

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LUCAS FUSCALDI DE ASSIS GOMES

**ESTUDO DA RESPOSTA MECÂNICA QUANTO À MUDANÇA DA TAXA DE
DEFORMAÇÃO E MUDANÇA DE DEFORMAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI**

430

BELO HORIZONTE

2016

LUCAS FUSCALDI DE ASSIS GOMES

**ESTUDO DA RESPOSTA MECÂNICA QUANTO À MUDANÇA DA TAXA DE
DEFORMAÇÃO E MUDANÇA DE DEFORMAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI**

430

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia de Materiais no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Wellington Lopes

Coorientadora: Elaine Carballo Siqueira Corrêa

BELO HORIZONTE

2016

LUCAS FUSCALDI DE ASSIS GOMES

**ESTUDO DA RESPOSTA MECÂNICA QUANTO À MUDANÇA DA TAXA DE
DEFORMAÇÃO E MUDANÇA DE DEFORMAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI**

430

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia de Materiais no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em: 06/12/2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wellington Lopes - Orientador

Prof^ª. Dr^ª. Elaine Carballo Siqueira Corrêa – Co-orientadora

Prof. Dr. Leonardo Neves

Engenheira Joyce Christine Ribeiro

BELO HORIZONTE

2016

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por constantemente conceder várias proteções nessa minha caminhada.

A minha família pelo apoio e carinho nas horas difíceis.

Agradeço ao professor Wellington pela a orientação, apoio e por sempre se mostrar disposto a ajudar.

Agradeço aos amigos que ganhei como presente do CEFET-MG, Matheus, Everton, Etiene, Vinicius, Thales, Amanda entre tantos outros.

As pessoas que conheci no programa CsF, que marcaram a minha vida de um jeito inacreditável.

Também agradeço aos professores Aline Magalhães e Paulo Renato, pela oportunidade de estagiar no LCM, proporcionando um grande conhecimento na área de materiais, mas além disso, das orientações e momentos de descontração no laboratório.

Ao senhor Thalles, agradeço toda a amizade e paciência comigo na hora de ensinar a mexer nos equipamentos.

A uma família que descobri no último semestre aqui e que foi essencial para eu conseguir nesse final: Larissa, Pedro e Rita meus sinceros agradecimentos por todos os momentos de risadas. Amo vocês.

A todos que participaram da minha formação e que me apoiaram nesse árduo caminho.

RESUMO

Os aços inoxidáveis ferríticos possuem ótimas propriedades mecânicas, à corrosão e conformabilidade, sendo utilizados amplamente em diversos segmentos da indústria, como a de eletrodomésticos, automobilística e química. Contudo, essas propriedades dependem muito das condições de processamento aplicadas a esses aços. Considerando esse aspecto, este trabalho avaliou o efeito da taxa de deformação e da rota de processamento no comportamento mecânico do aço inoxidável ferrítico AISI 430 estabilizado com nióbio, em temperatura ambiente. Variou-se os valores de taxas de deformação nos ensaios de tração e cisalhamento monotônicos e, em outro momento, utilizou-se de uma pré deformação em tração para depois, deformar completamente por cisalhamento. Os resultados indicaram que o aço AISI 430 foi pouco sensível à mudança da taxa de deformação, acompanhado por um amaciamento seguido por endurecimento por encruamento após a combinação das rotas de carregamento compostas por tração e cisalhamento.

Palavras-chaves: Teste de cisalhamento, taxa de deformação, aço inoxidável ferrítico

ABSTRACT

Ferritic stainless steels have excellent mechanical properties, corrosion and formability, and are widely used in various segments of the industry, such as home appliances, automotive and chemical. However, these properties are highly dependent on the processing conditions applied to these steels. Considering this aspect, this work evaluated the effect of the deformation rate and the processing route on the mechanical behavior of at room temperature, varying the values of deformation rates in the tensile and shear tests. At another time, the AISI 430 ferritic stainless steel was pre-strained in a tensile test to later be completely deform by shearing. The results indicated that the AISI 430 steel was not very sensitive to the change in deformation rate, accompanied by a softening followed by hardening by work hardening after the combination of the traction and shear loading routes.

Key Words: Shear test, Deformation rates, Ferritic stainless steel

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Valores indicativos de temperatura, tempo e meios de resfriamento para o processo de recozimento de alguns aços inoxidáveis ferríticos.....	19
Tabela 2 (Adaptada) - Propriedades mecânicas do aço AISI 430 e suas variações	19
Tabela 3 - Faixas de taxas de deformações e suas aplicações	28
Tabela 4 - Técnicas de ensaio de dureza	33
Tabela 5 - Valores de LE e LRT obtidos na taxa 1 (0,0001s⁻¹)	44
Tabela 6 - Valores de LE e LRT obtidos na taxa 1 (0,005s⁻¹)	44
Tabela 7 - Valores do coeficiente de sensibilidade a deformação e tensões máximas obtidas nas rotas 1 e 2.....	48
Tabela 8 - Valores do coeficiente de sensibilidade a deformação e tensões máximas obtidas nas rotas 3 e 4.....	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Influência do cromo na resistência à corrosão numa exposição de 10 anos	14
Figura 2 - Diagrama de fases Fe-Cr.....	15
Figura 3 - Diagrama de Schaeffler.....	16
Figura 4 - Fluxograma apresentando os principais aços da série 400.....	17
Figura 5 - Esquema do fenômeno de sensitização.....	18
Figura 6 - Vista esquemática de uma interface entre duas superfícies.....	22
Figura 7 - Relação qualitativa da variação da área de cisalhamento (a) e da força de atrito (b) com a força de compressão.....	23
Figura 8 - Variação da tensão de escoamento em função da temperatura.....	25
Figura 9 - Variação do limite de escoamento de um metal com o aumento de t_h.....	26
Figura 10 - Dependência do coeficiente m com relação à temperatura para diferentes materiais.....	28
Figura 11 - Esquema do cálculo do coeficiente m com base em uma curva tensão em função da deformação.....	29
Figura 12 - Efeito da taxa de deformação na resistência a tração do cobre à várias temperaturas.....	29
Figura 13 - Curva tensão-deformação de engenharia.....	31
Figura 14 - Desenho esquemático do ensaio de cisalhamento.....	34
Figura 15 - Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento planar simples (esquerda) e aspecto de corpo de prova após o ensaio (direita).....	35
Figura 16 - Curvas tensão cisalhante e deformação cisalhante para material com e sem deformação prévia por laminação.....	36
Figura 17 - Micrografia do aço AISI 430 estabilizado com nióbio no estado como recebido. Aumento de 400x.....	42
Figura 18 - Fluxograma do procedimento experimental.....	41
Figura 19 - Máquina de ensaios universais Instron® 5582 com sistema de aquisição de dados Blue Hill 3.....	37
Figura 21 - Esquema do corpo de prova utilizado no ensaio de tração.....	38
Figura 22 - Microdurômetro Vickers Shimadzu® HMV - 2T.....	39
Figura 23 - Guilhotina Pexto modelo U-136-D.....	40
Figura 24 - Corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento.....	40
Figura 25 - Gráfico Tensão convencional x Deformação convencional para a taxa 1 (0,0001s⁻¹).....	43

Figura 26 - Gráfico Tensão convencional x Deformação convencional para a taxa 2 (0,005s⁻¹).....	43
Figura 27 - Análise dos fatores de correção para os ensaios de cisalhamento na taxa 1 (0,0001s⁻¹).....	45
Figura 28 - Análise dos fatores de correção para os ensaios de cisalhamento na taxa 2 (0,005s⁻¹).....	45
Figura 29 - Curva tensão verdadeira em função da deformação verdadeira de um ensaio de tração com mudança de taxa de deformação: da taxa 1 (0,0001s⁻¹) para a taxa 2 (0,005s⁻¹) – Rota 1.....	47
Figura 30 – Curva tensão verdadeira em função da deformação verdadeira de um ensaio de tração com mudança de taxa de deformação: da taxa 2 (0,005s⁻¹) para a taxa 1 (0,0001s⁻¹) - Rota 2.....	47
Figura 31 - Curva tensão verdadeira em função da deformação verdadeira de um ensaio de cisalhamento com mudança de taxa de deformação: da taxa 1 (0,0001s⁻¹) para a taxa 2 (0,005s⁻¹) – Rota 3.....	49
Figura 32 - Curva tensão verdadeira em função da deformação verdadeira de um ensaio de tração com mudança de taxa de deformação: da taxa 2 (0,005s⁻¹) para a taxa 1 (0,0001s⁻¹) - Rota 4.....	49
Figura 33 - Curva tensão verdadeira em função da deformação verdadeira de um ensaio de cisalhamento com uma pré deformação por tração até 9% de deformação convencional, ambos feitos na taxa 1(0,0001s⁻¹) Rota 5.....	50
Figura 34 - Curva tensão verdadeira em função da deformação verdadeira de um ensaio de cisalhamento com uma pré deformação por tração até 9% de deformação convencional, ambos feitos na taxa 2(0,005s⁻¹) Rota 6.....	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Justificativa	12
2. OBJETIVOS	13
2.1. Objetivos Gerais	13
2.2. Objetivos Específicos	13
3. REVISÃO TEÓRICA	14
3.1. Aços inoxidáveis	14
3.1.1. Aços inoxidáveis martensíticos	16
3.1.2. Aços inoxidáveis austeníticos	16
3.1.3. Aços inoxidáveis ferríticos	17
3.1.4. Aços Inoxidáveis Duplex	20
3.1.5. Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação	21
3.2. Comportamento mecânico versus variáveis do processo	21
3.2.1. Atrito	21
3.2.2. Temperatura	25
3.2.3. Taxa de deformação	27
3.3. Ensaio mecânicos	30
3.3.1. Ensaio de tração	30
3.3.2. Ensaio de Dureza	32
3.3.3. Ensaio de cisalhamento	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1. Material	37
4.2. Ensaio de tração	37
4.3. Ensaio de microdureza Vickers	38
4.4. Ensaio de cisalhamento	39
4.5. Procedimento experimental	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1. Caracterização Mecânica	42
5.1.1. Micrografia	42
5.1.2. Ensaio de tração	42
5.1.3. Ensaio de Dureza	44
5.1.4. Ensaio de Cisalhamento Planar Simples	45
5.2. Análise quanto a mudança da taxa de deformação	46

<i>5.2.1. Ensaio de tração</i>	46
<i>5.2.2. Ensaio de cisalhamento</i>	48
5.3. Análise quanto à mudança do modo de deformação	50
6. CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS	54

1. INTRODUÇÃO

As ligas ferrosas vêm sendo utilizadas pelo homem desde tempo remotos, porém um dos seus maiores entraves é a baixa resistência a corrosão (PADILHA; GUEDES, 1994). Para contornar isso, pesquisadores começaram a estudar os efeitos da adição de elementos passivadores, elementos que geram uma fina camada de óxido na superfície do material, impedindo que este sofra corrosão (CARBÓ, 2013). No início do século XX este problema começou a ser solucionado, quando começou a se adicionar grandes quantidades de cromo em aço baixa liga. Surgia assim a classe dos aços resistentes a corrosão, os aços inoxidáveis (PADILHA; GUEDES, 1994). Atualmente existe 5 grupos principais de aços inoxidáveis: Ferríticos, Austeníticos, Martensíticos, Duplex e Endurecidos por precipitação, sendo o primeiro o foco do presente trabalho.

