPA DE AÇO AUSTENÍTICO 304 POR MEIOS DE ENSAIOS DE TRAÇÃO
UNIAXIAL E LAMINAÇÃO A FRIO

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao departamento de Engenharia
Mecânica como requisito parcial para obtenção do
grau de Graduado em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ORIENTADOR: MARCELO COSTA CARDOSO

MACAÉ

2017

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA
CHAPA DE AÇO AUSTENÍTICO 304 POR MEIOS DE ENSAIOS DE TRAÇÃO
UNIAXIAL E LAMINAÇÃO A FRIO

BERNARDO POMPERMAYER EDUARDO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Engenharia Mecânica como requisito parcial para obtenção do grau de Graduado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Examinado por:

Professor Marcelo Costa Cardoso, D.Sc

Professora Elisa Pinto da Rocha, D.Sc

Professor Maurício Aguiar Nepomuceno de Oliveira, M.Sc

MACAÉ

2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Rita de Cássia Pompermayer Eduardo, a pessoa que mais me incentiva em meus estudos. Exemplo de mulher guerreira, dedicada e que nunca mediu esforços para que alcançasse meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por permitir mais essa vitória em minha vida.

Agradeço também a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para o bom desempenho deste trabalho. Dentre estes, gostaria de agradecer em especial:

Aos meus pais, Rita e Marcos, e a minha irmã, Mariana, por todo apoio durante esta caminhada.

Ao meu orientador, Marcelo Costa Cardoso, por todo empenho, dedicação, comprometimento e incentivo.

Aos amigos de pesquisa, Henrique Ligeiro, Edna Fernandes e Lucas Beraldo pelo empenho e bons momentos vividos durante os trabalhos que desenvolvemos juntos.

Aos amigos que adquiri ao longo do curso tornando os momentos mais leves e descontraídos.

À Empresa Aperam South América por ter fornecido o material para estudo.

RESUMO

Este estudo tem como a principal razão de obter um melhor entendimento do comportamento mecânico de uma chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304 por meios de ensaios de tração uniaxial e laminação a frio. Neste sentido, foi dividido em quatro partes: na primeira, realizou-se uma caracterização microestrutural utilizando técnicas de indução magnética a fim de se identificar a fração volumétrica de martensita presente no material conforme recebido. Na segunda parte, o comportamento plástico da chapa foi avaliado por meio de ensaios de tração uniaxial realizados em duas velocidades distintas, no qual foi verificada a sensibilidade à taxa de deformação. Ainda, foram realizados ensaios de tração uniaxial em três direções, a saber: 0° , 45° e 90° em relação a direção de laminação, com intuito de avaliar as propriedades mecânicas, tais como: tensão de escoamento, tensão limite de resistência, tensão de ruptura, expoente de encruamento, anisotropia plástica, anisotropia planar, entre outras. Na terceira parte, uma simulação por meios de elementos finitos de um ensaio de flexão de três pontos foi realizada utilizando os resultados obtidos no ensaio de tração uniaxial como parâmetros de entrada. Para validar a simulação computacional, um ensaio experimental de flexão de três pontos foi realizado. Na quarta parte, realizou-se uma redução na espessura da chapa, através do processo de laminação a frio, com objetivo de observar o efeito TRIP (transformation-induced plasticity), ou seja, plasticidade induzida por transformação. Por fim, as etapas 1 e 2 foram novamente executadas para as chapas de aço laminadas a frio. Após a metodologia realizada, foi observado que o aço laminado obtivera maior resistência após laminação quando comparado ao aço conforme recebido, podendo ser concluído que esse aumento de tensão é devido ao efeito TRIP no qual parte da austenita se transformou em martensita, durante a laminação, que, por sua vez, é uma fase mais rígida do que a austenita.

Palavras-chave: Taxa de Deformação; Plasticidade Induzida por Transformação; Aço Inoxidável Austenítico; Ensaio de Tração Uniaxial; Ensaio de Flexão de Três pontos.

ABSTRACT

This work was divided in four parts: In the first, a microstructural characterization was performed using magnetic induction techniques to identify the magnetic phases present, of a 304 austenitic stainless steel sheet (AISI 304). In the second part, the plastic behavior of the sheet was evaluated by means of uniaxial tensile testing performed at two distinct speeds, in which the sensitivity to the strain rate was verified. Also, a uniaxial tensile test was carried out in three directions, namely: 0° , 45° and 90° in relation to the rolling direction, in order to evaluate the mechanical properties, such as: yield stress, tensile strength, Rupture, hardening exponent, plastic anisotropy, planar anisotropy, among others. In the third part, a finite element simulation of a three-point flexural test was performed using the results obtained in the uniaxial tensile test as input parameters. To validate the computational simulation, an experimental three-point bending test was performed. In the fourth part, a reduction in the thickness of the sheet was carried out, through the cold rolling process, in order to observe the TRIP (transformation-induced plasticity). Finally, steps 1 and 2 were again performed for cold rolled steel sheets. After the methodology, it was observed that the rolled steel obtained greater resistance after rolling when compared to the steel as received. It can be concluded that this increase in tension is due to the TRIP effect in which part of the austenite was transformed into martensite during the rolling, which in turn is a more rigid phase than the austenite.

Keywords: Deformation Rate; Transformation Induced Plasticity; Austenitic Stainless Steel; Uniaxial Traction Test; Three-Point Bending Test.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
2.2.1 Confeção e projeto do ferramental para corte de chapas para uso em fresadora	3
2.2.2 Fabricação do suporte para confecção dos corpos de prova.....	3
2.2.3 Confeção de corpos de prova para ensaio de tração uniaxial	3
2.2.4 Efeitos da martensita induzida.....	3
2.2.5 Avaliação de martensita induzida.....	3
2.2.6 Simulação computacional do ensaio de flexão de três pontos por elementos finitos utilizando o Software ABAQUS.	4
2.2.7 Validação da simulação computacional.....	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Aços	5
3.1.1 Aços com baixo teor de carbono.....	5
3.1.2 Aços com médio teor de carbono	6
3.1.3 Aços com alto teor de carbono	6
3.2 Aços inoxidáveis.....	6
3.2.1 Aço inoxidável martensítico	7
3.2.2 Aço inoxidável ferrítico.....	7
3.2.3 Aço inoxidável austenítico.....	7
3.2.3.1 Aço inoxidável austenítico 304	8
3.2.4 Aço inoxidável ferrítico-austenítico (duplex).....	8
3.2.5 Transformação martensítica e aspecto termomecânico	8
3.3 Ensaio dos materiais.....	9
3.3.1 Ensaio de tração.....	9
3.3.2 Ensaio de flexão de 3 pontos	12
3.4 Processos de conformação mecânica.....	12
3.4.1 Laminação.....	13

3.5	Fresamento.....	15
4	MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1	Material.....	17
4.2	Metodologia.....	17
4.2.1	Corte das chapas	17
4.2.2	Laminação.....	18
4.2.3	Quantificação de fases	20
4.2.4	Usinagem de corpos de prova.....	21
4.2.4.1	Fixação do corpo de prova em fresadora para usinagem.....	25
4.2.5	Ensaio de tração uniaxial.....	27
4.2.5.2	Adaptação do extensômetro para corpos de prova reduzidos.....	28
4.2.6	Avaliação dos efeitos da taxa de deformação na transformação de fases	29
4.2.7	Simulação de ensaio de flexão.....	31
4.2.8	Validação da simulação de ensaio de flexão	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
5.1	Quantificação de fases	33
5.2	Avaliação das propriedades mecânicas	33
5.3	Análise teórica e experimental do comportamento plástico	36
5.4	Efeitos da taxa de deformação na transformação de fases	39
5.5	Simulação computacional e validação do ensaio de flexão.....	41
6	CONCLUSÕES	44
7	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	45
	REFERÊNCIAS	46
	APÊNDICES	48
	APÊNDICE A – Suporte para fixação do disco de corte metalográfico em fresadora.	48
	APÊNDICE B – Suporte para usinagem de corpo de prova reduzido em fresadora.....	49
	APÊNDICE C – Peça para extensômetro com base de medida 25mm.....	50
	APÊNDICE D - Comportamento plástico do aço inoxidável 304.....	51

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Representação esquemática da variação das tensões críticas com a temperatura. Adaptado de Scheil (1932). 9
- Figura 2: Representação esquemática do processo de laminação. Adaptado de Vicente Chiaverini, 1986. 13
- Figura 3: Execução do corte das chapas de aço inoxidável 304 utilizando fresadora e disco de corte metalográfico. 18
- Figura 4: Laminador FENN MFG modelo D-51710:1973. 19
- Figura 5: Medição da fração volumétrica de martensita com auxílio de um ferritoscópio. 20
- Figura 6: Corte de corpos de prova com orientação de 0° em relação a direção de laminação 21
- Figura 7: Chapa cortada na orientação 0° em relação a direção de laminação. 22
- Figura 8: Arranjo fresadora-ferramenta-corpo de prova para execução de fresamento. 22
- Figura 9: Dimensões em milímetros do corpo de prova para os ensaios de tração uniaxial. 23
- Figura 10: Detalhe do assessorio para fixação do corpo de prova na mesa da fresadora. 25
- Figura 11: Esquema de fixação de corpo de prova para usinagem em fresadora. 26
- Figura 12: Montagem de suporte para usinagem de corpo de prova em fresadora. 26
- Figura 13: Esquema de montagem para ensaio de tração uniaxial. 27
- Figura 14: Extensômetro com base de medida 50mm. Adaptado <http://www.instron.com.br>. 28

- Figura 15: Extensômetro com nova base de medida de 25mm. 29
- Figura 16: Esquema montagem de ensaio de flexão de três pontos. 31
- Figura 17: Gráfico tensão verdadeira x deformação verdadeira em ensaio uniaxial de tração, com velocidade de 1mm/min em diferentes orientações, com relação a direção de laminação para o aço inoxidável 304 conforme recebido. 34
- Figura 18: Gráfico tensão verdadeira x deformação verdadeira em ensaio uniaxial de tração, com velocidade de 1mm/min em diferentes orientações, com relação à direção de laminação para o aço inoxidável 304 laminado a 10% de redução de espessura. 34
- Figura 19: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift a 10% de deformação plástica. 37
- Figura 20: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift a 20% de deformação plástica. 37
- Figura 21: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift. 38
- Figura 22: Comportamento tensão de engenharia x deformação de engenharia em tração uniaxial em função da taxa de deformação e fração volumétrica de martensita em determinados valores de deformação. Aço Inoxidável 304 conforme recebido (0% de redução). 39
- Figura 23: Comportamento tensão de engenharia x deformação de engenharia em tração uniaxial em função da taxa de deformação e fração volumétrica de martensita em determinados valores de deformação. Aço Inoxidável 304 laminado a 10% de redução. 40
- Figura 24: Comportamento força x deslocamento em ensaio de flexão de três pontos - simulação e experimental. 41
- Figura 25: Comportamento tensão x deslocamento em ensaio de flexão de três pontos - simulação e experimental. 42

- Figura 26: (a) Simulação do ensaio de flexão, (b) ensaio de flexão experimental. 43
- Figura 27: Simulação das distribuições de tensões no corpo de prova em flexão submetido à 5% de deformação. 43
- Figura 28: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift a 10% de deformação plástica na orientação 45° em relação a direção de laminação. 51
- Figura 29: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift a 20% de deformação plástica na orientação 45° em relação a direção de laminação. 52
- Figura 30: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift a 10% de deformação plástica na orientação 90° em relação a direção de laminação. 52
- Figura 31: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift a 20% de deformação plástica na orientação 90° em relação a direção de laminação. 53
- Figura 32: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift na orientação 45° em relação a direção de laminação. 54
- Figura 33: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift na orientação 45° em relação a direção de laminação. 54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do aço inoxidável austenítico 304 (Aperam South America)	17
Tabela 2: Dimensões das chapas antes da laminação.	19
Tabela 3: Dimensões das chapas após laminação.	20
Tabela 4: Velocidade de corte em função do material e profundidade de desbaste ou acabamento para fresas de aço rápido. Adaptado de Marques (2013).	24
Tabela 5: Avanço por dente em função do material e profundidade de desbaste ou acabamento para fresas de aço rápido. Adaptado de Marques (2013).	24
Tabela 6: Ensaios realizados a duas velocidades diferentes para avaliação dos efeitos da formação de martensita induzida.	30
Tabela 7: Propriedades mecânicas determinadas para chapas de aço inoxidável 304 antes e depois de laminação a 10% de redução de espessura por meio de ensaio de tração uniaxial.	35

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Área
- ad – Avanço por dente
- am – Velocidade de avanço da mesa
- av – avanço por volta
- d – Diâmetro da fresa
- Δb – Alargamento total
- Δh – Redução total
- Δl – Alongamento total
- ΔR – Anisotropia planar
- E – Coeficiente de elasticidade
- ε – Deformação sofrida pelo corpo de prova
- ε_b – Deformação na largura
- ε_h – Deformação na espessura
- ε_l – Deformação no comprimento
- ε^p – Deformação plástica
- ε_t^p – Deformação plástica da largura
- ε_w^p – Deformação plástica da espessura
- ε_0 – Pré deformação
- $\bar{\varepsilon}$ – Deformação equivalente
- $\dot{\varepsilon}$ – Taxa de deformação
- K – Coeficiente de resistência
- L – Comprimento útil do corpo de prova
- MOE – Módulo de elasticidade
- MOR – Módulo de ruptura
- M_d – Temperatura de final de transformação martensítica induzida por deformação
- M_s – Temperatura de início de transformação martensítica
- M_s^σ – Temperatura de início de transformação martensítica assistida por tensão
- n – Expoente de encruamento
- N – Rotação da ferramenta
- R – Coeficiente de anisotropia plástica

\bar{R} – Anisotropia normal

σ – Tensão

σ_e – Tensão de escoamento

σ_f – Limite de elasticidade

σ_{fu} – Tensão que levará o material à fratura

σ_r – Tensão limite de resistência

σ_{rup} – Tensão de ruptura

TRIP – Plasticidade induzida por transformação

v – Velocidade do ensaio de tração

V_c – Velocidade de corte

z – Número de dentes da ferramenta

1. INTRODUÇÃO

O aço é definido como uma liga ferro-carbono sendo classificado de acordo com o teor de carbono presente em sua composição, sejam os de baixa, médio ou elevado teor de carbono de acordo com D. Callister (2007). Dentro dessas classes, existem subgrupos de acordo com a concentração de elementos de liga, como, por exemplo, o aço inoxidável, que pela adição essencialmente de Cromo, se trata de um aço de alta liga.

Por sua vez, os aços inoxidáveis são classificados segundo sua formação microestrutural, que são: aços inoxidáveis martensíticos, ferríticos, austeníticos e ferríticos-austeníticos (duplex). A presença do Cromo confere ao aço um aumento na resistência à oxidação e à corrosão, propriedades mecânicas a temperaturas elevadas e tenacidade.

Os aços inoxidáveis austeníticos conseguem estabilizar a estrutura austenita à temperatura ambiente devido a presença de Níquel como elemento de liga. Dentre os três grupos, são os que apresentam maior resistência à corrosão aliada ao baixo limite de escoamento com alta resistência à tração e bom alongamento. São considerados nobres, paramagnéticos e, ainda, oferecem as melhores propriedades no trabalho de deformação a frio.

Os Aços inoxidáveis austeníticos 304, objeto de estudo desse trabalho, são metaestáveis, isto é, transformam a estrutura para martensita quando submetidos à deformação plástica a frio. A austenita desses aços inoxidáveis podem sofrer transformação martensítica por deformação plástica à temperatura ambiente, no qual confere ao aço um aumento em sua resistência. Aços que sofrem essa transformação são denominados aços com efeito TRIP (“Plasticidade Induzida por Transformação”). Dois tipos de martensita podem ser formados: a martensita ϵ , uma fase paramagnética, assim como a austenita, e a martensita α' , ferromagnético com os mesmos parâmetros cristalográficos da fase ferrita de acordo com Costa Cardoso (2012) (*apud* Tavares *et al.* 2009).

O presente estudo foi realizado em uma chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304, com 6,2 mm de espessura, com intuito de avaliar e caracterizar as propriedades mecânicas antes e depois do efeito TRIP, por meio de ensaios uniaxiais de tração.