Os aços inoxidáveis ferríticos possuem elevados teores de cromo (até 25%). Por possuir boas propriedades mecânicas, à corrosão e boa conformabilidade, os aços inoxidáveis ferríticos são utilizados amplamente pela indústria, da indústria de eletrodomésticos à automobilística e química. Por possuir elevados teores de cromo, deve-se ter o cuidado quanto ao seu processamento, já que este grupo pode sofrer uma fragilidade gerada pelos carbonetos de cromo. Assim, fica evidente a necessidade do estudo do efeito da taxa de deformação e da rota de processamento em seu comportamento mecânico, variáveis estas que podem ocorrer em diversos tipos de processo, como por exemplo laminação.

Este trabalho apresenta um resumo sobre aços inoxidáveis, dando maior ênfase aos aços inoxidáveis ferríticos, grupo no qual se enquadra o objeto de estudo: aço AISI 430 estabilizado ao nióbio. Avalia-se o efeito da taxa de deformação e da rota de processamento no comportamento mecânico do mesmo.

1.1. Justificativa

O estudo contribuirá para avaliar as condições de uso de aços inoxidáveis em processo cuja a distribuição de deformação seja complexa, como por exemplo, a estampagem. Os aços inoxidáveis ferríticos estão bem difundidos na indústria por possuírem boas propriedades mecânicas, contra a corrosão e de conformabilidade. Com este estudo, pode-se compreender um pouco mais sobre como suas propriedades mecânicas reagem com a variação da taxa de deformação e rota de processamento.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho foi investigar o efeito das mudanças das condições de processo (taxa de deformação) e da rota de processamento (quantidade e modo de deformação plástica) no comportamento mecânico do aço AISI 430 estabilizado ao nióbio, afim de verificar a possibilidade de substituição dos aços austenítico, que são mais caros.

2.2. Objetivos Específicos

- a) investigar o comportamento mecânico ao se deformar monotonicamente em tração e em cisalhamento o aço AISI 430 sob duas taxas de deformação: $0,0001 \text{ s}^{-1}$ (taxa 1) e $0,005 \text{ s}^{-1}$ (taxa 2);
- b) avaliar a sensibilidade da tensão à mudança da taxa de deformação adotando-se mudanças dos valores da taxa de deformação de acordo com a sequência pré-deformação/taxa 1/taxa 2 e pré-deformação taxa 2/taxa 1;
- c) analisar o efeito da pré-deformação (em tração e em cisalhamento) de 50% do valor do alongamento uniforme (9% do alongamento total) no comportamento mecânico do aço AISI 430 na subsequente mudança da taxa de deformação;
- d) executar a rota pré-deformação de 50% do valor do alongamento uniforme (9% do alongamento total) em tração acompanhada por cisalhamento para investigar a influência dessa combinação de esforços mecânicos na resposta apresentada pelo aço AISI 430.

3. REVISÃO TEÓRICA

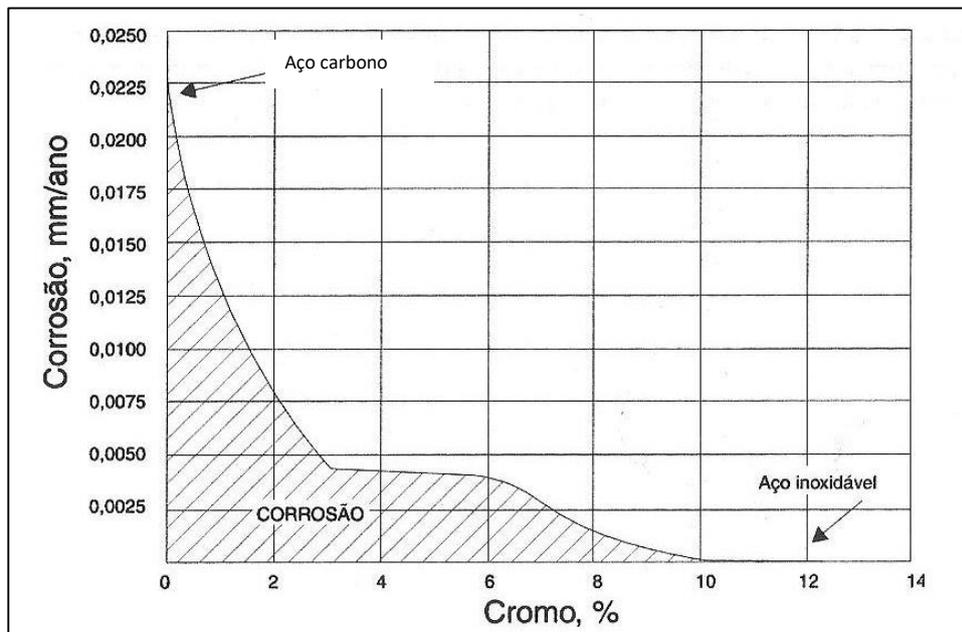
3.1. Aços inoxidáveis

Desde que se começou a extrair e transformar o ferro em aço, um dos grandes problemas enfrentados pelos metalurgistas é dar resistência à corrosão em objetos de ferro e aço. Tal questão começou a ser solucionado no início do século XX, quando se começou a adicionar grandes quantidades de cromo em ligas baixo carbono e, assim, surgia uma nova classe de aços: os aços resistentes a corrosão, conhecidos hoje como aços inoxidáveis (PADILHA; GUEDES, 1994).

Não existe um material totalmente inoxidável, tudo irá depender do meio onde o material será aplicado, tornando assim o processo de seleção de materiais muito importante para o projeto (SILVA; MEI, 2010).

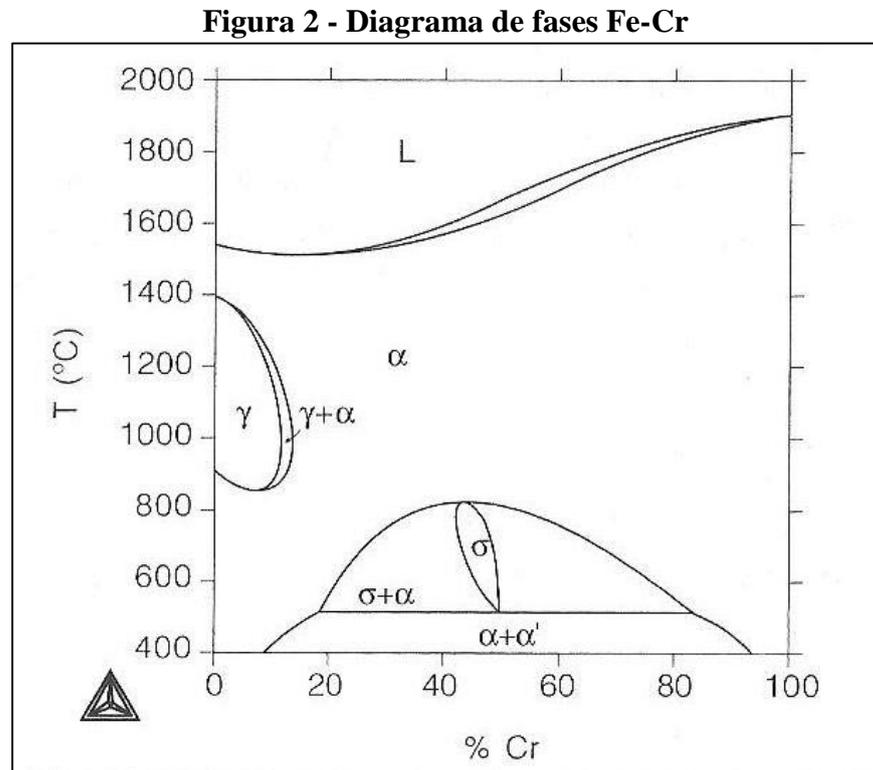
A resistência a corrosão dos aços inoxidáveis vem da presença do elemento cromo em altos teores na liga de ferro-carbono, acima de 12% (CHIAVERINI, 2012). A figura 1 apresenta a influência da quantidade de cromo na resistência à corrosão.

Figura 1 - Influência do cromo na resistência à corrosão numa exposição de 10 anos



Fonte: CHIAVERINI, 2012

Devido ao alto teor de cromo, há a formação de uma nova fase no diagrama Fe-Cr, a fase sigma (σ). Esta fase ocorre com aproximadamente 50% de cromo, à temperaturas entre aproximadamente 475°C e 800°C. A figura 2 apresenta o diagrama de fases Fe-Cr.