Num primeiro instante, a caracterização das chapas se deu por meio de uma avaliação microestrutural utilizando técnicas de indução magnética a fim de identificar as fases magnéticas presentes, visto que a fase austenita é paramagnética e a fase martensita é uma fase magnética. Também, foram realizados ensaios de tração com intuito de avaliar as propriedades mecânicas, tais como: tensão de escoamento, tensão limite de resistência, tensão de ruptura, expoente de encruamento, anisotropia plástica, anisotropia planar, entre outras. Tais

propriedades foram utilizadas como parâmetros de entrada para a simulação de um ensaio de flexão de três pontos com o auxílio do software ABAQUS e posteriormente um ensaio experimental de flexão de três pontos foi realizado para validar a simulação computacional.

Em seguida, novos ensaios de tração foram realizados em diferentes velocidades, possibilitando a verificação da influência da taxa de deformação nas transformações martensíticas, bem como nas propriedades mecânicas.

Em um outro momento, foi realizada uma redução de 10% na espessura da chapa, através do processo de laminação a frio, com objetivo de observar o efeito TRIP. Por fim, todas as etapas foram novamente executadas para as chapas de aço laminadas a frio avaliando assim as propriedades pós-efeito TRIP.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo geral a caracterização experimental, bem como avaliação do comportamento plástico, e quantificação de fases presentes de uma chapa de aço inoxidável austenítico 304 com 6,2 mm de espessura, por meio de ensaio uniaxial de tração e laminação a frio com 10% de redução.

2.2 Objetivos específicos

2.2.1 Confecção e projeto do ferramental para corte de chapas para uso em fresadora

Desenvolver mecanismos, que acoplados à fresadora, possibilitam o corte de chapas com disco de corte apropriado e refrigeração adequada.

2.2.2 Fabricação do suporte para confecção dos corpos de prova

Fabricação de suporte para fixação de material a fim de usinar corpos de prova na fresadora.

2.2.3 Confecção de corpos de prova para ensaio de tração uniaxial

Elaboração e execução de metodologia para usinagem em fresadora de corpos de prova padrão para realização de ensaio uniaxial de tração

2.2.4 Efeitos da martensita induzida

Avaliar os efeitos de martensita induzida nas propriedades mecânicas do aço inoxidável 304 por meio de ensaio uniaxial de tração com técnicas de medição por indução magnética.

2.2.5 Avaliação de martensita induzida

Verificar a porcentagem de martensita oriunda da transformação de fase induzida pelo efeito TRIP após processo de laminação a frio e verificação das alterações nas propriedades mecânicas causadas por tal efeito com técnicas de medição por indução magnética.

2.2.6 Simulação computacional do ensaio de flexão de três pontos por elementos finitos utilizando o Software ABAQUS.

Utilização do software ABAQUS para simulação de ensaio de flexão com parâmetros obtidos em ensaio uniaxial de tração previamente realizado.

2.2.7 Validação da simulação computacional

Execução do ensaio de flexão de três pontos para validação de simulação computacional realizada no software ABAQUS

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica, é apresentada a definição de aço, bem como os principais tipos existentes. São apresentados os conceitos de aço inoxidável com foco para o aço inoxidável austenítico 304, com efeitos de transformação de fase. Em seguida, é apresentado o processo de conformação mecânica de laminação a fim de induzir as transformações de fase no aço inoxidável. E, por fim, apresenta-se a curva Tensão-Deformação obtida por meio de ensaio de tração uniaxial de modo a avaliar a cinética de transformação de fase no aço inoxidável austenítico 304 e suas propriedades mecânicas.

3.1 Aços

O aço é uma liga ferro-carbono que contém, geralmente, porcentagens de carbono variando entre 0,008% até, aproximadamente, 2,11%, além de outros elementos residuais resultantes do processo de fabricação.

O limite inferior de 0,008% de carbono representa a máxima solubilidade deste elemento no ferro à temperatura ambiente, entretanto o limite superior de 2,11% corresponde à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro e que ocorre a 1148°C. Esse valor máximo de 2,11% depende da presença ou não de elementos de ligas ou presença dos elementos residuais em teores superiores aos normais.

Segundo D. Callister (2007), os aços mais comuns são classificados de acordo com o teor de carbono que possuem, quais sejam, os tipos com baixo, médio e elevado teor de carbono. Para cada grupo existem subclasses que variam de acordo com as concentrações de diversos elementos de liga, como, por exemplo, o aço inoxidável, que se trata de um aço de alta liga.

3.1.1 Aços com baixo teor de carbono

Segundo D. Callister (2007), esses aços contêm menos de 0,25% de carbono e não respondem a tratamentos térmicos para formação de martensita, um aumento de resistência é obtido através de trabalho a frio. São os produzidos em maior quantidade além de serem os mais baratos. Esses tipos de aços possuem uma tenacidade e ductilidade excepcionais além de serem facilmente usinados e soldados. Como consequência, são aplicados na construção de elementos de carga de automóveis, formas estruturais (vigas I, canaletas) e chapas usadas em tubulações e edificações.

3.1.2 Aços com médio teor de carbono

Aços com médio teor de carbono possuem concentrações de carbono variando entre 0,25 e 0,60%. Esses aços podem ser tratados termicamente para melhorar suas propriedades mecânicas com sucesso somente em seções muito delgadas, pois apresentam baixas endurecibilidades. Adições de diversos elementos de liga a esses aços melhoram a capacidade dessas ligas de serem tratadas termicamente, dando origem a inúmeras combinações resistência-ductilidade.

3.1.3 Aços com alto teor de carbono

Segundo D. Callister (2007), aços com alto teor de carbono apresentam concentrações de carbono entre 0,6 e 1,4%. Esses aços são os mais duros e mais resistentes e, porém, os menos dúcteis entre os aços carbono. Quase sempre são utilizados na sua condição endurecida e revenida, tornando-se resistentes a ao desgaste e à abrasão. Quando adicionados elementos como o Cromo, Vanádio e Molibdênio a essa liga, induzem a formação de compostos muito duros e resistentes a abrasão, tornando-as apropriadas para aplicações como construção de ferramentas de corte e conformação de materiais, bem como fabricação de lâminas de corte, lâminas de serras para metais, molas e arames com alta resistência.

3.2 Aços inoxidáveis

De acordo com Costa e Silva e Mei (2006), aços inoxidáveis são ligas que contém concentrações superiores a 12% de Cromo, entretanto, nenhum aço é completamente inoxidável no sentido da palavra. A presença do Cromo confere ao aço um aumento na resistência à oxidação e à corrosão, propriedades mecânicas a temperaturas elevadas e tenacidade (dos inoxidáveis austenítico), tornando-o de grande interesse para engenharia. As principais composições dos aços inoxidáveis (por exemplo, 12% Cr, 18% + 8%Ni, etc) foram desenvolvidas acidentalmente no começo do século XX. A partir de então, novas composições vem sendo desenvolvidas. Para fins de classificação e estudo das propriedades, os aços inoxidáveis são agrupados de acordo com sua formação microestrutural, ou seja, aços inoxidáveis martensíticos, ferríticos, austeníticos e ferríticos-austeníticos (duplex).

3.2.1 Aço inoxidável martensítico

Tendo em vista o que registra Tebecherani (2011), o aço inoxidável martensítico possui teor de Cromo variando de 12 a 17% e de carbono entre 0,1 e 0,5%. Este aço pertence à série 400 e é altamente resistente ao ataque pela corrosão atmosférica no estado temperado. Os aços inoxidáveis martensíticos são ferromagnéticos, apresentam capacidade de trabalho mecânico a frio inferior às demais classes e uma soldabilidade igualmente pior. Mostram uma estrutura martensítica quando resfriados rapidamente a partir do campo austenítico, caracterizando a alta dureza e a fragilidade.

3.2.2 Aço inoxidável ferrítico

Com 16 a 30% de Cromo, o aço inoxidável ferrítico apresenta uma estrutura ferrítica macia, tenaz e altamente homogêneas após ser resfriados de lento a moderado, a partir do campo austenítico. Possui maior capacidade de trabalho a frio e maior resistência à corrosão do que os aços martensítico, devido à maior concentração de Cromo. Os aços ferríticos não podem ser endurecidos por tratamento térmico, são ferromagnéticos e resistentes a corrosão atmosférica e soluções fortemente oxidantes de acordo com Costa Cardoso (2012).

3.2.3 Aço inoxidável austenítico

Os aços inoxidáveis austeníticos conseguem estabilizar a austenita à temperatura ambiente, devido à presença de elementos de liga como o Níquel, além de melhorar a resistência a oxidação em altas temperaturas. De acordo com Costa e Silva e Mei (2002), podem ser agrupados em austeníticos estáveis e austeníticos metaestáveis. Os austeníticos estáveis retêm a estrutura austenítica mesmo depois de considerável deformação a frio, entretanto, os metaestáveis transformam a estrutura para martensita ou acicular quando submetidos à deformação plástica a frio. Segundo S. Msolli et. al (2016), esses aços são suscetíveis ao efeito TRIP (“Plasticidade Induzida por Deformação”), isto é, parte da austenita (fase mãe) pode sofrer transformação martensítica por deformação plástica à temperatura ambiente, no qual confere ao aço um aumento em sua resistência. Dois tipos de martensita podem ser formados: a martensita ϵ , uma fase paramagnética, assim como a austenita, e a martensita α' , ferromagnético com os mesmos parâmetros cristalográficos da fase ferrita.

A classe dos aços inoxidáveis austeníticos pertencentes a série 300 apresentam baixo limite de escoamento, alta resistência a tração, facilidade de conformação com bom alongamento e alta resistência à corrosão o que possibilita melhores propriedades no trabalho a frio. Dentre todos os três grupos, esta série é a que possui melhor resistência a corrosão.

3.2.3.1 Aço inoxidável austenítico 304

De acordo com D. Callister (2007), o aço inoxidável austenítico 304 possui em sua composição 0,08% de Carbono, 19% Cromo, 9% de Níquel e 2% de Manganês. Tem sua resistência aumentada mediante deformação plástica a frio, uma vez que eles não são tratáveis termicamente. A presença de alto teor de Cromo e Níquel confere ao aço a melhor resistência a corrosão. São amplamente utilizados em equipamentos para processamento químico e de alimentos, vasos criogênicos, cubas para pias, construções com solda e na indústria petrolífera devido sua alta resistência à corrosão.

3.2.4 Aço inoxidável ferrítico-austenítico (duplex)

Esse tipo de aço inoxidável possui as fases de ferrita e austenita na sua microestrutura em temperatura ambiente. Apresentam características particulares, como o comportamento superplástico, pois pode estar sujeito a grandes deformações sem a ocorrência de estricção em temperaturas próximas da metade da sua temperatura de fusão.

3.2.5 Transformação martensítica e aspecto termomecânico

É possível observar os efeitos da tensão e temperatura como parâmetros para a transformação de fases da austenita para martensita no gráfico representado na Figura 1 (adaptado de Cardoso2012 apud Scheil 1932). Observa-se que a tensão limite de escoamento (linha C-D) é inversamente proporcional à temperatura.

Segundo Cardoso 2012, nota-se que, para valores de temperatura abaixo da temperatura de início de transformação M_s (Martensita início), ocorre naturalmente a transformação martensítica. Para temperaturas acima de M_s , temos a austenita em seu estado estável, entretanto a austenita deixa de ser estável se:

- Aplicada uma força que ultrapasse a linha de nucleação assistida por tensão (linha A-B) dentro do intervalo de temperatura $M_s < T < M_s^\sigma$.

- Aplicada uma tensão capaz de ultrapassar linha de nucleação induzida por deformação (linha C-E) dentro do intervalo de temperatura $M_s^\sigma < T < M_d$.

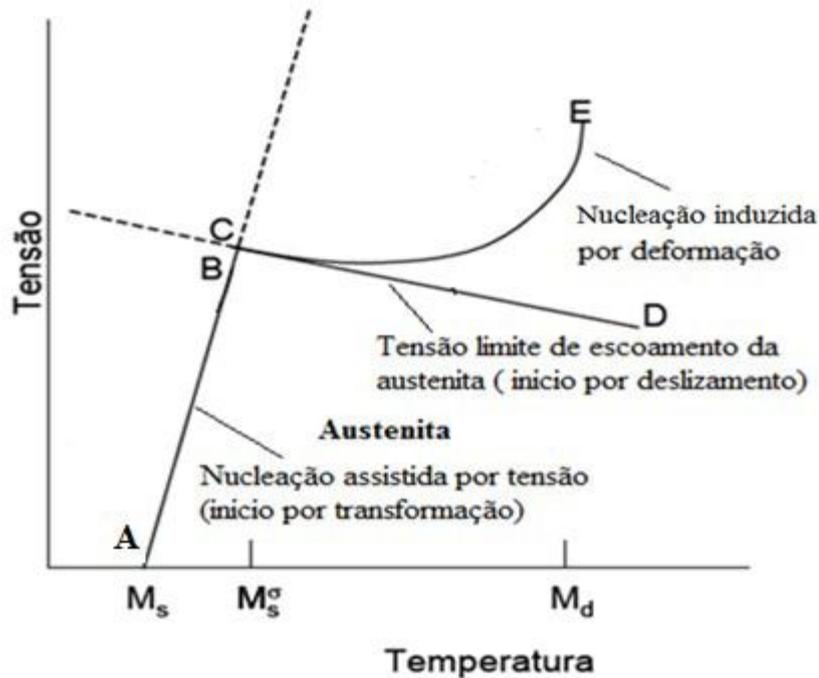


Figura 1: Representação esquemática da variação das tensões críticas com a temperatura.

Adaptado de Scheil (1932).

3.3 Ensaios dos materiais

Para determinar as aplicabilidades dos materiais é necessário conhecer suas características, propriedades e comportamentos. Os critérios para especificação de materiais, impõe realização de ensaios que têm seus métodos normatizados objetivando o levantamento de propriedades mecânicas e seu comportamento sob determinadas condições de esforços.

3.3.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração é o mais implementado dentre os diversos tipos de ensaios existentes para avaliação das propriedades mecânicas dos materiais, pois é relativamente simples e rápido

de ser executado, fornecendo informações essenciais para o projeto e fabricação de peças e componentes. Esse tipo de ensaio consiste na aplicação de uma carga uniaxial crescente nas extremidades de um corpo de prova, previamente fabricado segundo normas técnicas, até a ruptura. Como resultado, o ensaio uniaxial de tração, fornece a curva de tensão (σ) pela deformação (ε) sofrida pelo corpo de prova. Dentre os principais dados quantitativos das características mecânicas do material fornecidas pelo ensaio, pode-se citar: limite de elasticidade (σ_f), tensão de escoamento (σ_e), tensão limite de resistência (σ_r), tensão de ruptura (σ_{rup}), expoente de encruamento (n), anisotropia plástica (R), anisotropia planar (ΔR) e anisotropia normal (\bar{R}).

Quando a tensão atinge o valor do limite de elasticidade o material ainda responde ao limite elástico, ou seja, se a carga for removida o material retorna a sua forma original, porém, se a tensão for acima desse limite, fará com que o material se deforme permanentemente. O comportamento de transição do regime plástico para o elástico denomina-se de escoamento e a tensão que causa o escoamento chama-se de tensão de escoamento. A tensão de ruptura se dá no ponto em que o corpo de prova se quebra onde então é finalizado o ensaio de tração.

A capacidade de o material encruar por deformação é medida pelo expoente de encruamento. Quanto maior seu valor, maior será a distribuição uniforme das deformações por toda peça. Quando o coeficiente de encruamento é suficientemente grande o material ensaiado suportará mais deformação antes que a estrição se inicie, pois haverá a redistribuição de forças ao longo de toda peça.

Em alguns materiais, o expoente de encruamento pode modificar-se, significando a presença de outro segmento associado a um novo estágio de encruamento. Diferentes estágios de encruamento podem contribuir para avaliação dos micromecanismos de deformação plástica dos materiais (Cardoso 2012, *apud* Jaoul 1957). O expoente de encruamento mensura a capacidade de o material distribuir uniformemente as deformações por toda peça. Assim, quanto maior o n maior a resistência à estrição (Horta, 2017). Para o estudo do comportamento plástico de determinados materiais, pode-se utilizar a equação de Swift que é definida como:

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon^p)^n \quad (3.1)$$

em que K representa o coeficiente de resistência, ε_0 à pré-deformação correspondente ao valor da tensão limite de escoamento, n o expoente de encruamento e ε^p a deformação plástica.