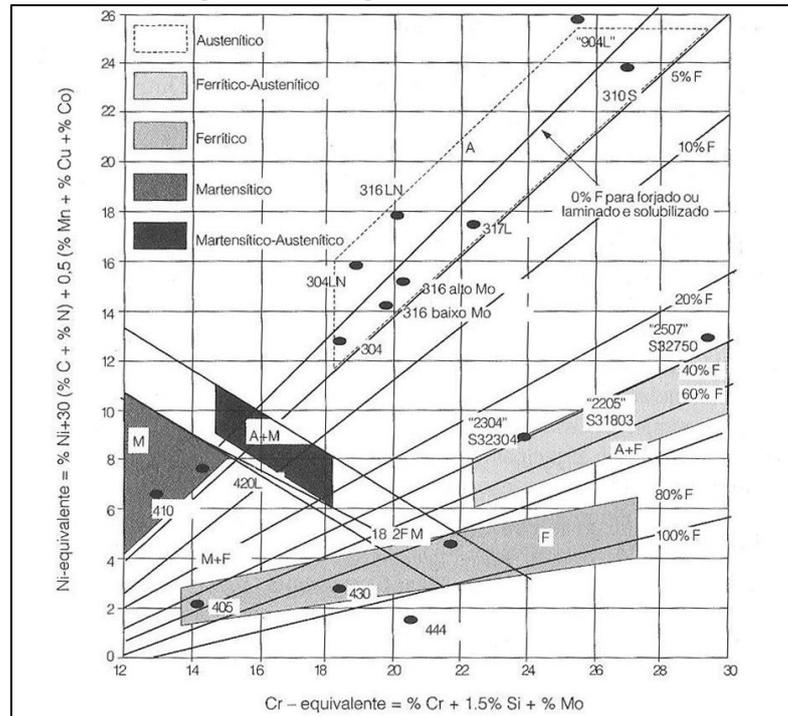


Fonte: SILVA & MEI, 2010

A formação da fase σ traz mudanças significativas nas propriedades do material. Ela é uma fase dura e quebradiça, assim comprometendo a tenacidade e ductilidade. Além disso, por conter 50% de Cr, as regiões adjacentes podem ficar com baixos teores deste elemento, reduzindo a resistência à corrosão. A formação da fase σ é considerada uma das responsáveis pelo fenômeno de sensitização ou “fragilidade a 475°C” que os aços inoxidáveis sofrem (CHIAVERINI, 2012; COLPAERT, 2008).

Há três grupos principais de aços inoxidáveis: martensíticos, ferríticos e austeníticos. Além destes, há mais dois tipos que são empregados em condições especiais, são eles: os duplex e endurecíveis por precipitação (CARBÓ, 2013). A obtenção de cada um destes tipos relaciona-se diretamente com a composição química. A figura 3 apresenta o Diagrama de Schaeffler, que informa as faixas de composição aproximada de cada tipo de aço inoxidável.

Figura 3 - Diagrama de Schaeffler



Fonte: SILVA & MEI, 2010

3.1.1. Aços inoxidáveis martensíticos

Possuem teores de cromo entre 11% e 18%, com teores de carbono acima de 0,1%. Com essa combinação, os aços desse grupo são endurecíveis por tratamento térmico de têmpera, por isso o nome. O aço mais comum desse grupo é o AISI 410 (SILVA; MEI, 2010).

Além dos aços inoxidáveis martensíticos, neste grupo há também o dos supermartensíticos, com teores de carbono abaixo de 0,1%, e dos martensíticos-austeníticos (ou martensíticos-ferríticos), que são aços que possuem composições mais ricas em níquel do que o primeiro (SILVA; MEI, 2010).

São utilizados para aplicações a alta temperatura, devido a elevada resistência ao amolecimento no revenimento e boa resistência a corrosão. Também são aplicados em tubulações de petróleo, onde se exige elevadas resistências mecânica e à corrosão, além de boa soldabilidade, características deste grupo (COLPAERT, 2008).

3.1.2. Aços inoxidáveis austeníticos

São os aços mais comuns entre os aços inoxidáveis. Para a estrutura austenítica ficar estável na temperatura ambiente adiciona-se níquel ou manganês (SILVA; MEI, 2010). Devido

a estes elementos que se diz que esse grupo é dividido em dois subgrupos: aços ao cromo-níquel e aços ao cromo-níquel-manganês (CHIAVERINI, 2012). O aço mais comum deste grupo é o AISI 304 (18% de cromo e 8% de níquel).

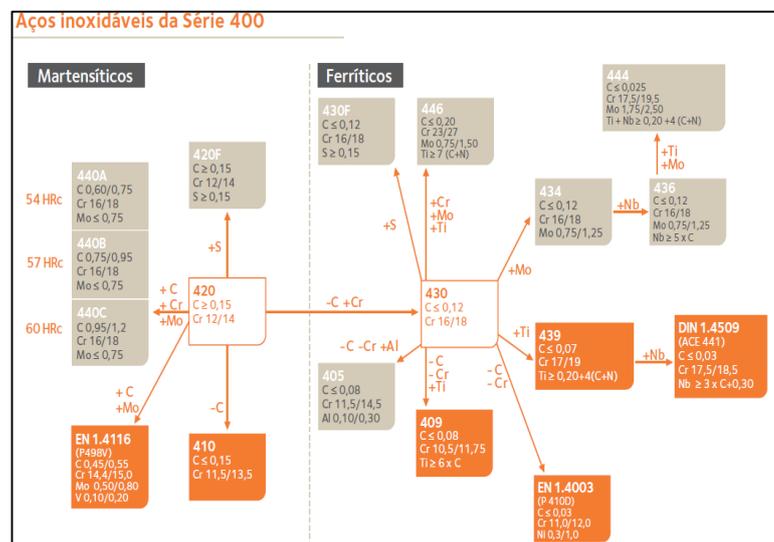
As principais características desse grupo são: boa resistência a corrosão, elevada soldabilidade, elevada tenacidade, não serem magnéticos, não serem endurecíveis por têmpera e apresentarem o fenômeno de endurecimento bem superior ao que seria normalmente quando deformado. Esse fenômeno acontece devido a transformação da austenita em ferrita, que por estar supersaturada de carbono, se comporta como a martensita (CHIAVERINI, 2012; COLPAERT, 2008).

Por não sofrer transição dúctil-frágil e possuírem resistência ao amolecimento e resistência à deformação a quente, os aços desse grupo são utilizados em aplicações tanto a elevadas temperatura como para aplicações criogênicas (COLPAERT, 2008).

3.1.3. Aços inoxidáveis ferríticos

Neste grupo o cromo é o principal elemento de liga, chegando até teores de 25%. Além disso, possui baixos teores de carbono (máximo de 0,2%), fazendo que o campo austenítico desapareça, não possibilitando que seja endurecível por têmpera (CHIAVERINI, 2012). A figura 4 apresenta um fluxograma apresentando os principais aços da série 400, que engloba os aços martensíticos e ferríticos.

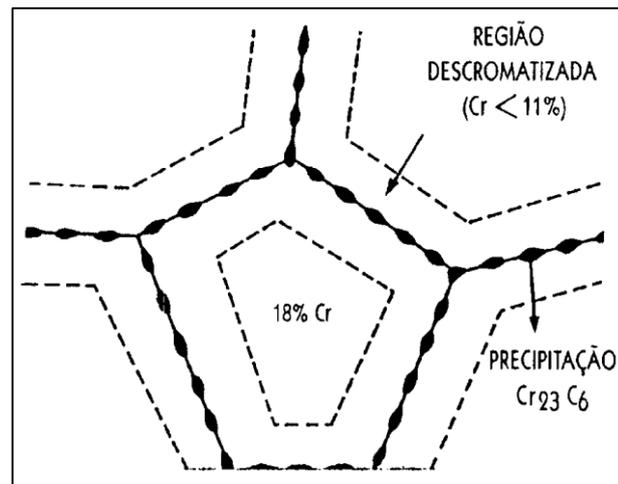
Figura 4 - Fluxograma apresentando os principais aços da série 400



Fonte: CARBÓ, 2013

O fenômeno de sensitização é um dos fatores que tornam a soldagem do AISI 430 problemática. Ao passar pelo processo de soldagem, há um crescimento de grão na zona termicamente afetada (ZTA) e precipitação de carbonetos nos contornos de grão, que comprometem a tenacidade e resistência a corrosão do material, como indicado na figura 5 (SILVA; MEI, 2010).

Figura 5 - Esquema do fenômeno de sensitização



Fonte: D'Oliveira (2016)

Para evitar a formação da fase σ , utiliza-se elementos de liga que formam carbonetos mais estáveis, como o nióbio e o titânio (SILVA; MEI, 2010). No caso deste trabalho, será utilizado o aço AISI 430, estabilizado com nióbio. Ao se adicionar nióbio, os carbonetos e nitretos de cromo são substituídos por de nióbio, que são mais estáveis e menos solúveis na matriz ferrítica que os de cromo. Com isso, limita-se a dissolução de carbono e nitrogênio na ferrita, elementos estes que são gamagênicos. Dessa forma, impede-se a formação de austenita a temperaturas elevadas, garantindo uma estrutura ferrítica a qualquer temperatura (FERREIRA, 2005).

O tratamento térmico mais comum utilizado é o de solubilização ou recozimento, que consiste em aquecer o material até uma temperatura na qual uma eventual martensita presente se decompõe em ferrita e em carbonetos, tornando a microestrutura basicamente ferrítica e resfria-lo em uma determinada condição de resfriamento (SILVA; MEI, 2010; CHIAVERINI, 2012). Deve-se, entretanto, ter um cuidado ao ser realizar tratamentos térmicos no AISI 430, pois quando aquecido a uma temperatura superior a 800°C podem formar austenita e se o resfriamento for brusco, esta austenita pode se transformar em martensita (COLPAERT, 2008; CHIAVERINI, 2012). A tabela 1 apresenta valores de temperatura e condição de resfriamento para alguns tipos de aços ferríticos.

Tabela 1 - Valores indicativos de temperatura, tempo e meios de resfriamento para o processo de recozimento de alguns aços inoxidáveis ferríticos

Tipo AISI	Tempo* horas	Temperatura °C	Resfriamento
405	1 a 2	650 / 820	ar ou água
430	1 a 2	710 / 790	ar ou água
ou	1 a 2	820 / 900	no forno** até 590°C depois no ar
430 F	1 a 2	710 / 790	ar ou água
442	1 a 2	760 / 830	ar ou água
446	1 a 2	760 / 830	ar ou água

* É função da espessura e da forma das secções; para chapas aconselha-se 3 a 5 minutos para cada 2,5 milímetro de espessura

** Velocidade de resfriamento de 15 a 25°C/h

Fonte: CHIAVERINI, 2012

Por ser facilmente conformado a frio apresentando um encruamento inferior ao dos austeníticos, o aço AISI 430 é amplamente utilizado. Ele também possui boas propriedades de resistência à corrosão em temperatura ambiente como em elevadas temperaturas (CHIAVERINI, 2012). Apesar de possuir uma boa estampabilidade, não se consegue estampagens muito profundas com este material, pois ocorre o fenômeno de ridging, que é o aparecimento de estrias na superfície das chapas deformadas (FERREIRA, 2005). A tabela 2 apresenta algumas propriedades mecânicas do aço AISI 430 e suas variações.