As propriedades de alguns materiais dependem da direção cristalográfica que são feitas as medições. Esta direcionalidade das propriedades é chamada de anisotropia e está diretamente associada à diferença do espaço atômico em função da direção cristalográfica. O coeficiente de anisotropia plástica (R) é expresso pela equação:

$$R = \varepsilon_w^p / \varepsilon_t^p \quad (3.2)$$

onde ε_w^p é a deformação plástica verdadeira da largura e ε_t^p corresponde a deformação plástica verdadeira da espessura. Considera-se um material com boa capacidade de deformação quando $R > 1$, pois, quanto maior o valor de R menor será a redução de espessura do material. De acordo com Horta (2017), para os materiais que tem suas propriedades medidas independentes da direção, conhecidos como isotrópicos, teriam seus valores de R iguais a uma unidade. Entretanto, observa-se que, na maioria dos aços, existem variações de valores de R segundo sua orientação no plano da chapa. Essa variação é denominada anisotropia planar (ΔR), expressa pela equação (3.3).

A anisotropia planar (ΔR) indica que, segundo as diferentes direções no plano de uma chapa o comportamento mecânico se apresenta de maneira distinta e indica também a tendência de criar orelhamento. Quando $\Delta R > 0$ formam-se orelhas a 0° e 90° em relação a direção de laminação, para $\Delta R < 0$ as orelhas se formam a 45° e 135° em relação a direção de laminação e para $\Delta R = 0$ não forma orelha. A equação para anisotropia planar considera o coeficiente de anisotropia em três direções:

$$\Delta R = 1/2(R_{0^\circ} - R_{45^\circ} + R_{90^\circ}). \quad (3.3)$$

Ainda segundo Horta (2017), ainda é possível outra forma de determinação de R , analisando a direção normal à superfície da chapa laminada. Trata-se da anisotropia normal (\bar{R}) expressa pela equação (3.4):

$$\bar{R} = 1/4(R_{0^\circ} + R_{45^\circ} + R_{90^\circ}). \quad (3.4)$$

A anisotropia normal permite comparar a capacidade de conformação de diferentes materiais, assim, quanto menor o \bar{R} , pior é a capacidade de conformação. Ainda, materiais perfeitamente isotrópicos possuem $\bar{R} = 1$.

3.3.2 Ensaio de flexão de 3 pontos

O ensaio de flexão de três pontos consiste na aplicação de uma carga partindo do zero e aumentando lentamente até a ruptura do material, situada no centro de um corpo de prova com geometria normalizada. O corpo de prova a ser ensaiado encontra-se posicionado na condição biapoiada nos suportes presentes na máquina. Como dados de saída, o ensaio fornece a curva da carga aplicada versus deslocamento (ou flecha) tendo como parâmetros principais o módulo de ruptura (MOR) ou valor da tensão que levará o material a fratura total (σ_{fu}), o módulo de elasticidade (MOE), que representa o coeficiente de elasticidade do corpo de prova (E), limite de elasticidade em flexão, ou seja, a maior tensão de flexão que o material suporta sem apresentar deformação permanente e o limite de escoamento em flexão que representa a tensão referente a transição de comportamento elástico e plástico.

A seção transversal de um corpo de prova do ensaio de flexão é submetida a níveis de tensões trativas, compressivas e cisalhantes ao mesmo tempo e seus níveis dependem da geometria dessa seção, contrastando com outros ensaios que aplicam ao corpo de prova exclusivamente tensões normais (como a de tração no ensaio de tração) e tensões cisalhantes (como no ensaio de torção).

Tendo em vista a norma ASTM-D790-17, que normatiza o procedimento para ensaio de flexão, a deformação proveniente da flexão no corpo de prova, é calculada pela equação (3.5).

$$d = 6D \cdot r / l^2 \quad (3.5)$$

Onde d representa a deformação, D o deslocamento, r a espessura do corpo de prova, l a distância entre os apoios onde posiciona-se o corpo de prova.

Aplica-se o ensaio de flexão em materiais frágeis ou de elevada dureza.

3.4 Processos de conformação mecânica

A conformação mecânica é o processo de produção de peças em que são aplicados esforços sobre o material metálico a fim de deformá-los permanentemente para o formato que se deseja. Quando a operação de conformação se dá em lingotes, com intuito de produzir formas simples como, por exemplo, chapas, barras, placa, dentre outros, o processo é chamado de trabalho mecânico primário. Entretanto, quando o trabalho mecânico é executado a partir das

partes obtidas nesses processos primários a fim de obter objetos definitivos, denomina-se trabalho mecânico secundário.

O objetivo principal do trabalho mecânico é conformar peças e o processo de conformação pode ser executado com trabalho a frio ou a quente, em função da temperatura de recristalização. Quando realizado a frio, o trabalho mecânico deforma a estrutura do material podendo alterar as propriedades mecânicas resultando em um aumento de dureza e redução na ductilidade, além de exigir maiores esforços das máquinas. Em contrapartida, quando realizado a quente, possibilita o refino da estrutura cristalina devido à constante recristalização durante o processo, conferindo à peça conformada melhor tenacidade e exigindo menores esforços das máquinas. Têm-se como exemplos de processos de conformação a laminação, trefilação, dobramento, extrusão e etc.

3.4.1 Laminação

Trata-se de um processo de conformação mecânica em que uma chapa metálica é forçada a passar entre dois cilindros, girando em sentidos opostos com velocidades superficiais constantes, posicionados a uma distância entre si menor do que a espessura da peça à ser deformada, fazendo com que o material saia dos cilindros deformado plasticamente com espessura reduzida e o comprimento e a largura aumentados. A Figura 2 representa uma chapa sendo laminada.

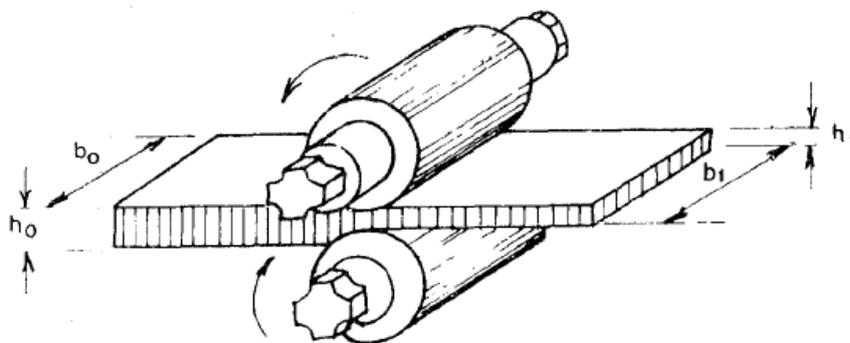


Figura 2: Representação esquemática do processo de laminação. Adaptado de Vicente Chiaverini, 1986.

Em geral, a redução de espessura nas chapas, provocada pelo laminador, resulta no seu alongamento visto que o alargamento é relativamente pequeno e pode ser desprezado. Às

diferenças entre os parâmetros iniciais e finais de espessura, largura e comprimento chamam-se respectivamente de redução total, alargamento total e alongamento total, expressados pelas seguintes equações:

$$\Delta h = h_0 - h_1 \quad (3.4)$$

$$\Delta b = b_1 - b_0 \quad (3.5)$$

$$\Delta l = l_1 - l_0 \quad (3.6)$$

As deformações provocadas pela laminação são expressas pelas equações:

$$\varepsilon_h = \frac{h_1 - h_0}{h_1} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_b = \frac{b_1 - b_0}{b_1} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_1} \quad (3.9)$$

em que ε_h , ε_b e ε_l representam respectivamente, deformação na espessura, deformação na largura e deformação no comprimento.

Ainda segundo Balancin (2015), é possível escrever uma equação para representar a deformação equivalente provocada pela laminação, levando em conta que a chama metálica, quando laminada, sofre diferentes valores de tensões em determinados planos, conseqüentemente diferentes valores de deformação na espessura, comprimento e largura. Assim, relacionamos as deformações em uma única equação para deformação equivalente ($\bar{\varepsilon}$):

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_h - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_h - \varepsilon_l)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_l)^2} \quad (3.10)$$

Como o alargamento da placa é desprezado, temos que a redução de espessura é compensada pelo alongamento da chapa na direção de laminação, isto é, ocorre conservação de volume. Assim, devem passar por um determinado ponto, em um dado intervalo de tempo, volumes iguais de metal.

O equipamento responsável por executar a laminação é o laminador, que, fundamentalmente, consiste em uma estrutura metálica que suporta os cilindros com seus respectivos mancais. Existem diversos tipos de laminadores, classificados segundo os serviços que executam, número de cilindros e temperatura de realização do trabalho (a frio ou a quente).

3.5 Fresamento

O fresamento é uma operação de usinagem de retirada de material por corte, com intuito de produzir uma peça com dimensões desejadas. Nessa operação, o movimento de avanço é feito pela própria peça em usinagem fixada sobre a mesa da máquina que, então, se aproxima da ferramenta em rotação, obrigando o material a fazer o contato executando, assim, o corte. A ferramenta é chamada de fresa e possui arestas cortantes posicionadas simetricamente em torno de um eixo.

O fresamento é conhecido por ser versátil, capaz de produzir as mais diversas geometrias, visto que a fresa pode-se apresentar nas mais variadas formas, como, por exemplo, a fresa de facear, de topo, cilíndrica de disco, dentre outras, cada uma indicada para um tipo de corte específico. De acordo com Diniz e Marcondes e Coppini (1999), a classificação dessa operação pode ser feita em relação à posição do eixo da máquina-ferramenta. Quando o eixo está posicionado horizontalmente, chama-se de fresamento horizontal, e, quando posicionado verticalmente, chama-se de fresamento vertical.

Dois movimentos simultâneos compõem o processo de fresamento, a saber: movimento de avanço, proveniente da movimentação da peça presa a mesa; e movimento da ferramenta, que produz o corte. Sendo assim, é preciso selecionar e definir os parâmetros de usinagem, que são: velocidade de corte, velocidade angular (rotação), velocidade de avanço da mesa e número de passadas de corte ainda de acordo com Diniz e Marcondes e Coppini (1999).

A velocidade de corte é a velocidade tangencial da ferramenta proveniente de sua rotação em torno da peça. Os movimentos de corte e avanço ocorrem simultaneamente no fresamento. É possível calcular a velocidade de corte por:

$$v_c = \pi d N / 1000, \quad (3.11)$$

sendo, N a rotação da ferramenta em rpm, v_c a velocidade de corte em m/min e d o diâmetro da fresa. A velocidade de corte é, normalmente, um parâmetro tabelado em função do material a ser cortado e da profundidade do desbaste ou acabamento superficial. Assim, podemos exprimir a rotação em função da velocidade de corte, visto que, na maioria das máquinas fresadoras, podemos regular a rotação da ferramenta, logo:

$$N = 1000v_c / \pi d \quad (3.12)$$

O movimento de avanço é o movimento entre a ferramenta e a peça fixada na mesa possibilitando a retirada de material juntamente ao movimento de corte. A velocidade de avanço da mesa é proveniente da interação de certas grandezas, a saber: o avanço por dente, que corresponde à distância entre duas superfícies em usinagem consecutivas consideradas na direção de avanço; e o avanço por volta, que corresponde ao avanço da ferramenta imediatamente após cada giro completo. Assim, o avanço por volta se dá por meio da equação:

$$av = ad \cdot z \quad (3.13)$$

em que, av é o avanço por volta; ad , o avanço por dente; e z , o número de dentes da ferramenta. O avanço por dente trata-se de uma grandeza tabelada em função do material a ser cortado, do tipo de fresa e da profundidade do desbaste ou acabamento. Então, após obter as grandezas precursoras, é possível calcular a velocidade de avanço da mesa (am) por meio da equação:

$$am = av \cdot N, \quad (3.14)$$

N sendo a rotação da ferramenta em rpm.

Como último parâmetro de usinagem têm-se o número de passadas de corte que se dá pela razão entre a profundidade de sobremetal, ou seja, o quanto de material metálico deseja-se remover para atingir as dimensões estipuladas, e a profundidade do corte a ser realizado no dado passe.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Material

O material de estudo é um aço inoxidável austenítico 304 (AISI 304) processado pela empresa Aperam South América, laminado, em forma de chapas com 6,2 mm de espessura. Trata-se de uma liga contendo Cromo, Níquel e Manganês vide composição química fornecida pela Aperam South América, apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do aço inoxidável austenítico 304 (Aperam South America).

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
Peso %	0,213	1,32	0,45	0,034	0,0013	18,14	8,02
Elemento	Mo	Co	V	Nb	Ti	N(ppm)	Cu
Peso %	0,104	0,182	0,049	0,008	0,003	476	0,16

As chapas recebidas foram previamente cortadas em seis chapas menores, sendo 4 nas dimensões de 102mm x 124mm e duas com as medidas de 124mm x 134mm conforme procedimento descrito no item 4.2.1, das quais três foram destinadas a caracterização inicial do aço conforme recebidos e três destinadas a laminação. Posteriormente, realizou-se usinagem de corpos de prova para ensaio uniaxial de tração em todas as chapas.

4.2 Metodologia

4.2.1 Corte das chapas

O corte das chapas foi realizado com auxílio de uma máquina do tipo fresadora da marca EUROSTEC modelo FTV3I, utilizando disco abrasivo de corte metalográfico da marca Teclago série TCM4 fabricados em óxido de alumínio, adaptado à máquina por meio de acessório fabricado no laboratório de ensaios e fabricação da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro - *Campus Macaé*), cujo desenho se encontra no Apêndice A. A rotação do disco foi definida com base na rotação de uma cortadora metalográfica, a saber: 1500 rpm. E, para refrigeração, utilizou-se o próprio sistema de fluido de corte presente na fresadora. A operação de corte das chapas é mostrada na Figura 3.

Cortaram-se três chapas, sendo duas de dimensões 102 mm x 124 mm e uma medindo 124 mm x 134 mm do material conforme recebidos do fabricante, destinando-as à

caracterização microestrutural inicial e à usinagem de corpos de prova para ensaio uniaxial de tração e ensaio de flexão. Outras três chapas, sendo duas de dimensões 102mm x 124mm e uma medindo 124 mm x 134 mm foram cortadas, encaminhadas à laminação e posteriormente usinadas para ensaios uniaxial de tração e de flexão.



Figura 3: Execução do corte das chapas de aço inoxidável 304 utilizando fresadora e disco de corte metalográfico.

4.2.2 Laminação

O processo de laminação a frio das chapas de aço inoxidável 304 foi executado no laboratório de processamento mecânico do IME (Instituto Militar de Engenharia) utilizando laminador piloto da marca FENN MFG modelo D-51710:1973 mostrado na Figura 4. Trata-se de um laminador na configuração DUO que possui dois rolos de diâmetros 133,7 mm, girando em sentidos opostos, com mesma velocidade, e distância entre si ajustável.

O equipamento foi configurado de modo a laminar as chapas até atingirem uma redução de 10% na sua espessura, que originalmente média 6,2 mm. Vale ressaltar, que, por se tratar de um equipamento antigo, existem restrições quanto ao ajuste das distâncias entre os cilindros de laminação, possibilitando pequenas alterações nas dimensões de redução de espessura diferindo-as do valor desejado. Cada chapa foi submetida a um passe de laminação, a fim de reduzirem 10% em sua espessura, seguindo o mesmo sentido da laminação de fabricação.



Figura 4: Laminador FENN MFG modelo D-51710:1973.

As dimensões iniciais das chapas cortadas conforme recebidas, doravante 0% de redução, são relacionadas na Tabela 2, e as dimensões das chapas após deformação devido à laminação, doravante 10% de redução, são mostradas na Tabela 3. Nota-se que, como esperado, a redução de espessura é compensada por um alongamento das chapas em seu comprimento, visto que as dimensões referentes a largura antes e depois da laminação possuem pequena variação o que confirma a conservação de volume no processo de conformação.

Tabela 2: Dimensões das chapas antes da laminação.

Chapa	ANTES DA LAMINAÇÃO			
	Redução Desejada (%)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)
1	10	101,7	123,02	6,2
2	10	102,04	124,11	6,2
3	10	123,85	134,25	6,2

Tabela 3: Dimensões das chapas após laminação.

Chapa	APÓS LAMINAÇÃO			
	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Redução Real (%)
1	101,78	156,28	5,56	10,32
2	102,12	155,51	5,60	9,68
3	124,37	173,6	5,53	10,81

4.2.3 Quantificação de fases

Foi realizado uma quantificação de fases presentes no aço, utilizando técnicas de indução magnética com auxílio de um equipamento ferritoscópico modelo FMP30 fabricado pela Fischer, a fim de identificar as fases magnéticas presentes no material possibilitando a medição da fração volumétrica de martensita α' , nas chapas conforme recebidas (0% de redução) e também das chapas submetidas ao processo de laminação descrito no ítem (4.2.2). Visto que a fase austenita é paramagnética e a fase martensita é uma fase magnética, o ferritoscópico consegue identificar a fase magnética e consequentemente fornecer o valor da fração volumétrica de martensita quando faz-se a sonda do equipamento tocar na chapa de aço, tal procedimento é ilustrado na figura 5.



Figura 5: Medição da fração volumétrica de martensita com auxílio de um ferritoscópico.

4.2.4 Usinagem de corpos de prova

Em uma primeira etapa, as chapas com 0 e 10% de redução de espessura, foram cortadas em retângulos maciços de 10 mm x 100 mm a fim de dar origem aos corpos de prova. Cada retângulo foi cortado seguindo uma orientação angular diferente, a saber: 0, 45 e 90° em relação a direção de laminação.

O procedimento de corte seguiu os mesmos padrões descritos na seção 4.2.1, porém, agora o objetivo é cortar as seis chapas em pequenos retângulos, sendo cada chapa destinada a uma direção de corte. Tal operação é ilustrada na Figura 6, onde temos como exemplo uma das chapas laminadas sendo cortada com orientação 0°.

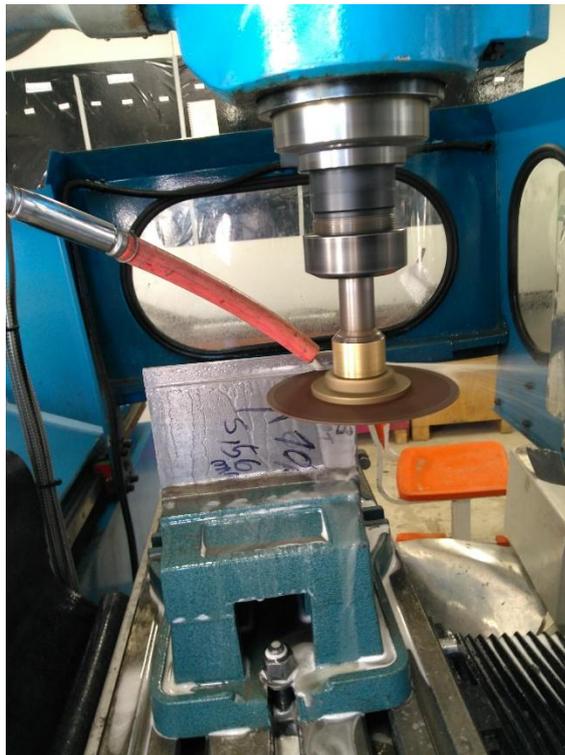


Figura 6: Corte de corpos de prova com orientação de 0° em relação a direção de laminação.

Após o corte das seis chapas foi obtido material nas dimensões adequadas para posteriormente ser fresado nas dimensões normatizadas. A chapa em corte ilustrada na Figura 6 deu origem aos retângulos cortados mostrado na Figura 7.



Figura 7: Chapa cortada na orientação 0° em relação a direção de laminação.

Em um segundo momento, os corpos de prova para execução dos ensaios uniaxiais de tração foram fresados com auxílio de uma fresadora da marca EUROSTEC modelo FTV3I equipada com uma ferramenta do tipo fresa topo de 12 mm de diâmetro fabricada em aço rápido. Foram usinados 15 corpos de provas dos quais distribuídos igualmente nas orientações angulares de 0 , 45 , 90° em reação à direção de laminação das chapas conforme recebido do fabricante e 15 corpos de prova nas mesmas direções, porém das chapas deformadas em 10% de redução, totalizando 30 corpos de provas destinados à execução de ensaio uniaxial de tração. O arranjo fresadora-ferramenta-corpo de prova é apresentado na Figura 8.



Figura 8: Arranjo fresadora-ferramenta-corpo de prova para execução de fresamento.

Todos os corpos de prova foram fresados atendendo as dimensões do corpo de prova reduzido de tração uniaxial segundo norma ASTM: E8/E8M – 09, vide dimensões apresentadas na Figura 9.

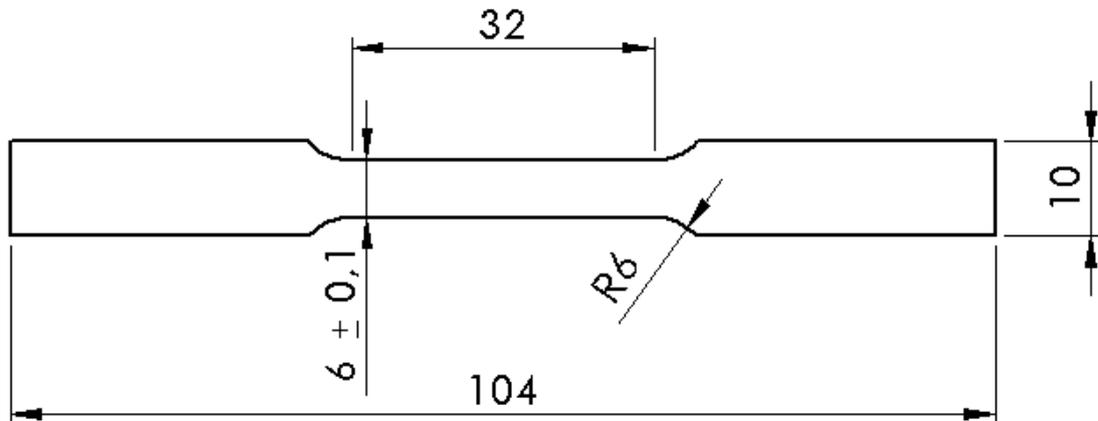


Figura 9: Dimensões em milímetros do corpo de prova para os ensaios de tração uniaxial.

Para executar a operação de fresamento é preciso calcular previamente os parâmetros de usinagem, como descritos na seção 3.5. Conforme apresentado por Marques (2013), os intervalos de velocidade de corte são encontrados na Tabela 4 em função do material a ser cortado e da profundidade de desbaste ou acabamento. No presente estudo, o material a ser fresado é o aço inoxidável 304 e utilizaremos como limite de resistência 110kgf/mm^2 , conforme S. Msolli et al., (2016), determinado para o aço inoxidável 304L, que tem suas propriedades próximas às do aço 304 e, como segundo parâmetro para seleção da velocidade de corte, utilizaremos o acabamento de 1,5mm, obtendo, assim, a faixa de velocidade de corte para o aço inoxidável 304 variando entre 22 e 26 m/min. Por segurança, foi selecionado a menor velocidade possível, ou seja 22 m/min, como destacado na Tabela 4.

Tabela 4: Velocidade de corte em função do material e profundidade de desbaste ou acabamento para fresas de aço rápido. Adaptado de Marques (2013).

Material a ser cortado	Velocidade de corte em m/min		
	Desbaste até a profundidade de		Acabamento 1,5mm
	8 mm	5 mm	
Aço de até 60 kgf/mm ²	16 – 20	22 – 26	32 - 36
Aço de 60-90 kgf/mm ²	14- 16	20 – 24	26 - 30
Aço de 90-110 kgf/mm ²	12 -14	18 – 22	22 - 26
Aço acima de 110 kgf/mm ²	8 – 12	14 – 16	16 - 20

Após selecionada velocidade de corte, calcula-se a rotação da fresa topo de diâmetro 12 mm a partir da equação (3.12), obtendo uma rotação de 583 rpm.

Como próximo parâmetro de usinagem, calcula-se a velocidade de avanço da mesa por meio da equação (3.14). Para tal procedimento, é preciso selecionar previamente o avanço por dente e calcular o avanço por volta, vide equação (3.13). Ainda segundo Marques (2013), é possível selecionar o avanço por dente por meio da Tabela 5, que relaciona o avanço por dente em função do material a ser cortado, tipo da fresa e profundidade de desbaste ou acabamento. Como citado, para fresamento dos corpos de prova se utilizou uma fresa de topo e o material a ser usinado foi o aço inoxidável 304 com limite de resistência 110 kgf/mm². Como acabamento superficial, foi estipulado de até 1 mm. Então o avanço de 0,08 mm/dente é selecionado conforme destacado na Tabela 5.

Tabela 5: Avanço por dente em função do material e profundidade de desbaste ou acabamento para fresas de aço rápido. Adaptado de Marques (2013).

Material a ser cortado	Tipo da fresa	Avanço em mm/dente		
		Desbaste até		Acabamento
		8 mm	5 mm	
Aço de até 60 kgf/mm ²	de topo	0,25	0,3	0,12
Aço de 60-90 kgf/mm ²		0,22	0,27	0,1
Aço de 90-110 kgf/mm ²		0,22	0,24	0,08
Aço acima de 110 kgf/mm ²		0,12	0,14	0,06

Dado o avanço por dente e sabendo que a fresa topo utilizada para usinagem possui quatro dentes, tem-se que o avanço por volta é de 0,32, conseqüentemente, substituindo os valores do avanço por volta e rotação da fresa na equação (3.14), obtém-se a velocidade de avanço da mesa de 186,56 mm/min.

4.2.4.1 Fixação do corpo de prova em fresadora para usinagem

Para fixação do corpo de prova na mesa da fresadora, foi fabricado no laboratório de ensaios e fabricação da UFRJ-Macaé um assessorio, visto em detalhe na Figura 10, cujo desenho encontra-se no Apêndice B, capaz de posicionar e fixar o corpo de prova possibilitando a execução da operação de usinagem com maior precisão obedecendo as dimensões normatizadas.



Figura 10: Detalhe do assessorio para fixação do corpo de prova na mesa da fresadora.

Duas barras maciças de alumínio, com perfil retangular, foram cortadas nas dimensões 153mmx50mm. Realizaram-se dois furos em cada barra, respeitando as distâncias dos rasgos de fixação da mesa a fim de prender o suporte. Um rasgo central de 12mm, posicionado simetricamente entre as duas barras, foi executado em cada uma das partes, formando assim um rebaixo para fixação do corpo de prova a ser usinado, conforme é mostrado na Figura 11, permitindo um posicionamento paralelo à mesa.



Figura 11: Esquema de fixação de corpo de prova para usinagem em fresadora.

Duas chapas de aço 1020 foram cortadas nas mesmas dimensões da barra de alumínio com objetivo de serem posicionadas em cima do corpo de prova a ser usinado para que não ocorra o escorregamento e exista perfeita aderência entre o arranjo corpo de prova-suporte e, assim, a usinagem tenha maior precisão. É possível ver em detalhe a montagem do suporte na Figura 12.



Figura 12: Montagem de suporte para usinagem de corpo de prova em fresadora.

4.2.5 Ensaios de tração uniaxial

Os ensaios de tração uniaxial foram executados no Laboratório de Fabricação e Ensaios Mecânicos da UFRJ-Macaé, com auxílio de uma máquina universal de ensaios da marca INSTRON modelo EMIC23-100, equipada com célula de carga de 100kN com uso de extensômetro INSTRON modelo 2630-112. Na Figura 13, é mostrado o esquema de montagem da máquina universal de ensaio para ensaio uniaxial de tração.



Figura 13: Esquema de montagem para ensaio de tração uniaxial.

Para avaliar as propriedades mecânicas foram utilizados 3 corpos de prova nas orientações angulares de 0, 45, 90° em relação a direção de laminação do aço conforme recebido do fabricante.

Nestes ensaios, adotou-se a velocidade constante de 1 mm/min e foram finalizados após a ruptura dos corpos de prova. Em seguida, foram determinadas as medidas verdadeiras de deformação, medidos pelo extensômetro, e tensão a partir dos valores de força medidos pela máquina. Verificou-se o limite de elasticidade, tensão de escoamento, tensão de ruptura, tensão limite de resistência e expoente de encruamento.

Posteriormente, foram executados outros três ensaios de tração uniaxial, novamente utilizando três corpos de prova nas orientações 0, 45, 90°, em relação a direção de laminação, com paradas programadas de modo que a carga seja interrompida quando o corpo de prova atingir 10% de deformação. Esta campanha de ensaios teve por objetivo a obtenção dos parâmetros necessários para o cálculo do coeficiente de anisotropia expresso pela equação 3.2,

a saber: deformação plástica verdadeira da largura e deformação plástica verdadeira na espessura. Após cálculo do coeficiente de anisotropia, verificou-se o coeficiente de anisotropia normal e anisotropia planar.

4.2.5.2 Adaptação do extensômetro para corpos de prova reduzidos.

Para melhor aquisição de dados no ensaio de tração uniaxial foi utilizado um extensômetro da marca INSTRON modelo 2630-112, que, originalmente, possui base de medida de 50mm, é usado em corpos de prova não reduzidos, e possui abertura máxima de 25mm, conforme Figura 14. Entretanto, as campanhas de ensaios de tração desse trabalho foram realizadas segundo norma ASTM E8/E8M-09, que prevê corpos de prova reduzidos e onde a base de medida deve ser de 25mm.



Figura 14: Extensômetro com base de medida 50mm. Adaptado <http://www.instron.com.br>.

Visando uma solução de baixo custo, a fim de manter a precisão do equipamento na coleta de dados de deslocamento conferindo melhor confiabilidade aos ensaios, visto que o extensômetro disponível para utilização possuía base de 50mm, foi desenvolvido uma peça, fabricada em plástico PLA, com auxílio de uma impressora 3D, cujo desenho técnico encontra-se no Apêndice C, para transformar a base de medida do extensômetro para 25mm e assim utilizá-lo em corpos de prova reduzido. A montagem do equipamento com o novo acessório é mostrada na Figura 15 passando a ter base de medida de 25mm.



Figura 15: Extensômetro com nova base de medida de 25mm.

4.2.6 Avaliação dos efeitos da taxa de deformação na transformação de fases

Para avaliação dos efeitos da formação de martensita induzida por deformação, foram realizadas, seqüências de ensaios de tração uniaxial com diferentes taxas de deformação, a saber: $1 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1}$ e $1 \cdot 10^{-2} \text{s}^{-1}$, sendo a velocidade de afastamento das garras durante o ensaio ajustada na máquina de tração (v), calculada em função do comprimento útil do corpo de prova (L) e da taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$), por meio da equação (6.15).

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{60 \cdot L} \quad (6.15)$$

Logo, para a taxa de deformação de $1 \cdot 10^{-4} \text{s}^{-1}$, a máquina foi ajustada para uma velocidade 0,192mm/min, assim como para a taxa de deformação de $1 \cdot 10^{-2} \text{s}^{-1}$ a máquina teve de ser ajustada para velocidade de 19,2mm/min.

Nesta etapa, realizou-se seis ensaios de tração uniaxial em corpos de prova, com 0% de redução de espessura, à velocidade de 0,192mm/min. Os cinco primeiros ensaios dessa etapa foram programados para interrupção da carga de tração quando atingissem um percentual de deformação previamente estipulado, a saber 10%, 20%, 30%, 40% e 50%; e, o sexto ensaio, até a ruptura do corpo de prova. Em seguida, mais seis corpos de prova novamente com 0% de redução de espessura foram ensaiados com velocidade de 19,2mm/min, com os cinco primeiros seguindo as mesmas paradas de 10%, 20% 30% 40% e 50% de deformação e, o sexto, até a ruptura do corpo de prova.

Em um segundo momento, foi executada uma sequência de cinco ensaios de tração uniaxial, em corpos de prova laminados à 10% de redução de espessura, à velocidade de 0,192mm/min. Os quatro primeiros ensaios tiveram suas paradas programadas ao atingirem 10%, 20%, 30% e 40% de deformação e o quinto ensaio foi realizado até a ruptura. Em seguida, mais quatro corpos de prova também laminados a 10% de redução foram submetidos ao ensaio de tração, agora com velocidade de 19,2mm/min, sendo os quatro primeiros ensaios seguindo as mesmas paradas de 10%, 20%, 30% e 40% de deformação e o quinto ensaio até a ruptura.