Tabela 2 (Adaptada) - Propriedades mecânicas do aço AISI 430 e suas variações

Tipo AISI	Forma do produto	Condição	Limite resistência a tração MPa	Limite de escoamento MPa	Alongamento %	Estricção %	Dureza HB
430	Barra	Recozida acabada a quente	480	275	20	45	-
430	Barra	Recozida acabada a frio	480	275	16	45	-
430	Fio	Recozida	480	275	20	45	-
430	Fio	Recozida estira a frio	480	275	16	45	-
430	Chapa, folha	Recozida	450	205	22	-	88 max.
430 F	Fio	Recozida	585	-	-	-	-
430 Ti	Barra	Recozida	515	310	30	65	-

Fonte: CHIAVERINI, 2012

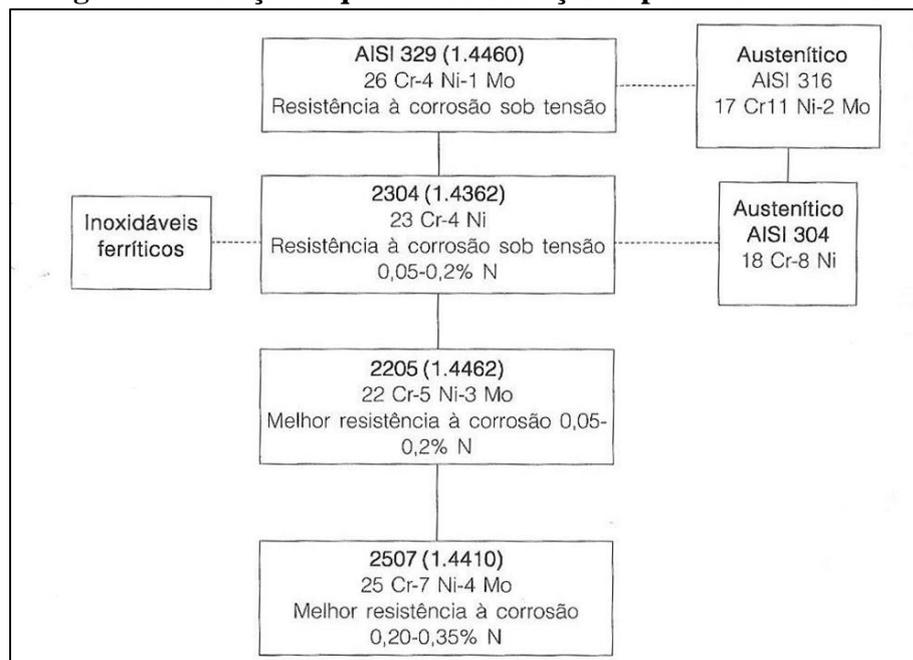
3.1.4. Aços Inoxidáveis Duplex

Os aços deste grupo apresentam microestrutura com frações aproximadamente iguais das fases ferrita e austenita, determinada principalmente pelos teores de ferro, cromo (22% a 28%) e níquel (2% a 8%), devido a isso eles são conhecidos ferríticos-austeníticos. Há também adição de outros elementos de liga como molibdênio (0,2% a 5,0%), nitrogênio (0,1% a 0,35%), cobre (até 4%), silício (0,5% a 5,0%), manganês (0,5% a 5,0%), entre outros com o objetivo de aumentar a resistência a corrosão e a resistência mecânica do material (SILVA; MEI, 2010; CHIAVERINI, 2012).

Nesse grupo, além de se preocupar com a precipitação de carbonetos, deve-se se ater a formação das fases intermetálicas σ e χ (χ , $\text{Fe}_{30}\text{Cr}_{18}\text{Mo}_4$) que fragilizam o material e comprometem a resistência à corrosão. Devido a isso, os procedimentos de solda desse material devem ter uma atenção especial.

Por ter elevadas resistência mecânica e à corrosão, além de boa tenacidade, o uso de aço duplex vem crescendo principalmente nas indústrias de processamento químico, extração de petróleo, de geração de energia, entre outras (CHIAVERINI, 2012). A figura 5 apresenta a relação esquemática dos aços duplex mais comuns.

Figura 5 - Relação esquemática dos aços duplex mais comuns



Fonte: SILVA; MEI, 2010

3.1.5. Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação

Segundo Chiaverini (2012), esse grupo passou a ser desenvolvido a partir da Segunda Guerra Mundial e sua principal diferença para os demais grupos é que este sofre alterações nas suas propriedades mecânicas através de tratamento de envelhecimento. Eles são indicados pelas letras PH (Precipitation Hardening) (CHIAVERINI, 2012).

Os responsáveis pelo endurecimento são os precipitados formados durante o envelhecimento. Por serem muito finos não se utiliza a micrografia para a avaliação da eficiência do tratamento (SILVA; MEI, 2010).

Apesar ter um custo mais elevado do que os outros grupos de aço inoxidável, este estão começando a se difundir em outras áreas além do campo militar e aeroespacial, começando a ser utilizado na indústria de extração de petróleo, petroquímica, química, entre outras (SILVA; MEI, 2010).

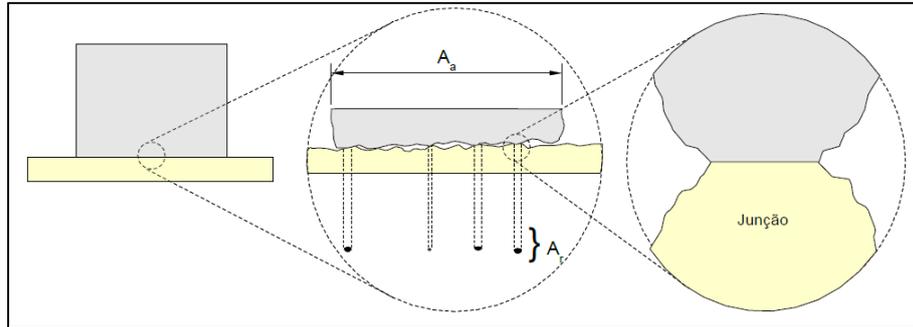
3.2. Comportamento mecânico versus variáveis do processo

3.2.1. Atrito

O atrito pode ser definido como uma resistência ao deslizamento de um corpo sobre o outro, devido ao desenvolvimento de forças na superfície de dois corpos em contato. O atrito é uma das forças da natureza menos compreendidas, mesmo sendo uma das forças mais deparadas por engenheiros em projetos mecânicos (LEAL; STOETERAU, 2002; CETLIN; HELMAN, 2010).

Segundo Cetlin e Helman (2010) a força de atrito é causada fundamentalmente pelas forças de adesão entre as pequenas regiões que estão realmente em contato, uma vez que as superfícies apresentam micro irregularidade. Algumas vezes essas regiões em contato constituem uma solda a frio devido a deformação plástica localizada (figura 6). Assim, as forças de atrito parecem ter origem na resistência ao cisalhamento destas uniões. Além dessas desse processo, as forças de cisalhamento surgem do processo de “riscamento” da superfície do metal mais macio pela superfície do metal mais duro (CETLIN; HELMAN, 2010).

Figura 6 - Vista esquemática de uma interface entre duas superfícies



Fonte: LEAL; STOETERAU, 2002

Normalmente, o atrito é considerado nocivo aos processos de conformação mecânica, podendo causar alterações dos estados de tensão, aumento de consumo de energia necessária para deformação, influência na qualidade superficial, aumento da temperatura, podendo chegar ao ponto de prejudicar algumas propriedades mecânicas, entre outras. Porém, o atrito também pode ser considerado importante, como no caso da laminação, que graças ao atrito, que acontece a mordida e arrastamento do material através dos cilindros de laminação (CETLIN; HELMAN, 2010).

O atrito coulombiano pode ser dividido em atrito estático e atrito cinético. O atrito estático é a força na qual mantem o objeto imóvel ao se aplicar uma força até um certo valor. Esse atrito é definido pode ser expresso numa relação entre uma força (F) e a força normal ao plano de contato (N). A equação 1 apresenta essa relação.

$$\mu_e = \frac{F}{N} \quad (1)$$

μ_e é denominado de coeficiente de atrito estático (CETLIN; HELMAN, 2010)

O atrito cinético é a força que resiste ao movimento do objeto e possui uma relação parecida com a do atrito estático, que é apresentada na equação 2.

$$\mu_c = \frac{F_c}{N} \quad (2)$$

Ressaltando que a força necessária para manter o objeto em movimento retilíneo uniforme é menor do que a força necessária para colocar o objeto em movimento ($F > F_c$). A baixas velocidades, o μ_c é considerado independente da velocidade, porém em altas velocidades, nota-se uma diminuição no μ_c (CETLIN; HELMAN, 2010).

O atrito coulombiano é o mais utilizado nos cálculos dos processos de conformação mecânica devido a sua simplicidade. Porém, em estudos mais recentes, levaram a uma interpretação elastoplástica do atrito. Nessa interpretação considera-se a micro irregularidade das superfícies e a formação de soldas microscópicas (figura 6). Para a formação desses picos, a aplicação de uma pequena força já é suficiente. Assim a força de atrito será da resistência ao cisalhamento destas uniões. (LEAL; STOETERAU, 2002; CETLIN; HELMAN, 2010).

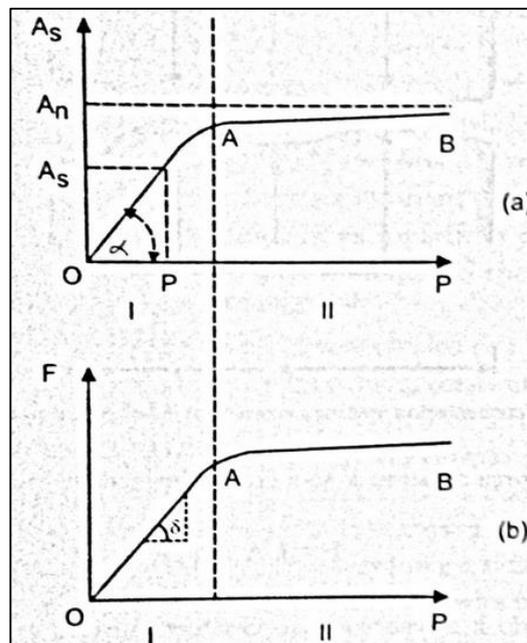
Através dessa teoria a força de atrito F é representada pela equação 3.

$$F = k A_s \quad (3)$$

sendo A_s a área de cisalhamento e k a resistência ao cisalhamento das superfícies unidas.

Com o aumento da força de compressão, a área real de contato assim como a de cisalhamento também cresce, tendendo a área nominal. A figura 7 representa o comportamento citado qualitativamente (CETLIN; HELMAN, 2010).

Figura 7 - Relação qualitativa da variação da área de cisalhamento (a) e da força de atrito (b) com a força de compressão



Fonte: CETLIN; HELMAN, 2010

Na região I na figura 7 (a), mostra que o aumento de A_s (área de cisalhamento) é proporcional ao aumento da força de compressão (P), porém a partir do ponto A essa

proporcionalidade desaparece por causa do encruamento do material. Também a partir do ponto A, a área de cisalhamento tende à área nominal (CETLIN; HELMAN, 2010).

Na figura 7 (b) representa como a força de atrito se comporta em função da força P. Na zona I, ela segue de forma similar à área de cisalhamento e a partir do ponto A, pode-se dizer que a força de atrito se torna independente da força P.

A equação que expressa a região I da figura 7 (a) é dada pela equação 4.

$$A_s = P * \tan \alpha \quad (4)$$

Substituindo a equação 4 na equação 3 tem-se:

$$F = k * P * \tan \alpha$$

È possível admitir que $k * \tan \alpha = \mu$, ou seja, é uma constante, assim pode-se simplificar para:

$$F = P * \mu \quad (5)$$

que é a mesma expressão apresentada nas equações 1 e 2, dependendo da situação. Ao se dividir a equação 5 pela área nominal, obtém-se a equação 6.

$$\tau = \mu * p \quad (6)$$

Nesta equação, p é a pressão aplicada, e que constitui a lei de Amontons.

Para descrever a curva na região II da figura 7 (b), onde a partir do ponto A há uma mudança da inclinação da curva, demonstrando uma diminuição no coeficiente de atrito, alguns autores propuseram uma função do tipo $\mu=C/p$ para demonstrar esta reação na zona II, zona esta onde os processamentos mecânicos são realizados. Neste caso, C depende da situação existente (CETLIN; HELMAN, 2010).

Normalmente as superfícies dos metais não se encontram totalmente limpas, podendo conter vários tipos de impurezas, como óxidos, graxas, etc. Assim a força de resistência de cisalhamento gerados por essas superfícies será menor do que a esperada em uma superfície totalmente limpa, designada por k. Assim a tensão de atrito pode ser expressa pela equação 7 (CETLIN; HELMAN, 2010).

$$\tau = \mu * k \quad (7)$$

sendo $0 < \mu < 1$

Tanto a equação 6 como a equação 7, podem descrever a tensão de atrito para uma dada situação, podendo assim, serem igualadas. Como o valor máximo de $\mu = 1$ e o valor mínimo de força para acontecer a deformação do material é o valor de tensão limite de escoamento (LE). Com estes dados pode-se calcular o coeficiente de atrito máximo apresentado na equação 8 (CETLIN; HELMAN, 2010).

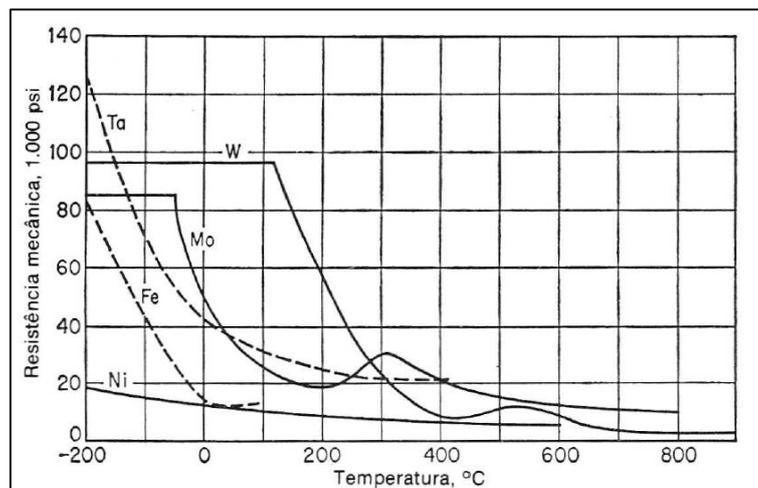
$$\mu_{m\acute{a}x} = \frac{k}{LE} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\sim 0,577) \quad (8)$$

A equação 8 segue o critério de von Mises.

3.2.2. Temperatura

Em geral, com o aumento da temperatura, há uma diminuição da resistência mecânica simultaneamente com um aumento na ductilidade. A figura 8 mostra a variação da tensão de escoamento com o aumento da temperatura em alguns metais cúbicos de corpo centrado (CCC) e para o níquel, que é um metal com estrutura cúbica de face centrada (CFC) (DIETER, 1989).

Figura 8 - Variação da tensão de escoamento em função da temperatura



Fonte: DIETER, 1989

Pela análise do gráfico percebe-se que os materiais CCC possuem a resistência mecânica mais dependente da temperatura do que os metais CFC.

Segundo Dieter (1989), com o aumento da temperatura, o expoente de encruamento dos metais CFC aumenta, dessa forma, achatando a curva tensão-deformação e LRT passa a ser mais dependente da temperatura do que LE (DIETER, 1989).

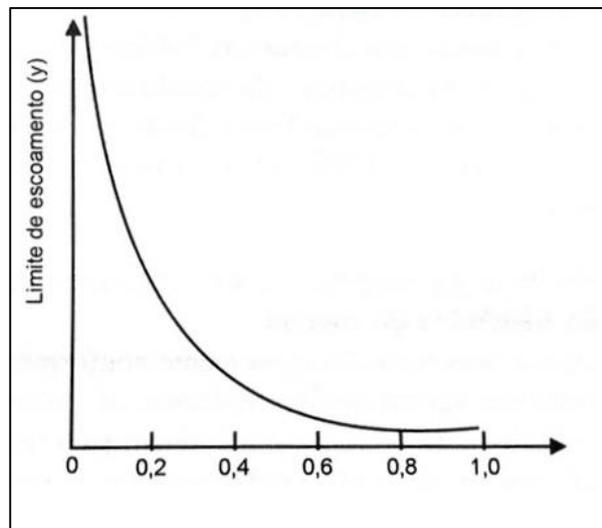
Para a conformação de peças metálicas pode-se utilizar temperaturas variadas, variando da temperatura ambiente até próximas ao ponto de fusão do material. Como a temperatura varia para cada material, determina-se a temperatura de processo em relação a temperatura de fusão, ambas em grau Kelvin (K), essa relação é chamada de temperatura homóloga (equação 9) (CETLIN; HELMAN, 2010; DIETER, 1989).

$$T_h = \frac{T}{T_F} \quad (9)$$

em que T é a temperatura da peça (K), T_F é a temperatura de fusão do metal (K) e T_h é a temperatura homóloga.

Com o aumento de T_h , a resistência mecânica dos metais normalmente cai (figura 9). Pode-se dizer então que a potência necessária para realizar um processo de conformação cai à medida que T_h aumenta. Porém, com esse aumento de T_h também haverá um aumento nas taxas de oxidação do metal ao ar (CETLIN; HELMAN, 2010).

Figura 9 - Variação do limite de escoamento de um metal com o aumento de t_h



Fonte: CETLIN; HELMAN, 2010

3.2.3. Taxa de deformação

Ao se deformar um metal, a maior parte da energia cedida se transforma em calor. Com o aumento da taxa de deformação, menor será a dissipação do calor, pois uma mesma deformação será realizada em um tempo menor. Com isso, a temperatura do metal irá aumentar. A taxa de deformação influencia sobre a tensão que será necessária para deformar o material. Essa tensão pode ser expressa pela equação 10 (CETLIN; HELMAN, 2010; DIETER, 1989).

$$LE = C * \dot{\epsilon}^m \quad (10)$$

onde LE é o limite de escoamento, C é o limite de escoamento de referência (quando a taxa de deformação é igual a $1s^{-1}$), $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação e m é o como coeficiente de sensibilidade da tensão de escoamento (MARCONDES, 2016).

Nessa equação, considera-se a temperatura e deformação constantes, enquanto $\dot{\epsilon}$ é definida pela equação 11 e m é definido pela equação 12, em que ϵ é a deformação e t o tempo.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (11)$$

$$m = \left(\frac{\partial \log \sigma}{\partial \log \dot{\epsilon}} \right) \quad (12)$$

O coeficiente m apresenta o quão sensível é a tensão de escoamento às variações de $\dot{\epsilon}$. Segundo Garcia, Spim e Santos (2012), para $m=1$, a tensão será proporcional à taxa de deformação, dessa forma o material terá um comportamento parecido com o de um fluido newtoniano, cuja viscosidade, ou atrito interno, é constante para diferentes taxas de cisalhamento e não variam com o tempo, como por exemplo o comportamento de um vidro superaquecido. Os valores típicos para o coeficiente m em metais fica em torno de -0,05 até 0,05, para conformações a frio (MARCONDES, 2016).

A tabela 3 mostra algumas faixas de taxas de deformação e as suas aplicações (CETLIN; HELMAN, 2010; DIETER, 1989).