A tabela (6) mostra os ensaios realizados nos corpos de prova em função das velocidades selecionadas para avaliação dos efeitos da taxa de deformação na formação de martensita induzida e da espessura dos corpos de prova antes e depois de laminados.

Tabela 6: Ensaios realizados a duas velocidades diferentes para avaliação dos efeitos da formação de martensita induzida.

Corpo de prova	Redução de espessura após laminação	Espessura (mm)	Velocidade de ensaio (mm/min)	Critério de parada
1	Não foram laminadas	6,2	0,192mm/min	10% deformação
2		6,2		20% deformação
3		6,2		30% deformação
4		6,2		40% deformação
5		6,25		50% deformação
6		6,2		Ruptura
7	Não foram laminadas	6,2	19,2mm/min	10% deformação
8		6,2		20% deformação
9		6,2		30% deformação
10		6,2		40% deformação
11		6,2		50% deformação
12		6,2		Ruptura
1	10% de redução	5,58	0,192mm/min	10% deformação
2		5,58		20% deformação
3		5,58		30% deformação
4		5,58		40% deformação
5		5,58		Ruptura
6	10% de redução	5,58	19,2mm/min	10% deformação
7		5,58		20% deformação
8		5,58		30% deformação
9		5,58		40% deformação
10		5,58		Ruptura

Vale ressaltar que os ensaios com parada nos corpos de prova laminados não chegaram a 50% de deformação, pois apresentaram ruptura antes desse valor.

4.2.7 Simulação de ensaio de flexão

Foi realizada uma simulação computacional de um ensaio de flexão de três pontos utilizando o Software ABAQUS, com intuito de verificar a força de punção e a tensão gerada por ele no corpo de prova. O corpo de prova simulado teve suas propriedades mecânicas, segundo os resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial, descritos no ítem 4.2.5, para o aço inoxidável 304 com 0% de redução de espessura, tais dados serão apresentados e discutidos posteriormente.

A simulação foi programada para interrupção após 5% de deformação, como especificado em norma ASTM-D790-17, em que foi possível visualizar a força e tensão de flexão ao longo de sua execução.

4.2.8 Validação da simulação de ensaio de flexão

Paralelamente à simulação computacional, executou-se um ensaio experimental de flexão em máquina universal de ensaios da marca INSTRON modelo EMIC23-100, cujo esquema de montagem é mostrado na Figura 16, objetivando a validação da simulação computacional. Os parâmetros ajustados na máquina de ensaios foram o deslocamento de 19,2mm e o tempo de deslocamento de um minuto.

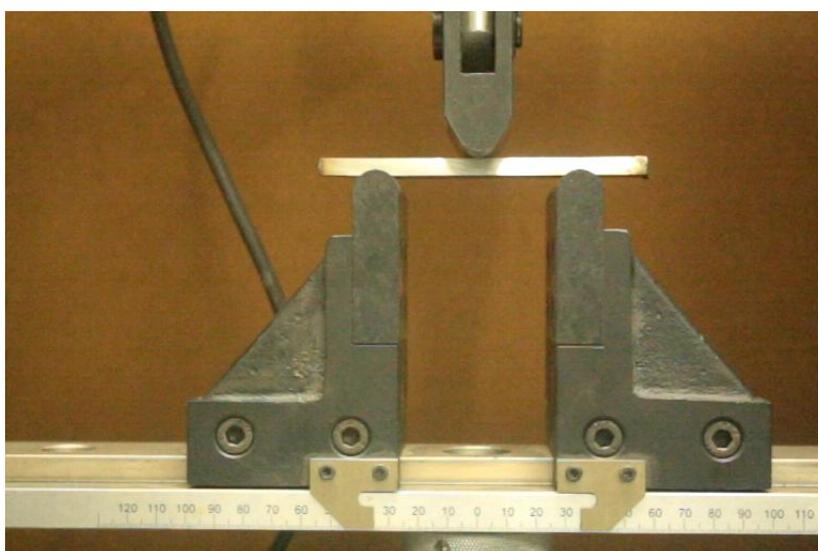


Figura 16: Esquema montagem de ensaio de flexão de três pontos.

Por meio da tabela de dados fornecida pelo software de aquisição de dados, foi possível identificar os pontos até 5% de deformação de flexão, que é o limite estipulado pela norma

ASTM – D790-17. Assim, permite-se a plotagem dos gráficos tensão de flexão por deslocamento e de força por deslocamento, possibilitando a comparação com os gráficos da simulação a fim de validá-los.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Quantificação de fases

A quantificação da fração volumétrica de martensita, proveniente da conformação mecânica por laminação nas chapas, foi determinada com auxílio do Ferritoscópio Fischer modelo FMP30, conforme descrito no item 4.2.3. Foram realizadas medições nas três chapas que não foram laminadas e nas três chapas que passaram por laminação.

Para o aço conforme recebido, a fração volumétrica de martensita apresentou uma média de 0,96. Já após a laminação com 10% de redução na espessura, constatou-se uma média de 2,95% de martensita. Observa-se que, após a laminação, o volume de martensita presente nas chapas é três vezes maior que seu valor inicial.

5.2 Avaliação das propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do aço inoxidável 304 foram levantadas a partir dos ensaios de tração uniaxial de velocidade 1 mm/min, obtendo um resultado para cada orientação angular $\alpha = 0, 45, 90^\circ$, em relação à direção de laminação.

Tanto para o aço conforme recebido quanto para o laminado, avaliaram-se as variações nas propriedades mecânicas segundo as distintas angulações, verificando, assim, os valores de limite de escoamento (σ_e), tensão limite de resistência (σ_r), coeficiente de anisotropia plástica (R), anisotropia planar (ΔR), anisotropia normal (\bar{R}), expoente de encruamento (n) e deformação uniforme (ϵ_u).

Com os dados de tensão de engenharia, fornecidos pela máquina de ensaios, e os de deformação de engenharia, fornecidos pelo extensômetro acoplado, foram calculados os valores de tensão e deformação verdadeira respectivamente.

A Figura 17 apresenta o conjunto de resultados das curvas de tensão verdadeira x deformação verdadeira, nas orientações angulares $\alpha = 0, 45, 90^\circ$, para o aço com 0% de redução; e, na Figura 18, encontram-se as curvas nas mesmas orientações em relação à direção de laminação, para o aço com 10% de redução.

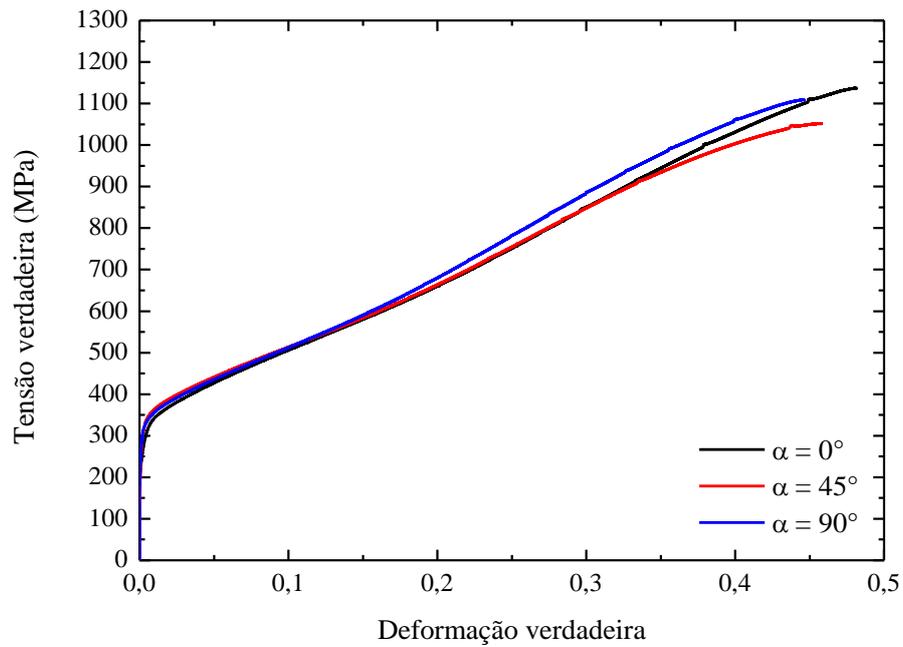


Figura 17: Gráfico tensão verdadeira x deformação verdadeira em ensaio uniaxial de tração, com velocidade de 1mm/min em diferentes orientações, com relação a direção de laminação para o aço inoxidável 304 conforme recebido.

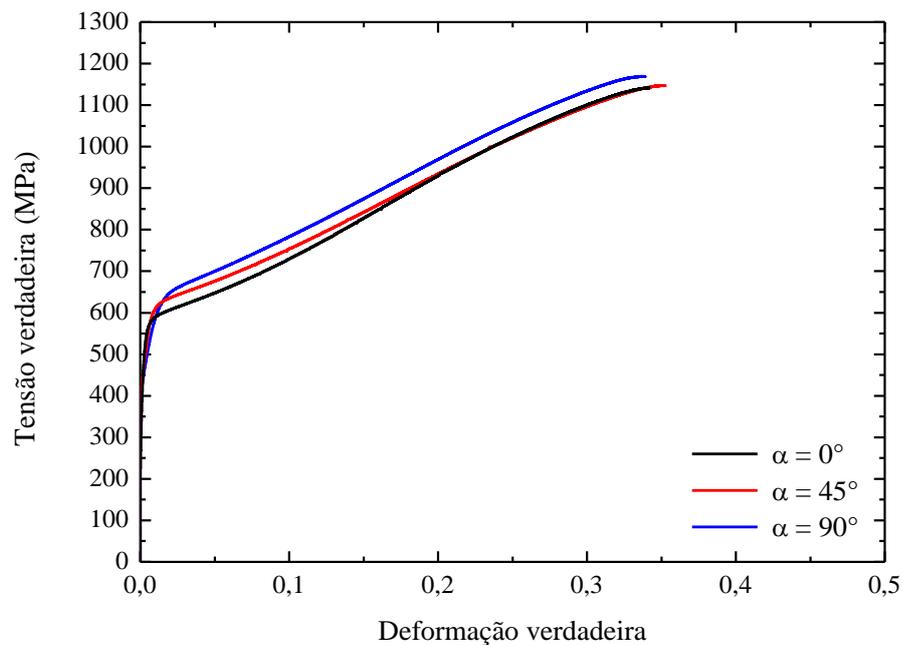


Figura 18: Gráfico tensão verdadeira x deformação verdadeira em ensaio uniaxial de tração, com velocidade de 1mm/min em diferentes orientações, com relação à direção de laminação para o aço inoxidável 304 laminado a 10% de redução de espessura.

Analisando a Figura 17, pode-se notar que o material a 0% obteve uma deformação uniforme máxima de 48,21%, ao passo que, após laminação, a máxima deformação uniforme foi de 35,58%. Assim, verifica-se que o aço conforme recebido apresentou maiores valores de deformação uniforme nas três orientações, quando comparados ao aço laminado, cujo comportamento observa-se na Figura 18. Contudo, o aço laminado, apresentou maiores valores de limite de resistência.

A partir da Figura 17, observa-se, ainda, que, para o aço não laminado, o limite de resistência tem seu maior valor na direção de laminação, bem como maior deformação uniforme. Em contrapartida, para o aço laminado, verifica-se na Figura 18 que o maior limite de resistência é atingido na orientação 90° à direção de laminação, porém, a maior deformação uniforme é percebida na orientação de 45°.

Os valores das propriedades mecânicas, oriundos das curvas de tensão verdadeira x deformação verdadeira para o aço a 0 e 10% de redução de espessura, são listados na Tabela 7.

Tabela 7: Propriedades mecânicas determinadas para chapas de aço inoxidável 304 antes e depois de laminação a 10% de redução de espessura por meio de ensaio de tração uniaxial.

Antes da Laminação - 0% de redução da espessura								
Orientação	σ_e (Mpa)	σ_r (Mpa)	R	ΔR	\bar{R}	$n_{10\%}$	$n_{20\%}$	ϵ_u (%)
0°	339,90	1137,302	0,97	0,005	0,99	0,329	0,523	48,21
45°	330,98	1051,960	0,99			0,220	0,406	45,77
90°	336,76	1109,132	1,04			0,241	0,478	44,61
Após Laminação - 10% de redução da espessura								
Orientação	σ_e (Mpa)	σ_r (Mpa)	R	ΔR	\bar{R}	$n_{10\%}$	$n_{20\%}$	ϵ_u (%)
0°	568,89	1141,692	0,80	-0,16	0,95	0,818	2,126	34,23
45°	645,42	1147,589	1,03			0,823	1,295	35,58
90°	674,43	1169,402	0,95			0,853	1,503	34,75

Da Tabela 7, é possível verificar que os valores de limite de escoamento para as três orientações do aço antes da laminação, apresentam uma variação entorno de 2% entre si. Entretanto, quando esses valores são comparados aos limites de escoamento do aço após laminação, observa-se que o patamar de tensão dobrou. Ainda em termos do limite de escoamento, pode-se observar que é menor na direção diagonal para o aço com 0% de redução e na direção de laminação para o laminado, mostrando que as deformações plásticas acontecem primeiro em diferentes orientações para distintas reduções.

Em geral, pode-se relacionar esse aumento da resistência do aço laminado à transformação de fases induzida por plasticidade proveniente do processo de laminação, em

que parte da austenita foi transformada em martensita, uma fase mais resistente, conferindo ao aço um novo comportamento mais resistente.

Os coeficientes de anisotropia plástica seguem a relação $R_{0^\circ} > R_{90^\circ} > R_{45^\circ}$, com valores pouco variáveis e próximo a uma unidade para as chapas antes da laminação e $R_{90^\circ} > R_{45^\circ} > R_{0^\circ}$, com valores mais variáveis e distantes a um para as chapas laminadas. Essa variação na anisotropia plástica explica as mudanças de propriedades mecânicas conforme a direção no plano da chapa.

Ainda, nota-se que o aço a 0% de redução apresentou um valor de anisotropia planar ($\Delta R=0,005$) próximo a um material ideal para estampagem, e anisotropia normal ($\bar{R}=0,99$) próxima a de um material isotrópico. Ademais, percebe-se que o aço a 10% de redução apresentou tendência a formação de orelha a 45 e a 135° ($\Delta R=-0,16$) quando submetido à estampagem e uma leve anisotropia ($\bar{R}=0,95$), conforme Tabela 7.

5.3 Análise teórica e experimental do comportamento plástico

Utilizando um ajuste não linear por meio da equação de Swift (3.1), foi determinado o expoente de encruamento (n), capaz de medir o quanto o material tem capacidade de distribuir uniformemente as deformações por toda peça. O ajuste foi feito com auxílio do Software OriginPro 8, programa dedicado ao tratamento de dados e confecção de gráficos, para 10% e 20% de deformação plástica em ensaio de tração uniaxial. O mesmo procedimento foi realizado para as chapas conforme recebidas e laminadas a 10% de redução.

Nas Figuras 19 e 20, é possível verificar o ajuste por Swift para 10 e 20% de deformação plástica respectivamente, ambas para os ensaios de tração referentes à direção de laminação. Nota-se que para as duas porcentagens de deformação (10 e 20%) e tanto para as chapas laminadas quanto as conforme recebidas, a tendência da curva obtida experimentalmente é próxima à curva teórica, mostrando que a equação de Swift é um ajuste adequado para o cálculo do expoente de encruamento.

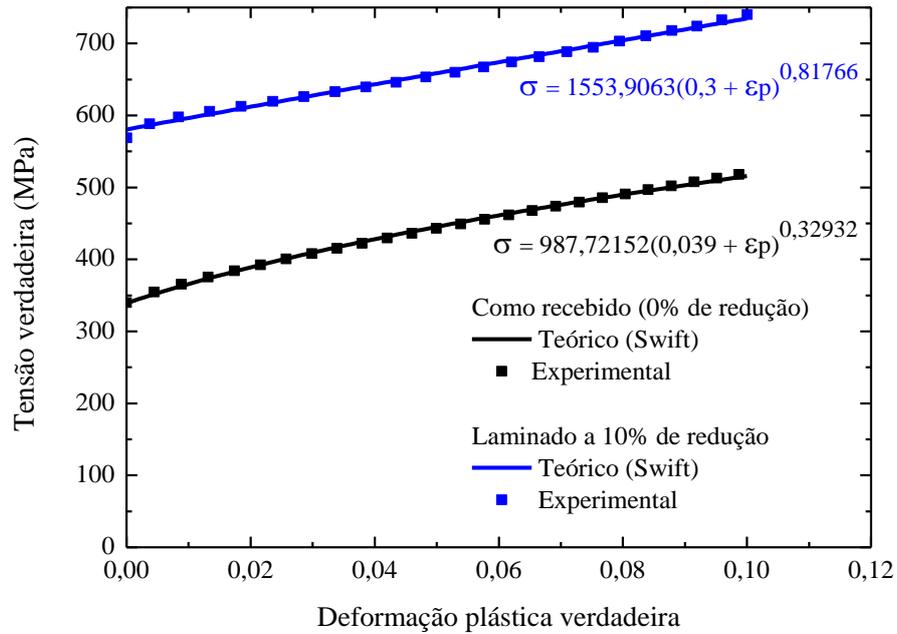


Figura 19: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift a 10% de deformação plástica.