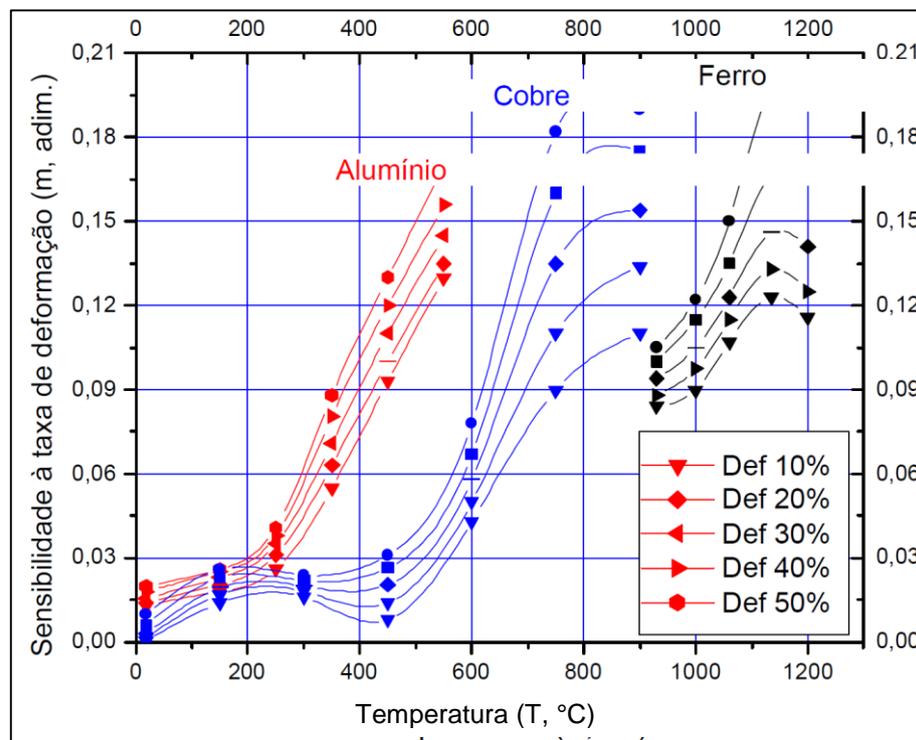
Tabela 3 - Faixas de taxas de deformações e suas aplicações

Intervalo das taxas de deformação	Condições ou tipo de teste
10^{-8} a 10^{-5} s^{-1}	Testes de fluência com carga ou tensão constantes
10^{-5} a 10^{-1} s^{-1}	Testes de tração estática com máquinas hidráulicas ou de transmissão mecânica
10^{-1} a 10^2 s^{-1}	Testes dinâmicos de tração ou compressão
10^2 a 10^4 s^{-1}	Testes de alta velocidade usando barras de impacto (devem-se considerar efeitos de propagação de ondas)
10^4 a 10^8 s^{-1}	Hipervelocidade de impacto usando canhões de gás ou projéteis explosivos (propagação de ondas de choque)

Fonte: DIETER, 1989

O coeficiente m pode apresentar uma dependência à temperatura, como indica a figura 10 (MORAIS, 2016).

Figura 10 - Dependência do coeficiente m com relação à temperatura para diferentes materiais

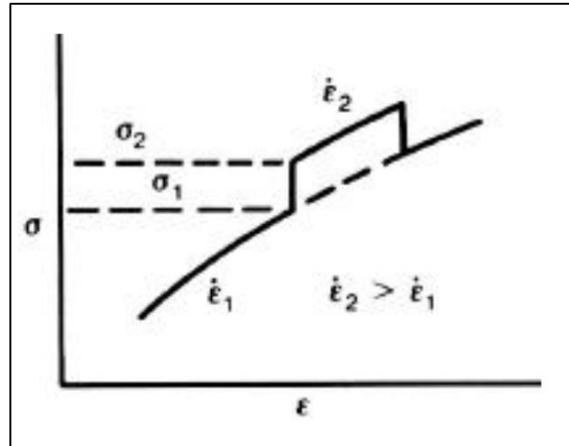


Fonte: MORAIS 2016

Por conta dessa dependência da temperatura, para se calcular o coeficiente deve-se realizar os ensaios na mesma temperatura.

Existem várias maneiras de se calcular o coeficiente m através de ensaios mecânicos (HEDWORTH; STOWELL, 1971). Um dos métodos mais utilizados é o método apresentado na figura 11.

Figura 11 - Esquema do cálculo do coeficiente m com base em uma curva tensão em função da deformação

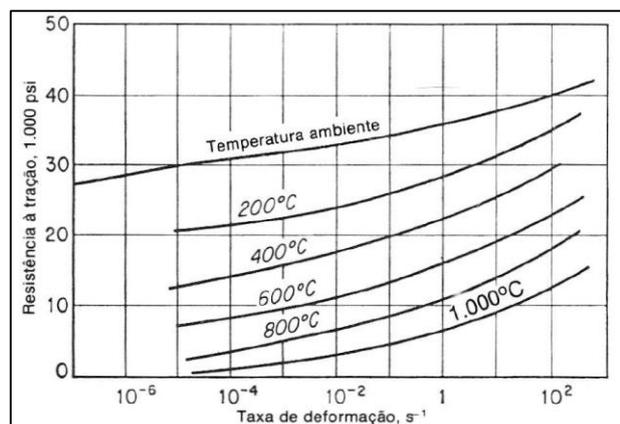


Fonte: MORAIS, 2016

Para se calcular o coeficiente m , utiliza-se o maior valor de tensão obtido com a taxa de deformação 1, antes de ocorrer a mudança de taxa, e o primeiro valor de tensão, após esta estabilizar, na taxa 2.

Como se pode perceber pela equação 10, com o aumento da taxa de deformação, maior será a resistência mecânica. Além da dependência da taxa de deformação, há uma grande dependência com a temperatura, igual o coeficiente m . A figura 12 apresenta a variação da resistência a tração em relação a taxa de deformação e temperatura.

Figura 12 - Efeito da taxa de deformação na resistência a tração do cobre à várias temperaturas



Fonte: DIETER, 1989

Vale ressaltar que, com o aumento na taxa de deformação haverá um aumento na temperatura T_h , uma vez que com o aumento da taxa de deformação, o processo ocorrerá em um tempo menor, necessitando que o material esteja em uma temperatura mais elevada, já que os mecanismos de amaciamento do material são termicamente ativados (CETLIN; HELMAN, 2010; DIETER, 1989).

3.3. Ensaios mecânicos

De acordo com Silva & Mei (2010) para se medir as propriedades mecânicas de um material deve se ater aos seguintes fatores:

- a) Orientação em relação à direção de maior trabalho – Materiais que sofreram qualquer tipo de conformação são anisotrópicos, dessa forma suas propriedades mecânicas variam de acordo com a orientação do corpo de prova.
- b) Distância de superfícies livres – Por possuir uma microestrutura sensível à velocidade de resfriamento, a maioria dos aços tratados termicamente apresentarão propriedades diferentes em pontos mais próximos à superfície, que resfriarão mais rapidamente, em relação ao centro da peça.
- c) Posição em relação ao lingote ou ao produto de lingotamento contínuo – No lingotamento convencional há uma macrossegregação ao longo com comprimento, tornando o material não homogêneo, dessa forma tornando as propriedades também não homogêneas. Assim, deve-se eliminar a porção do material onde houve maior segregação. No caso do lingotamento contínuo, acontece uma segregação ao longo da espessura, também variando as propriedades do produto (SILVA; MEI, 2010).

Ensaios mecânicos são ensaios destrutivos e para se ter uma validade dos seu resultados, eles devem ser realizados de acordo com normas que são estabelecidas por sociedades profissionais, como por exemplo a ASTM (sigla para *American Society for Testing and Materials* – Sociedade Americana para Ensaios e Materiais) (SILVA; MEI, 2010; CALISTER JUNIOR, 2008).

3.3.1. Ensaio de tração

O ensaio de tração é muito utilizado para obter informações básicas sobre a resistência de um material. Neste ensaio um corpo de prova padronizado sofre um esforço trativo uniaxial crescente até a ruptura (SILVA; MEI, 2010; DIETER, 1981).

Por convenção, a resposta deste teste é dada por uma curva de tensão-deformação de engenharia. A tensão de engenharia ou convencional (σ_e) é dada pela carga em qualquer momento do ensaio (F) dividida pela área inicial do corpo de prova (A_0), como mostra a equação 13 (DIETER, 1981).

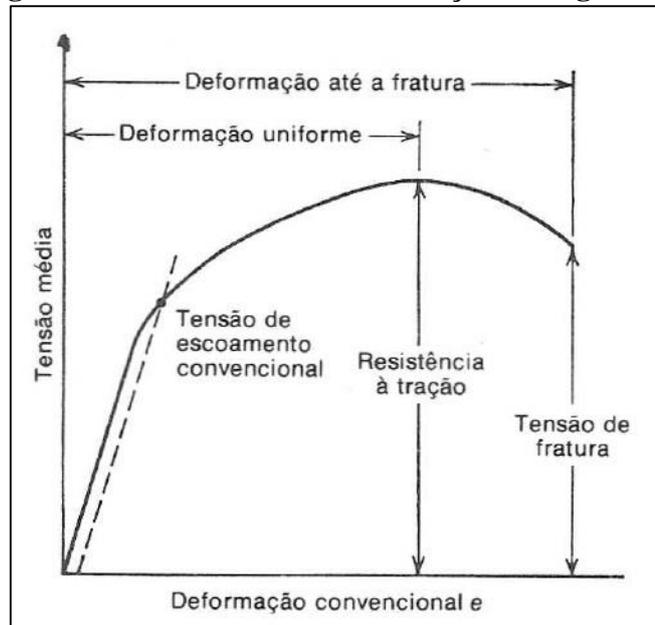
$$\sigma_e = \frac{F}{A_0} \quad (13)$$

Da mesma forma, a deformação de engenharia ou convencional (ε_e) é dada pelo comprimento útil do corpo de prova em qualquer ponto do ensaio (Δl) dividido pelo comprimento inicial do mesmo (l_0), como mostra a equação 14 (DIETER, 1981).

$$\varepsilon_e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (14)$$

A figura 13 apresenta uma curva tensão-deformação convencional.

Figura 13 - Curva tensão-deformação de engenharia



Fonte: DIETER, 1981

Segundo Dieter (1981), “A forma e a magnitude de uma curva tensão-deformação de um metal dependerá de sua composição, tratamento térmico, história anterior da deformação plástica e da taxa de deformação, temperatura e estado de tensões impostas durante o teste.”

Esse teste é normalizado pela norma ASTM E 8 e E 8M (*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*) no caso de materiais metálicos (DIETER, 1981; CALLISTER JUNIOR, 2008).

Através do teste de tração pode-se obter parâmetros de resistência, como tensão limite de escoamento e tensão limite de resistência à tração, e parâmetro de ductilidade, como módulo de elasticidade, tenacidade, resiliência.

A tensão limite de escoamento (LE) é onde ocorre a transição da deformação elástica para a deformação plástica. Para ser determinada com exatidão é complicada, por isso convencionou-se utilizar uma deformação de 0,2% para determiná-la, traçando uma linha paralela a região elástica, como apresentado na figura 13 (SILVA; MEI, 2010).