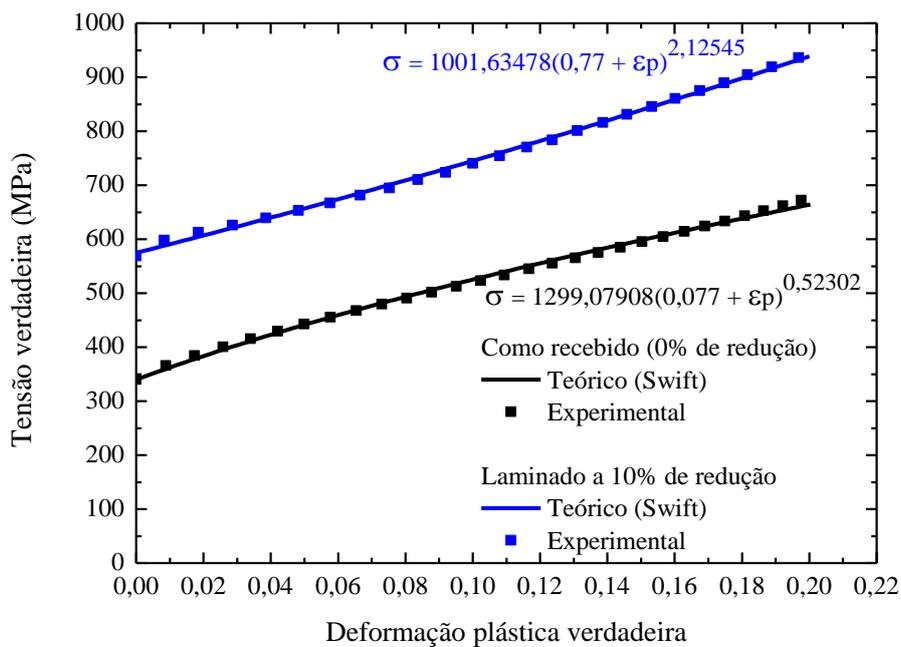


Figura 20: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift a 20% de deformação plástica.

Na Tabela 7, verificam-se os valores correspondentes ao expoente de encruamento em todas as orientações. Observa-se que os valores de expoente de encruamento diferem de acordo com o percentual de deformação plástica, mostrando que no aço inoxidável 304 existem diferentes patamares de encruamento. Ademais, nota-se que para o aço com 10% de redução os expoentes de encruamento são em torno 30% maiores quando comparados às chapas não laminadas, mostrando que em caso de estampagem, por exemplo, as chapas laminadas apresentarão maiores resistência à estrição, pois distribuirão mais uniformemente as deformações por toda peça.

Por fim, um novo ajuste por Swift foi realizado para todo o comportamento plástico do material, para o ensaio na direção de laminação, em que foi possível observar que as curvas teóricas e experimentais seguem uma mesma tendência, mostrando assim que um ajuste pela equação de Swift descreve de maneira eficiente todo comportamento plástico do aço inoxidável 304.

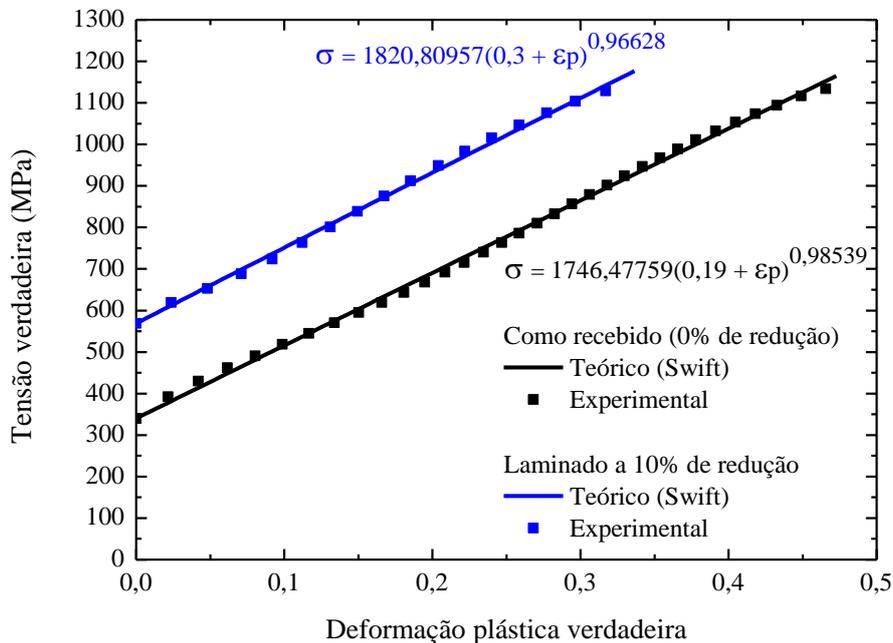


Figura 21: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift.

Todos os ajustes por meio de Swift, nas orientações 45 e 90° em relação a direção de laminação encontram-se no Apêndice C, onde é possível verificar que as curvas teóricas e experimentais para o comportamento plástico seguem as mesmas tendências descritas nessa sessão para a direção de laminação.

5.4 Efeitos da taxa de deformação na transformação de fases

Com os ensaios de tração uniaxial em diferentes velocidades, a saber: 19,2 e 0,192mm/min, conforme descritos no item 4.2.6, foi possível obter a curva tensão de engenharia x deformação de engenharia para as diferentes taxas de deformação. Ainda, com as mesmas velocidades, porém nos ensaios com parada programada, obteve-se a fração volumétrica de martensita proveniente da deformação oriunda, do ensaio de tração uniaxial ao fim do teste. O mesmo procedimento de coleta de dados foi realizado para o aço a 0 e 10% de redução de espessura, e as curvas tensão x deformação foram plotadas nas Figuras 22 e 23, bem como as frações volumétricas de martensita.

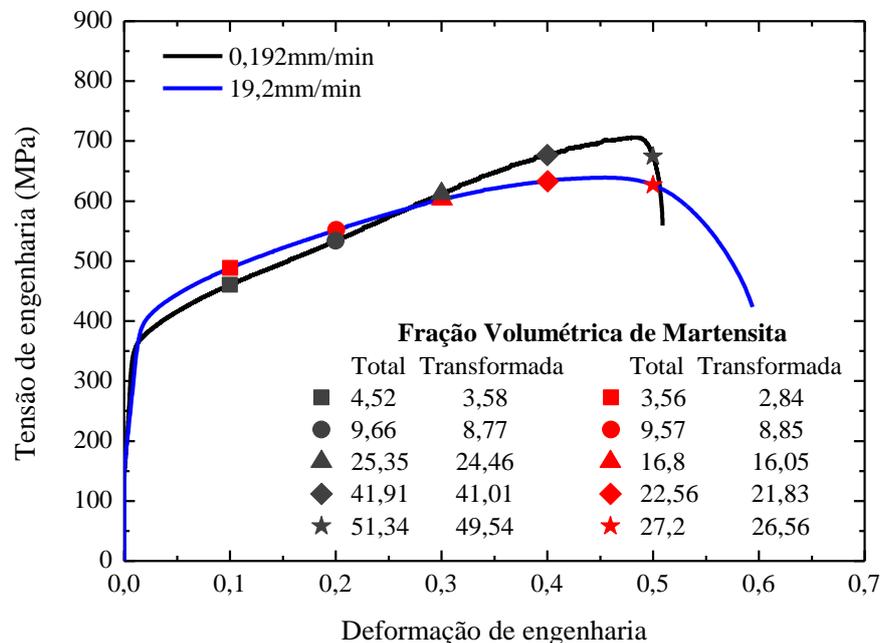


Figura 22: Comportamento tensão de engenharia x deformação de engenharia em tração uniaxial em função da taxa de deformação e fração volumétrica de martensita em determinados valores de deformação. Aço Inoxidável 304 conforme recebido (0% de redução).

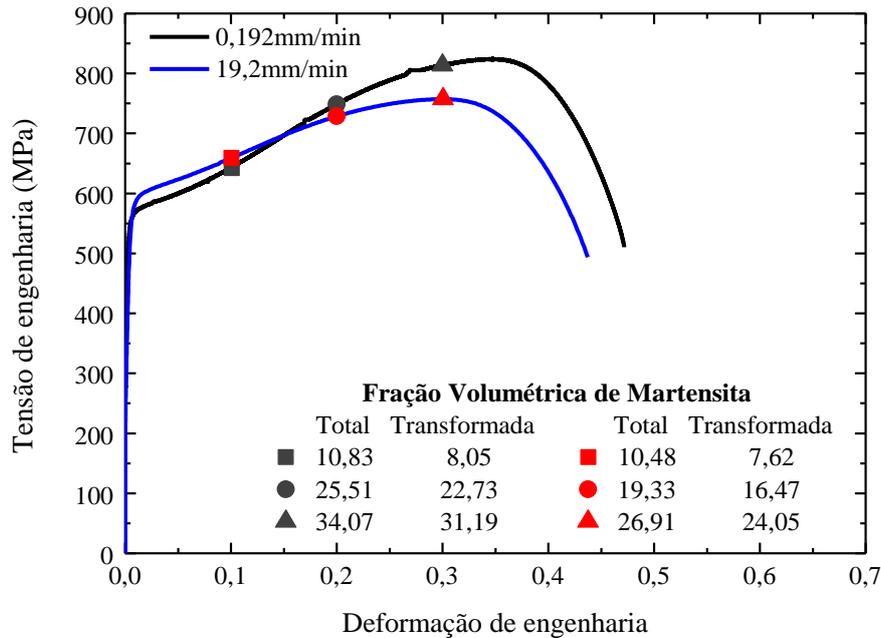


Figura 23: Comportamento tensão de engenharia x deformação de engenharia em tração uniaxial em função da taxa de deformação e fração volumétrica de martensita em determinados valores de deformação. Aço Inoxidável 304 laminado a 10% de redução.

Pode-se notar que nos dois gráficos das Figuras 22 e 23 o comportamento das curvas obtiveram a mesma tendência, ou seja, no regime de pequenas deformações os ensaios com as velocidades de 19,2mm/min apresentaram maiores valores de tensão quando comparados às velocidades de 0,192mm/min. Ao passo que, após a deformação de 0,3 para o aço conforme recebido e 0,2 para o aço laminado, há uma inversão nos valores de tensão e os ensaios mais lentos assumem maiores patamares aumentando a diferença de tensão, conforme Figuras 22 e 23. Esse fato pode estar relacionado à pequena variação da fração transformada de martensita, próxima de 10%, no regime de pequenas deformações. Nos pontos de inversão dos valores de tensões, a martensita presente nos ensaios com velocidades de 0,192mm/min apresentam uma maior variação, próximo de 50%, quando comparados ao de velocidades de 19,2mm/min.

Ademais, é possível constatar que os ensaios com o aço laminado apresentaram maiores volumes de martensita transformada do que nos ensaios do aço conforme recebido nos pontos de deformação em comum, a saber: 10, 20, 30 e 40% de deformação. Um maior volume de martensita conferiu ao material laminado maior resistência, fazendo com que ele suporte maiores níveis de tensão.

5.5 Simulação computacional e validação do ensaio de flexão

Após a simulação computacional do ensaio de flexão realizada no ABAQUS, foi possível levantar os dados de força e tensão de flexão em função do deslocamento. Paralelamente, obtiveram-se experimentalmente os dados de força e tensão de flexão e, assim, a plotagem dos gráficos tensão x deslocamento conforme Figura 24 e força x deslocamento conforme Figura 25 do ensaio simulado junto com o experimental. É válido salientar que ambos ensaios tiveram os mesmos parâmetros de execução, segundo normatização.

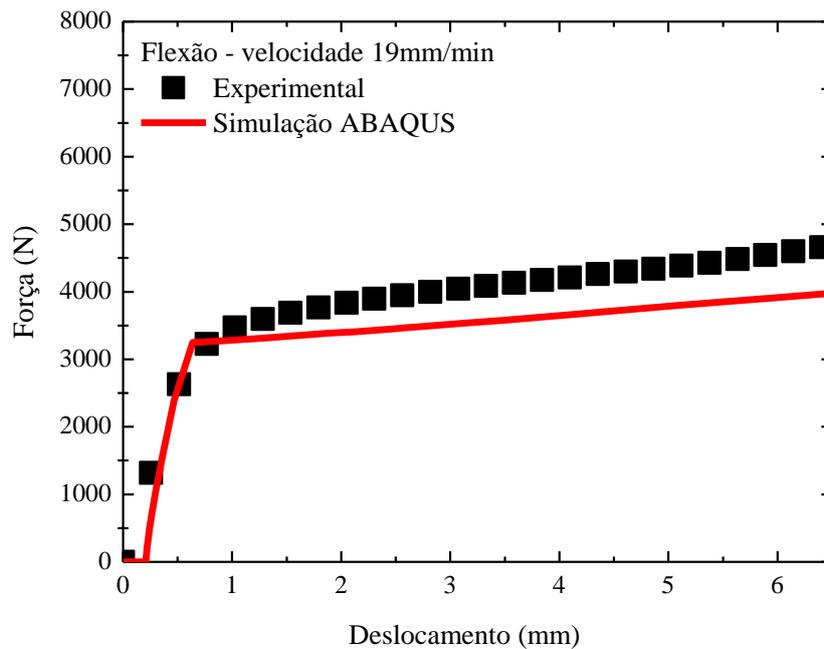


Figura 24: Comportamento força x deslocamento em ensaio de flexão de três pontos - simulação e experimental.

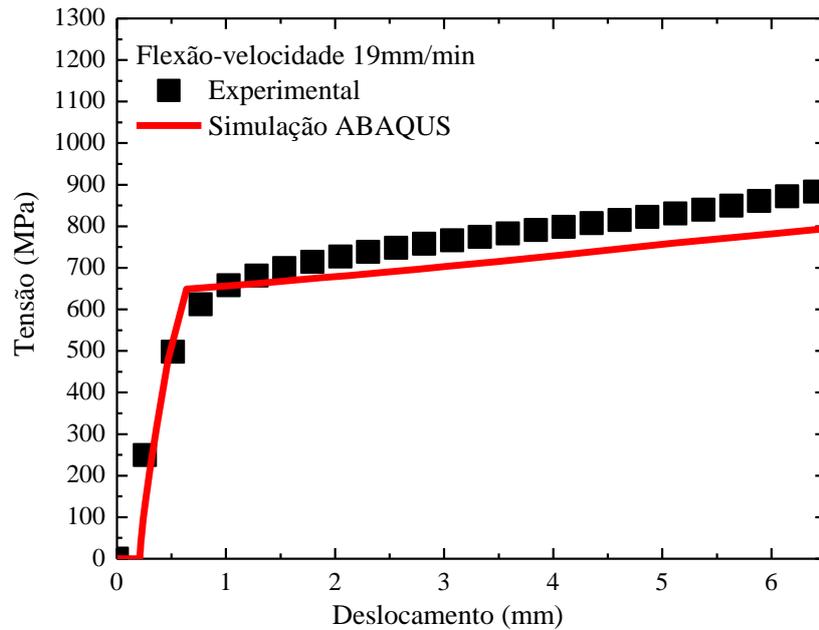


Figura 25: Comportamento tensão x deslocamento em ensaio de flexão de três pontos - simulação e experimental.

Verificou-se, por meio dos gráficos nas Figuras 23 e 24, que as tensões e a força realizadas na simulação ficaram com valores próximos aos experimentais, validando assim a simulação. Nota-se que força e a tensão máxima proveniente da simulação diferiram em aproximadamente 10% do ensaio experimental.

A fim de ilustrar a validação, é possível observar na Figura 25 o instante em que o corpo de prova sofre uma deformação de 5% na simulação e no ensaio experimental, mostrando então um comportamento similar.

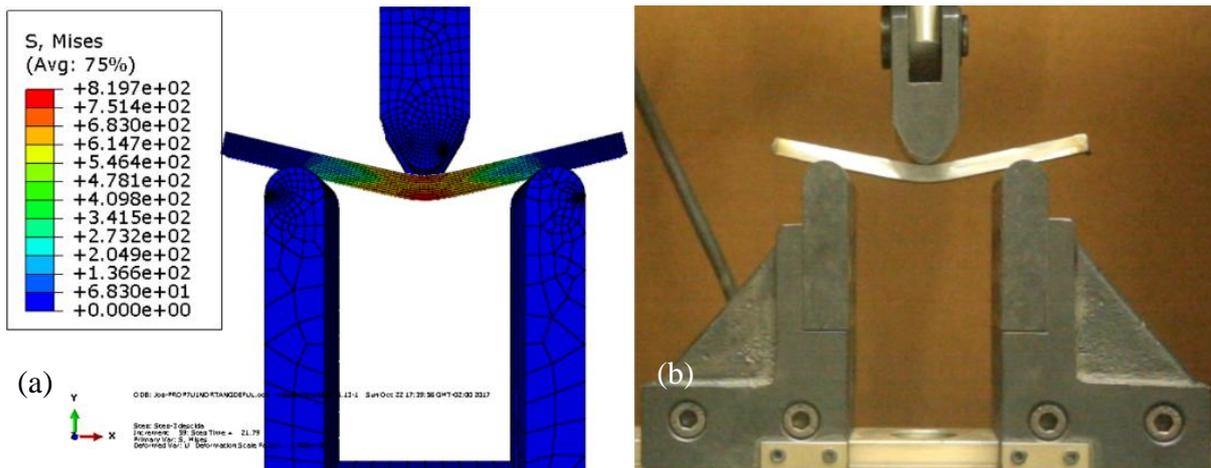


Figura 26: (a) Simulação do ensaio de flexão, (b) ensaio de flexão experimental.

A simulação das distribuições de tensão no corpo de prova do ensaio de flexão é representada na Figura 26 onde é possível observar que a região de maior tensão é localizada no contato entre o punção e o corpo de prova, ou seja, região de maior deslocamento.

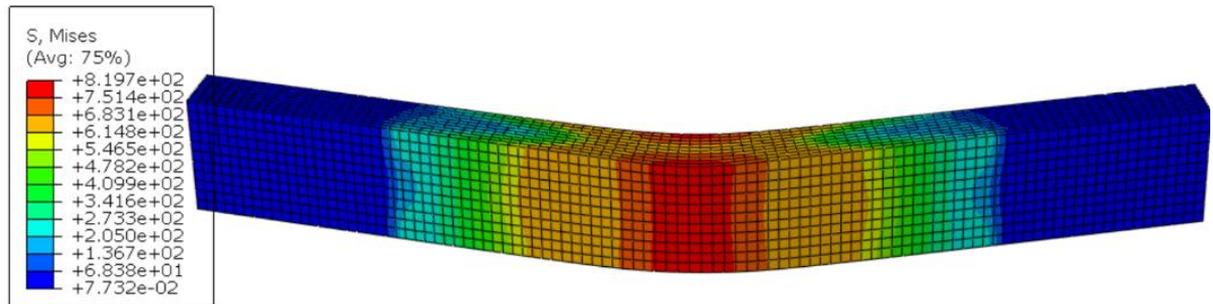


Figura 27: Simulação das distribuições de tensões no corpo de prova em flexão submetido à 5% de deformação.

6. CONCLUSÕES

No presente trabalho, o comportamento mecânico de uma chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304 foi caracterizado por meio de ensaio uniaxial de tração e laminação a frio a 10% de redução de espessura. Ainda, a simulação computacional de um ensaio de flexão para o aço inoxidável 304 foi avaliada por meio da realização de ensaio experimental. Com base na análise dos resultados experimentais foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

(1) Verificou-se que, após laminação, ocorreu o efeito TRIP, no qual parte da austenita se transformou em martensita atingindo 2,95% de fração volumétrica, ou seja, três vezes maior do que seu valor inicial.

(2) Com os ensaios de tração uniaxial para o aço com 10% de redução, os níveis de tensão de escoamento e de limite de resistência aumentaram cerca de 50% e 10%, respectivamente. Em contrapartida, as deformações uniformes para o aço laminado reduziram em torno de 30%. Essa maior resistência conferida ao material após laminação acontece em razão do aumento da fração volumétrica de martensita transformada durante a laminação.

(3) Foi verificado que o aço inoxidável 304 com 0% de redução apresentou valor próximo da isotropia, $\bar{R}=0,99$, ao passo que o aço laminado a 10% apresentou uma leve anisotropia, $\bar{R}=0,95$. Ademais, no material recebido constatou-se que possui uma boa estampabilidade, apresentando anisotropia planar $\Delta R=0,005$. Em contrapartida, o aço laminado apresenta tendência ao orelhamento, $\Delta R = -0,16$.

(4) O ensaio de velocidade 0,192mm/min apresentou uma variação 50% maior de martensita transformada, bem como maiores níveis de tensão quando comparado ao ensaio de maior velocidade no regime de grandes deformações ($\epsilon > 0,2$), concluindo-se que maiores valores de fração transformada geram maiores níveis de tensões.

(5) Por fim, a simulação realizada no ABAQUS se mostrou satisfatória para previsão de carga e tensão geradas no ensaio de flexão. Desta forma, em trabalhos futuros, o ABAQUS poderá ser utilizado como ferramenta para previsão de carga de laminação.

7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados avaliados no presente trabalho é possível propor os seguintes estudos:

- (1) Avaliação do efeito TRIP em chapas de aço inoxidável austenítico em diferentes porcentagens de redução de espessura.
- (2) Avaliação da influência da temperatura na transformação martensítica a diferentes taxas de deformação durante ensaio uniaxial de tração no aço inoxidável 304.
- (3) Simulação computacional no Software ABAQUS do processo de laminação, a fim de obter a carga de laminação para diferentes reduções de espessura em chapa.

REFERÊNCIAS

ASTM D790-17, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2017

ASTM E8/E8M – 09, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2010

BOTELHO Ramón Alves, Laminação Assimétrica e Propriedades de Aços Elétricos GNO com 3,0% de Silício. Rio de Janeiro: IME, 2012.

CARDOSO, Marcelo Costa. Avaliação do comportamento plástico de uma chapa de aço inoxidável austenítico 304L por meio de ensaio de tração uniaxial e curva limite de conformação. Volta redonda: UFF, 2012.

CETLIN, P. R.; HELMAN, H. Fundamentos da Conformação. Mecânica dos Metais. 2ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

CHAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos: Características gerais, tratamentos térmicos e principais tipos. 4.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1977

CHAVERINI, Vicente Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas. 2Ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986

CHAVERINI, Vicente. Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento. 2Ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986

COSTA e Silva A.L e Mei, P.R.. Aços inoxidáveis, Aços e ligas especiais. 2 ed. São Paulo: Eletrometal S.A., 2006

.

DINIZ, Anselmo Eduardo. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. 8ed. São Paulo: Artliber, 2013.

GARCIA Amauri, Jaime A., Carlos A. D. S. Ensaio dos Materiais, 2Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

Hibbeler R. C.. Resistência dos Materiais. 7Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LOPES Wellington, Estudo do Encruamento dos Aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MSOLLIA, S. et al. Numerical modeling of the deformation of AISI 304L using a tangent additive Mori-Tanaka homogenization scheme: Application to sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 235, p. 1-19, 2016.

OSCAR Balancin, Tensão e deformação equivalentes (efetivas). Disponível em <<http://www.dema.ufscar.br/termomec/index.php/visao-cientifica/tensao-e-deformacao-efetivas-equivalentes>>. Acessado em 15 de junho de 2017.

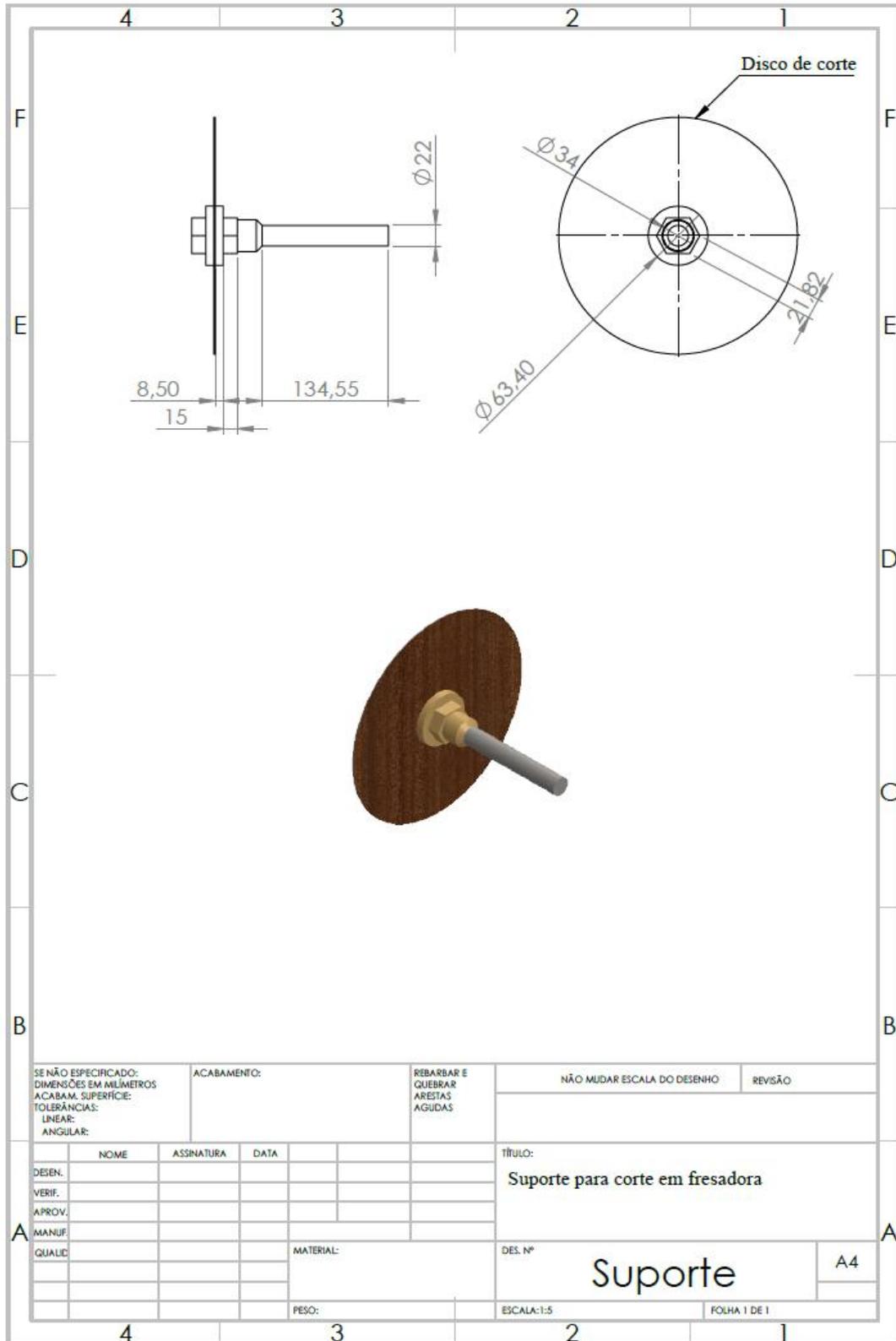
SALES Luciana Spíndola, Envelhecimento na Martensita Induzida por Deformação em Aços Tipo AISI 304, Belo Horizonte: UFMG, 2006

Tebecherani, C de T. P., Aços inoxidáveis. Disponível em <http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html>. Acessado em 08 de novembro de 2017.

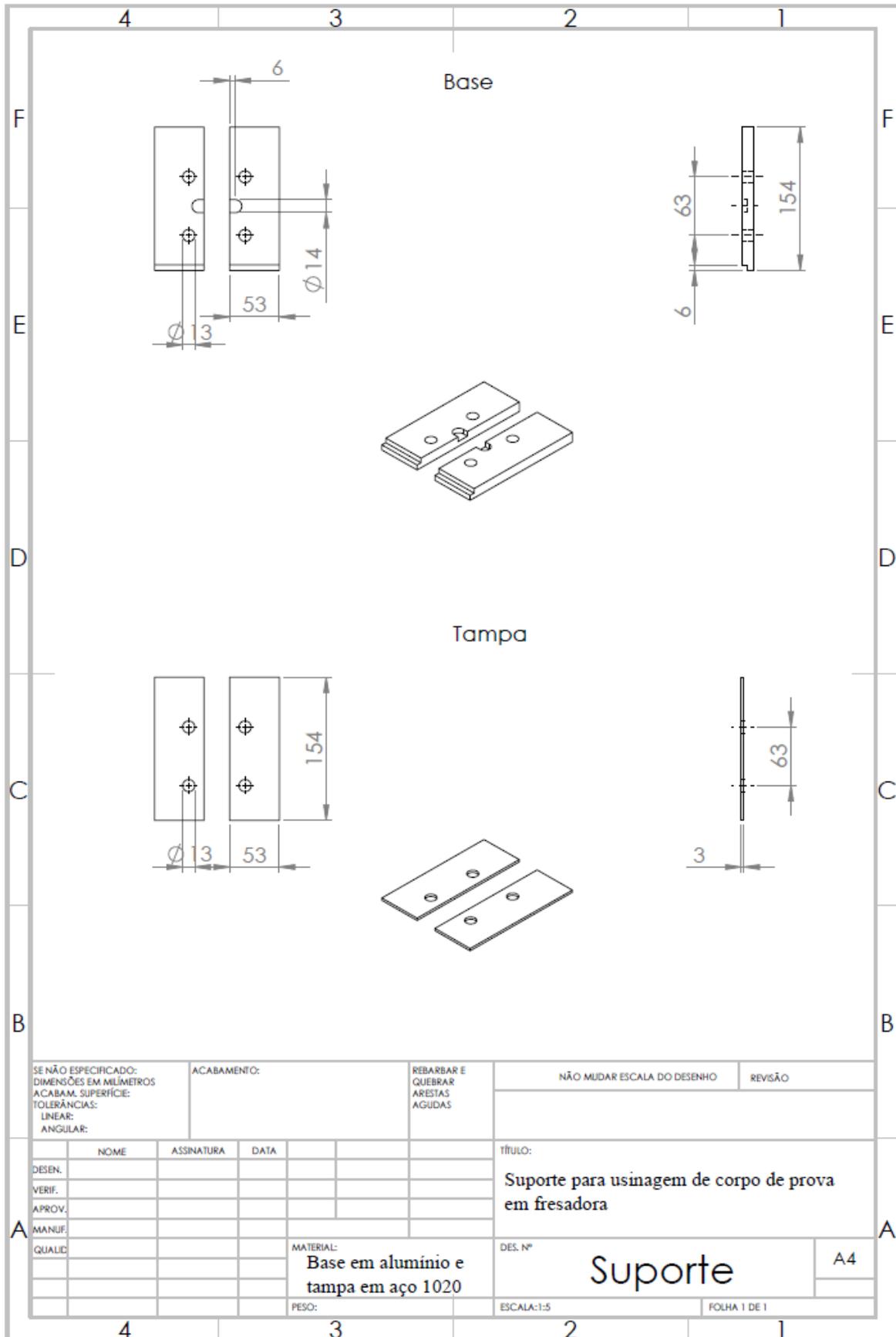
WILLIAM, D. CALLISTER, JR., Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução, 7.Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