A tensão limite de resistência à tração (LRT) é o ponto de carga máxima no gráfico tensão-deformação de engenharia. Até esse ponto o aumento da carga é balanceado pelo encruamento e pela redução da área. A partir desse ponto a carga começa a diminuir devido ao fenômeno de estrição, ou seja, há a perda desse equilíbrio e uma parte do material começa a deformar mais do que o restante, tendo sua área mais reduzida que o restante do material. O material rompe nessa região (SILVA; MEI, 2010).

Por fim, o alongamento uniforme consiste no valor de deformação convencional identificado a partir da interseção do traçado de uma reta com a mesma inclinação da porção elástica da curva tensão convencional versus deformação convencional desde o ponto de tensão máxima (tensão limite de resistência à tração) até o eixo das abscissas (deformação convencional) (CALLISTER JUNIOR, 2008).

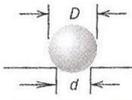
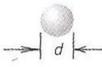
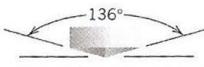
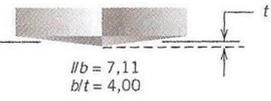
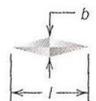
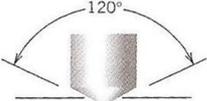
3.3.2. Ensaio de Dureza

Outra propriedade muito importante é a dureza, que é uma medida de resistência a deformação plástica localizada. Basicamente o ensaio se resume em forçar um pequeno penetrador contra a superfície do material com carga e taxa de aplicação controladas. A impressão deixada pelo penetrador é medida e relacionada com um número de dureza (CALLISTER JUNIOR, 2008).

Segundo Callister Junior (2008), este ensaio é um dos mais utilizados, pois além de ser barato, não é destrutivo e pode estimular outras propriedades mecânicas como, por exemplo, o LRT. (CALLISTER JUNIOR, 2008).

Para a realização deste ensaio há várias técnicas, sendo mais comuns 4 deles: Rockwell, Brinell, microdureza Vickers e microdureza Knoop (CALLISTER JUNIOR, 2008). A tabela 4 apresenta sucintamente essas técnicas.

Tabela 4 - Técnicas de ensaio de dureza

Ensaio	Penetrador	Forma da Impressão		Carga	Fórmula para o Número de Dureza ^a
		Vista Lateral	Vista Superior		
Brinell	Esfera de aço com 10 mm ou carbeto de tungstênio			P	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Microdureza Vickers	Pirâmide de diamante			P	$HV = 1,854P/d_1^2$
Microdureza Knoop	Pirâmide de diamante			P	$HK = 14,2P/l^2$
Rockwell e Rockwell Superficial	Cone de diamante; esferas de aço com diâmetros de $\frac{1}{16}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ in			60 kg } 100 kg } 150 kg } 15 kg } 30 kg } 45 kg }	Rockwell Rockwell Superficial

^aPara as fórmulas de dureza fornecidas, P (a carga aplicada) está em kg, enquanto D , d , d_1 e l estão todos em mm.

Fonte: Adaptado de H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 por John Wiley & Sons, New York. Reimpresso sob permissão de John Wiley & Sons, Inc.

Fonte: CALLISTER JUNIOR, 2008.

Segundo Silva e Mei (2010), para a realização do ensaio de forma correta, há cinco cuidados que devem ser levados em consideração. São eles:

- Para evitar leituras falsas, deve-se realizar o ensaio sempre dentro dos parâmetros recomendados para cada escala de dureza;
- Ter especial atenção aos materiais muito macios ou peças muito finas. A profundidade da impressão deve ser menor do que dez vezes a espessura da peça ou da camada a ser testada;
- Se realizar mais de uma impressão, estas devem estar espaçadas de no mínimo 3 vezes a dimensão da maior endentação;
- Verificar se a peça está corretamente posicionada na bigorna do aparelho e também se a bigorna está bem posicionada no seu suporte;
- Realizar corretamente o preparo da superfície.

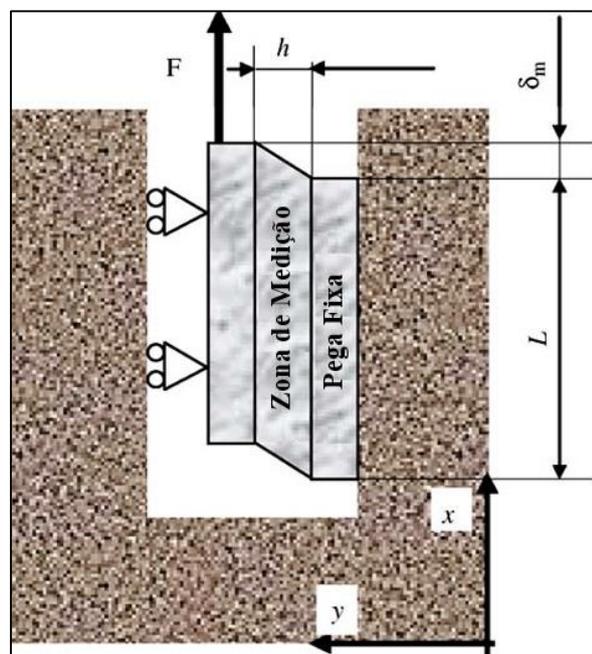
3.3.3. Ensaio de cisalhamento

Ao se conformar um material, pode-se gerar uma distribuição heterogênea de deformação, além de aumentar a sua anisotropia. Isto se deve por alguns processos envolverem sequências e rotas de deformação complexas (BOUVIER et al, 2005).

Há duas técnicas de ensaio de cisalhamento: o ensaio de torção (TAVARES et al, 2003) e o ensaio de cisalhamento puro. Este último, utilizando a técnica cisalhamento planar simples, é o mais utilizado, por melhor indicar as condições de esforços complexas, como na laminação (CALLISTER JÚNIOR, 2008; MARINHO JÚNIOR, 2013; LOPES, 2009; BOUVIER et al, 2006).

O dispositivo para este ensaio consiste basicamente em uma zona fixa e uma zona móvel. O material é fixado nestas duas partes, deixando uma região na qual será cisalhada. A zona móvel, assim, move-se paralelamente, causando deformações cisalhantes. A figura 14 apresenta um desenho esquemático do ensaio, em que L representa a altura, h a largura efetiva e δ_m o deslocamento da parte móvel (BOUVIER et al, 2006).

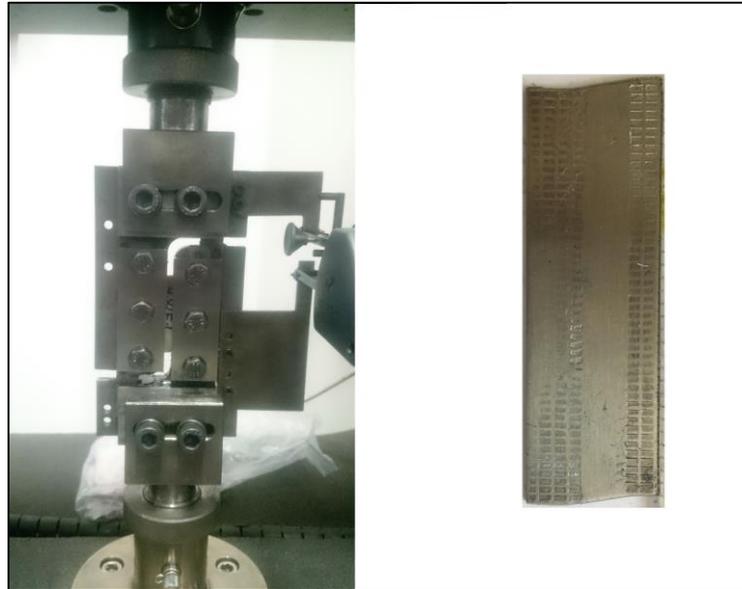
Figura 14 - Desenho esquemático do ensaio de cisalhamento



Fonte: BOUVIER et al, 2006.

A figura 15 mostra o equipamento a ser utilizado e o aspecto do corpo de prova após o ensaio.

Figura 15 - Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento planar simples (esquerda) e aspecto de corpo de prova após o ensaio (direita).



Fonte: Autor

Pela figura 15, percebe-se que, devido ao sistema de fixação, o material sofre marcações nas extremidades. Deve-se então, atentar-se para que este sistema não cause trincas e efeitos indesejáveis (BOUVIER et al, 2006; LOPES, 2009).

Para se calcular a tensão cisalhante convencional, deve-se ignorar os efeitos de fixação do corpo de prova no equipamento, como também as deformações de compressão nas extremidades do corpo de prova (BOUVIER et al, 2006). A equação 16 representa esse cálculo.

$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad (16)$$

Nela, τ representa a tensão cisalhante convencional média [MPa], F a força aplicada [N] e A_0 é a área inicial da zona de deformação [mm²].

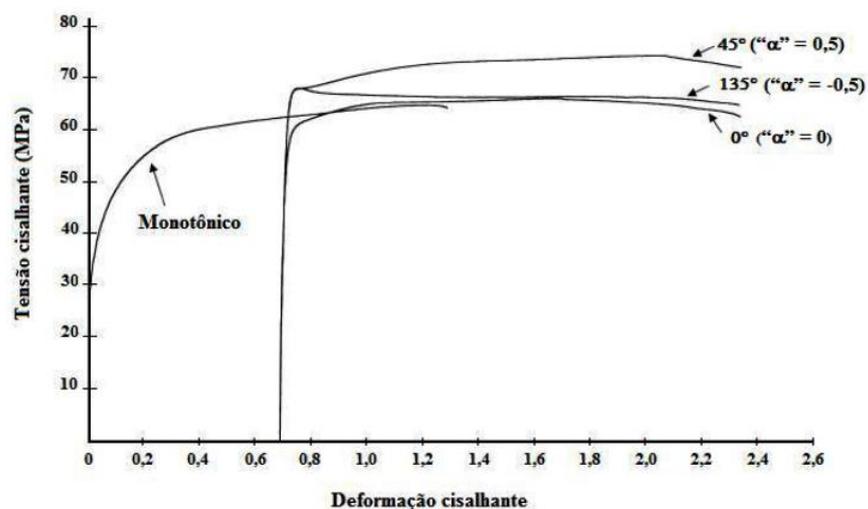
Para o cálculo da deformação cisalhante convencional, utiliza-se aproximações com o critério de escoamento de Von Mises e tensores tensão. Para esse cálculo, relaciona-se o deslocamento da parte móvel com a largura efetiva (equação 17). Não se utiliza a altura do corpo de prova (L), uma vez que ela será constante em todo o processo.

$$\gamma = \frac{\delta_m}{h} \quad (17)$$

Em relação ao ensaio de tração, o ensaio de cisalhamento possui algumas vantagens como: a confecção dos corpos de prova é mais simples (no formato retangular), permite a análise mais efetiva do efeito Bauchinger, invertendo a direção do esforço e possibilita atingir grandes valores de deformação plástica uniforme (LOPES, 2009).