APÊNDICES

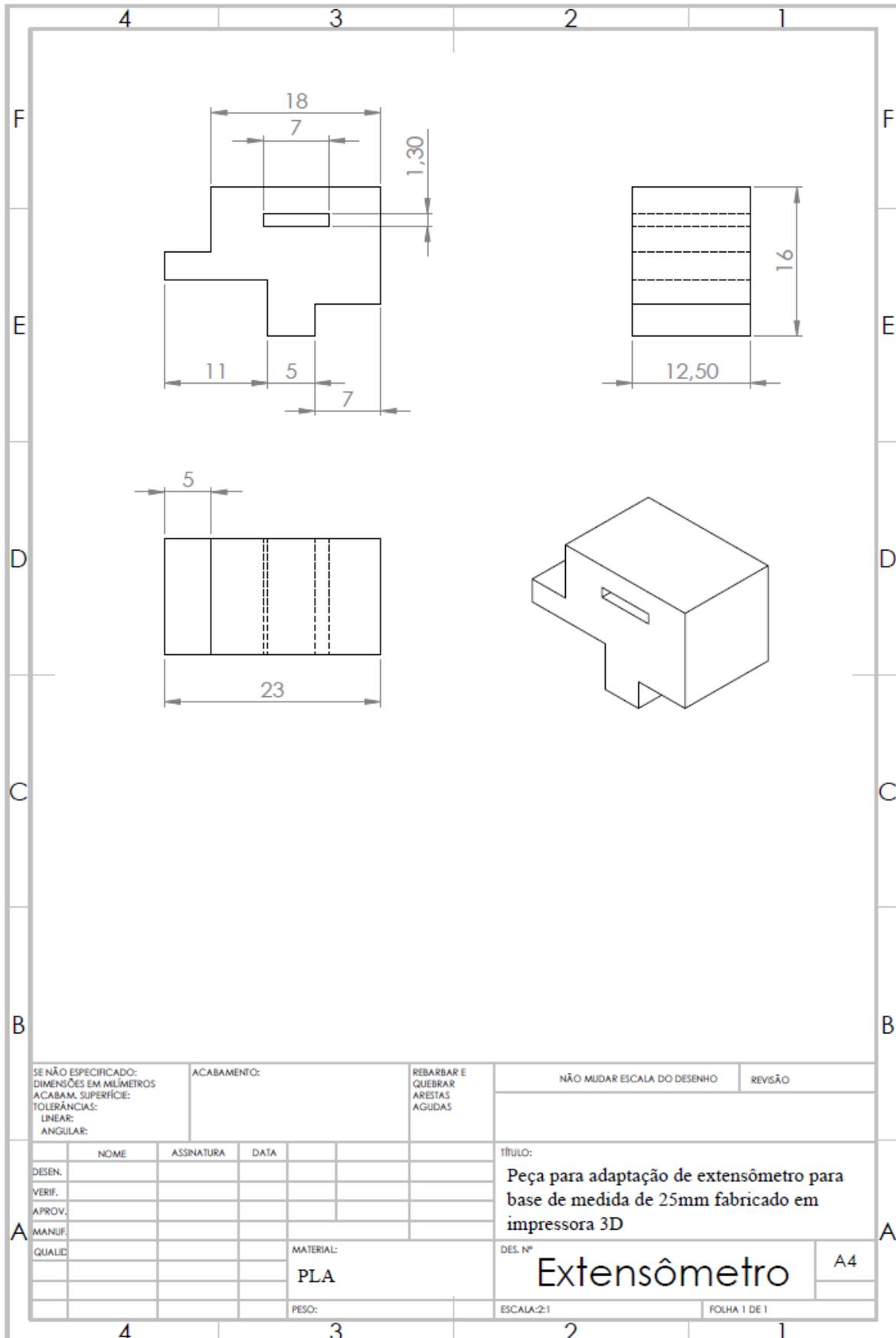
APÊNDICE A – Suporte para fixação do disco de corte metalográfico em fresadora.



APÊNDICE B – Suporte para usinagem de corpo de prova reduzido em fresadora.



APÊNDICE C – Peça para extensômetro com base de medida 25mm.



APÊNCICE D - Comportamento plástico do aço inoxidável 304

As figuras 28, 29, 30 e 31 apresentam os gráficos do comportamento plástico do aço inoxidável 304 com ajuste não linear por meio da equação de Swift para 10 e 20% de deformação plástica respectivamente, nas orientações 45 e 90° em relação a direção de laminação, a fim de calcular o expoente de encruamento (n). Nota-se as curvas experimentais apresentam comportamento similar a curva teórica, reafirmando que a equação de Swift é um bom método para o cálculo do expoente de encruamento.

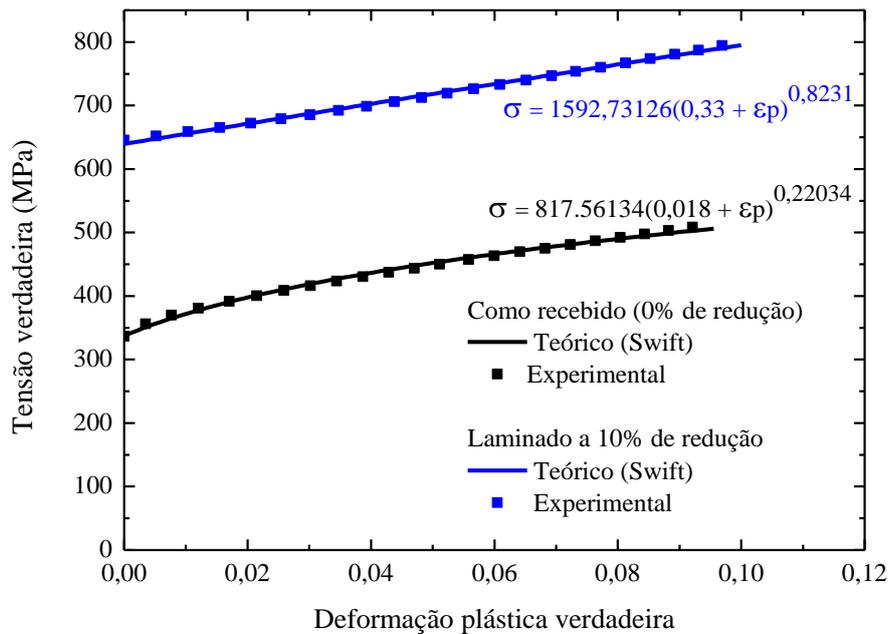


Figura 28: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift a 10% de deformação plástica na orientação 45° em relação a direção de laminação.

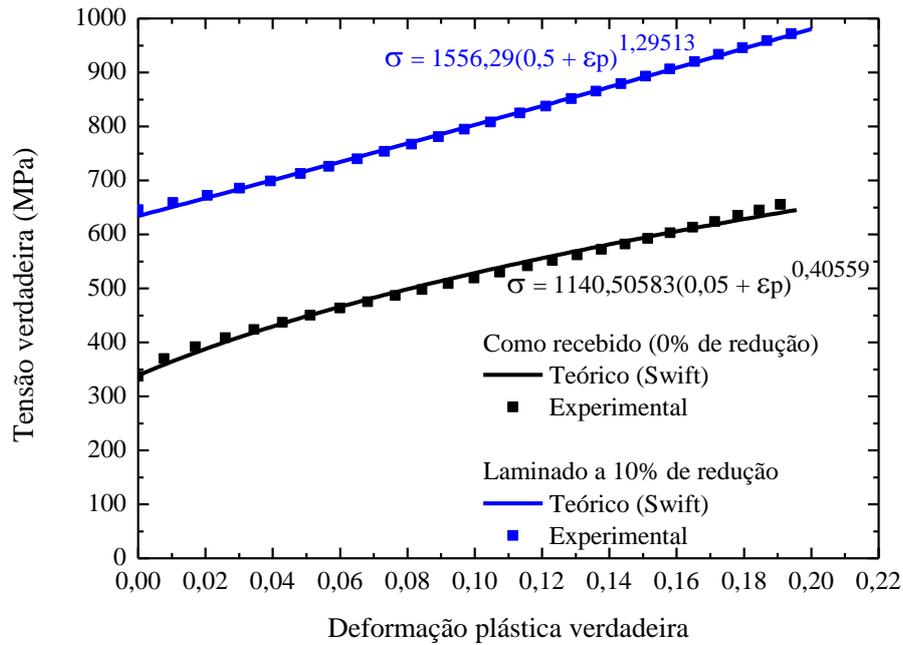


Figura 29: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift a 20% de deformação plástica na orientação 45° em relação a direção de laminação.

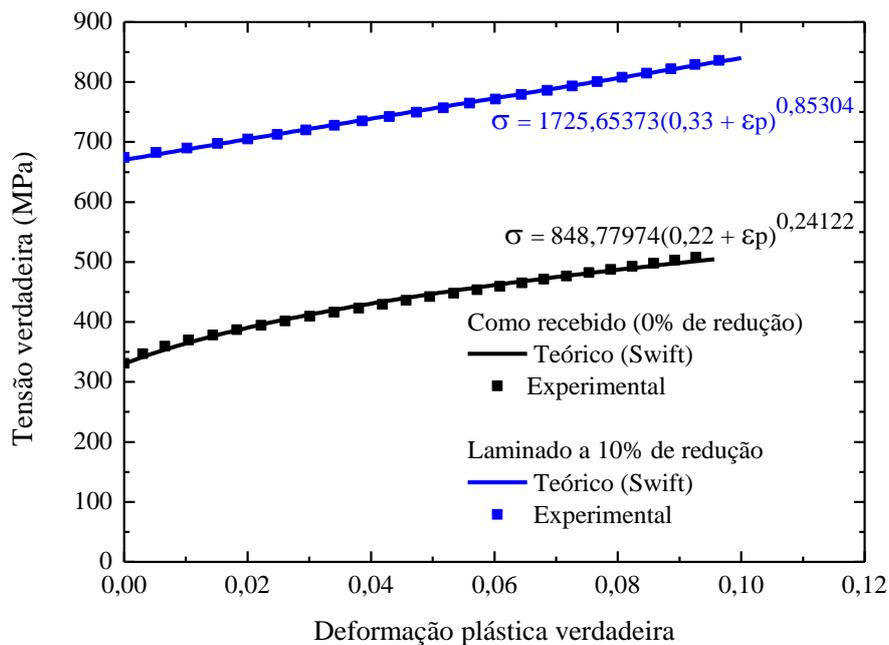


Figura 30: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift a 10% de deformação plástica na orientação 90° em relação a direção de laminação.

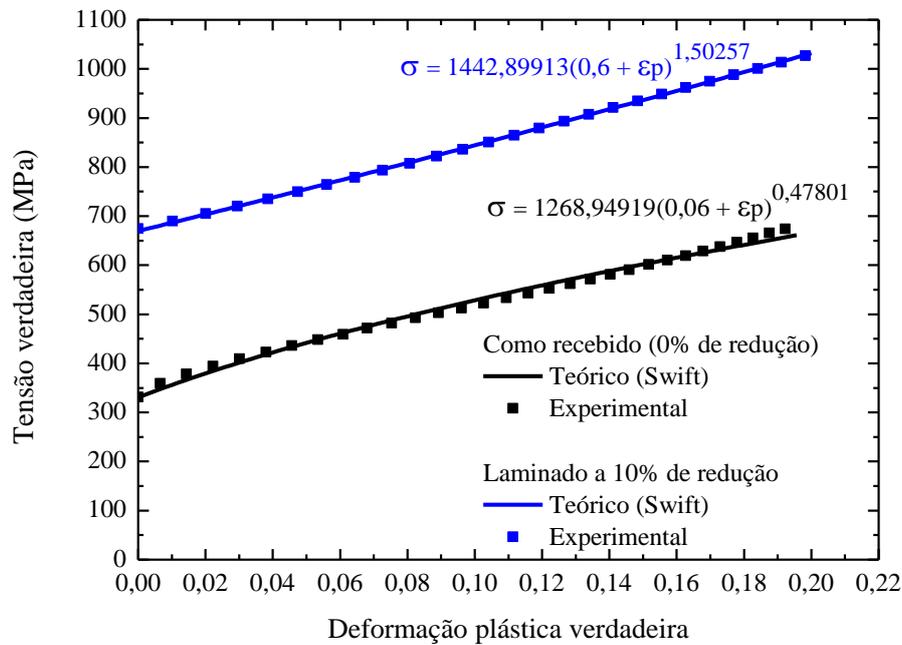


Figura 31: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift a 20% de deformação plástica na orientação 90° em relação a direção de laminação.

É possível verificar, nas Figuras 32 e 33, o comportamento plástico do aço inoxidável 304 nas orientações 45 e 90° em relação a direção de laminação, onde observa-se que a curva teórica e experimentais obtiveram a mesma tendência. Logo, é possível concluir que a equação de Swift exprime uma boa previsão do comportamento plástico desse material.

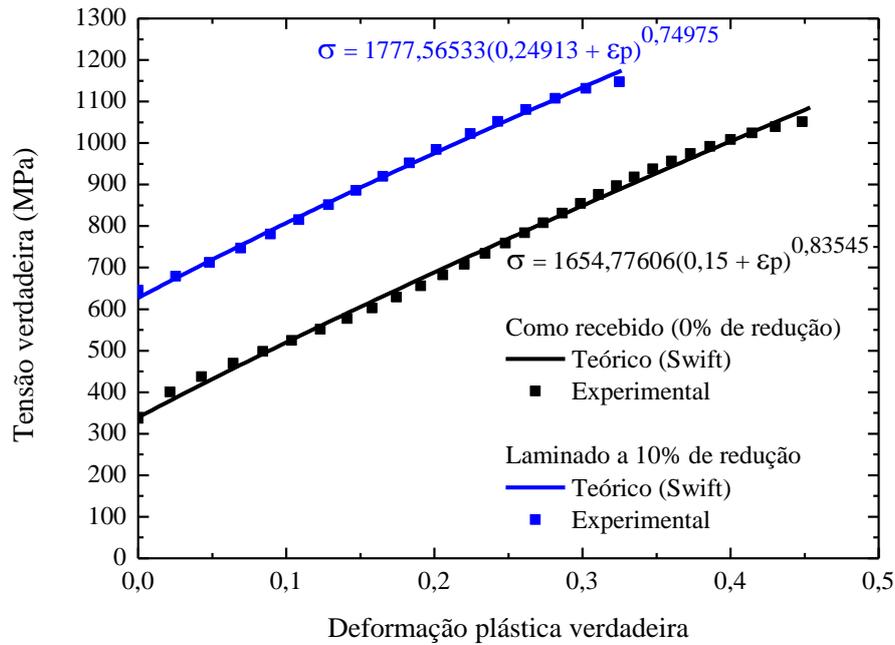


Figura 32: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift na orientação 45° em relação a direção de laminação.

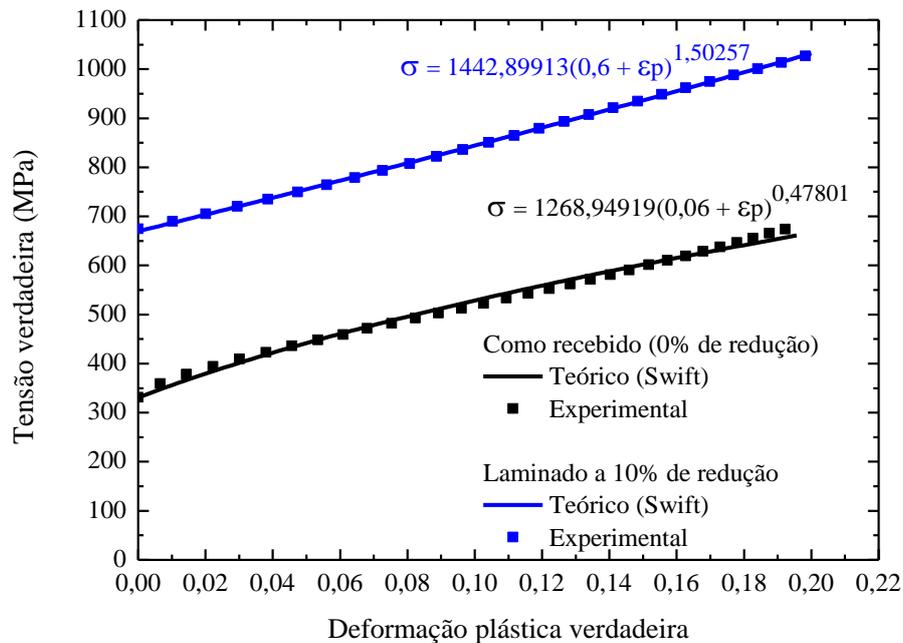


Figura 33: Comportamento tensão verdadeira x deformação plástica verdadeira em tração uniaxial e ajuste teórico por meios da equação de Swift na orientação 45° em relação a direção de laminação.