Os resultados deste ensaio podem ser expressos numa curva parecida com a curva resultante de um ensaio de tração, onde nos lugares de tensão convencional e deformação convencional, utiliza-se tensão cisalhante média convencional (τ), e deformação cisalhante média convencional (γ). A figura 16 representa o resultado de um ensaio de cisalhamento realizado após o processo de laminação, em diferentes ângulos em relação à direção de laminação.

Figura 16 - Curvas tensão cisalhante e deformação cisalhante para material com e sem deformação prévia por laminação.



Fonte: LOPES, 2009

4. MATERIAIS E MÉTODOS

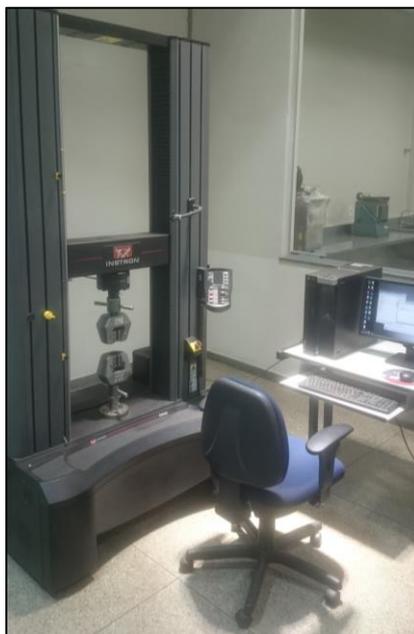
4.1. Material

Esse trabalho foi realizado com uso de chapas de aço inoxidável AISI 430 estabilizado ao nióbio no estado como recebido (laminadas a frio e recozidas) com 1mm de espessura. A composição química desse aço é de 16,2036%Cr, 0,0196 %C, 0,2167 %Ni, 0,3675%Nb, 0,26%Mn, 0,3328%Si, 0,0015%S, 0,0381%P, 0,0024%Al, 0,0145%Mo, 0,0273%Cu, 0,0189%Co, 0,0424%V, 0,0029%Ti, 0,004%Sn e 0,0192%W (% em peso).

4.2. Ensaio de tração

As propriedades mecânicas do aço AISI 430 no estado como recebido foram identificadas a partir da realização de ensaios de tração uniaxial (corpos de prova com seção transversal retangular, de acordo com a norma internacional da Sociedade Americana de Ensaios e Materiais (*American Society for Testing and Materials*) - ASTM E8, com duas taxas de deformação diferentes: taxa 1 ($0,0001 \text{ s}^{-1}$) e taxa 2 ($0,005 \text{ s}^{-1}$) e com uso de extensômetro mecânico do tipo agulhas), sendo os ensaios conduzidos em uma máquina de ensaios universais Instron® 5582 com sistema de aquisição de dados *Blue Hill 3*, como exibida na figura 17.

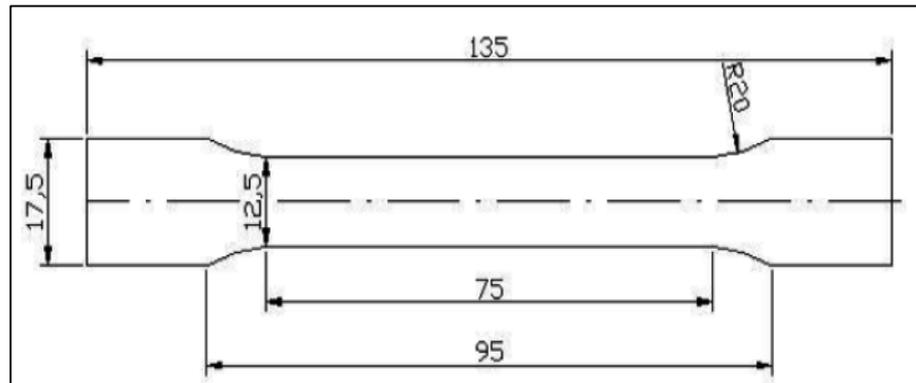
Figura 17 - Máquina de ensaios universais Instron® 5582 com sistema de aquisição de dados Blue Hill 3



Fonte: Autor

Os corpos de prova utilizados também seguiram as especificações da norma ASTM E8, conforme apresentado na figura 18.

Figura 18 - Esquema do corpo de prova utilizado no ensaio de tração



Fonte: LOPES, 2009

Neste caso foram calculados os seguintes parâmetros de resistência mecânica: tensão limite de escoamento e tensão limite de resistência à tração; e de ductilidade: alongamento uniforme.

Além da caracterização mecânica, o ensaio de tração uniaxial foi utilizado como pré-deformação para o cisalhamento, executando a rota de processamento tração/cisalhamento. Neste caso, o material foi tracionado até 50% do alongamento uniforme com as duas taxas de deformação citadas anteriormente para depois cisalhado.

4.3. Ensaio de microdureza Vickers

A caracterização mecânica foi feita ainda com a medição da dureza Vickers com uso do microdurômetro Vickers Shimadzu® HMV - 2T (figura 19) mediante uma carga de indentação de 1,961N aplicada durante 15 segundos sobre a superfície do material lixado (lixas de 240, 320 e 400 mesh).

O ensaio de dureza foi feito no aço AISI 430 no estado como recebido em 10 pontos aleatórios para a caracterização do material.

Figura 19 - Microdurômetro Vickers Shimadzu® HMV - 2T



Fonte: Autor

4.4. Ensaio de cisalhamento

O ensaio de cisalhamento planar simples foi utilizado para a avaliação dos efeitos da mudança de taxa nas propriedades mecânicas do material (rotas 3 e 4), assim como para avaliar o efeito da mudança de esforço e mudança nas duas variáveis ao mesmo tempo nas propriedades do material (rotas de 5 e 6). Para se realizar a técnica de cisalhamento planar simples, acoplou-se um dispositivo à máquina de ensaios universais Instron® 5582 (Figura 15).

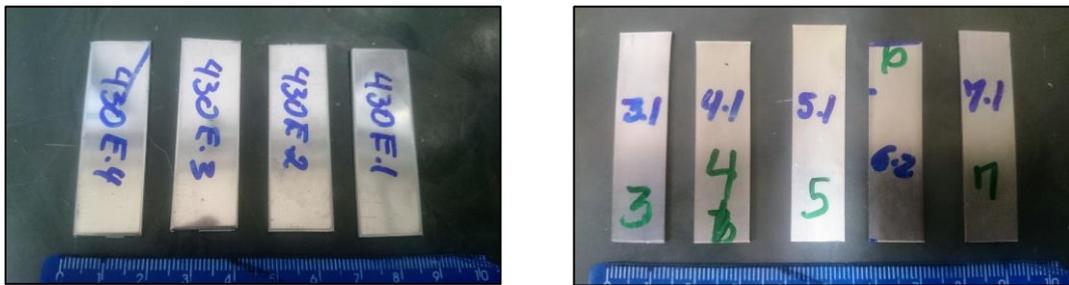
Para as rotas 3 e 4 foram preparados corpos de prova com dimensões de 50 mm x 15 mm x 1 mm (comprimento x largura x espessura). Para as demais rotas, os corpos de prova foram retirados dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração com auxílio da guilhotina PEXTO modelo U-136-D (figura 20), tentando obter medidas próximas as utilizadas como padrão, como se pode observar na figura 21.

Figura 20 - Guilhotina Pexto modelo U-136-D



Fonte: Autor

Figura 21 - Corpos de prova utilizados no ensaio de cisalhamento



(a)

(b)

(a) Corpos de prova utilizados nas rotas 3 e 4. (b) Corpos de prova utilizados nas demais rotas

Fonte: Autor

4.5. Procedimento experimental

Esse trabalho foi realizado por meio de 6 rotas diferentes, entre somente mudança de taxa de deformação, mudança de modo de deformação e mudança das duas variáveis, excluindo os procedimentos utilizados para a caracterização do material como recebido (Figura 22).

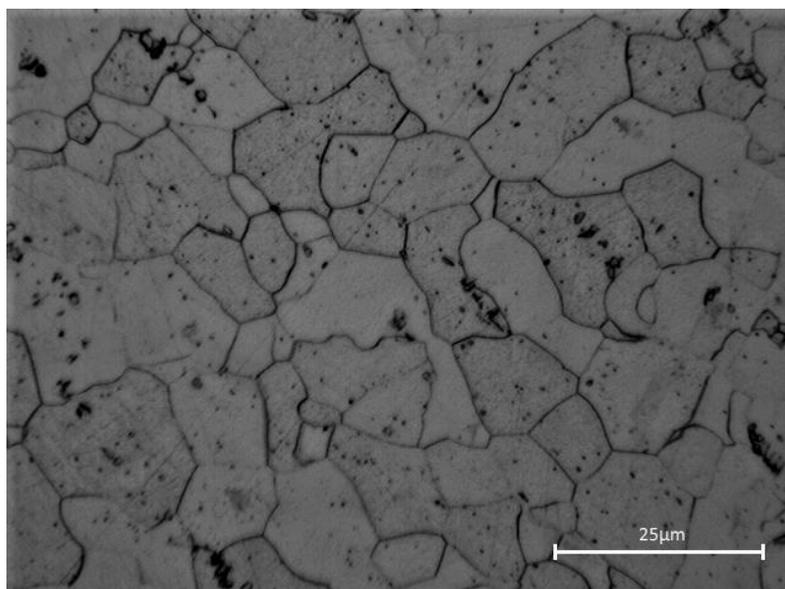
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização Mecânica

5.1.1. Micrografia

A figura 23 apresenta a microestrutura do material como recebido.

Figura 23 - Micrografia do aço AISI 430 estabilizado com nióbio no estado como recebido. Aumento de 400x



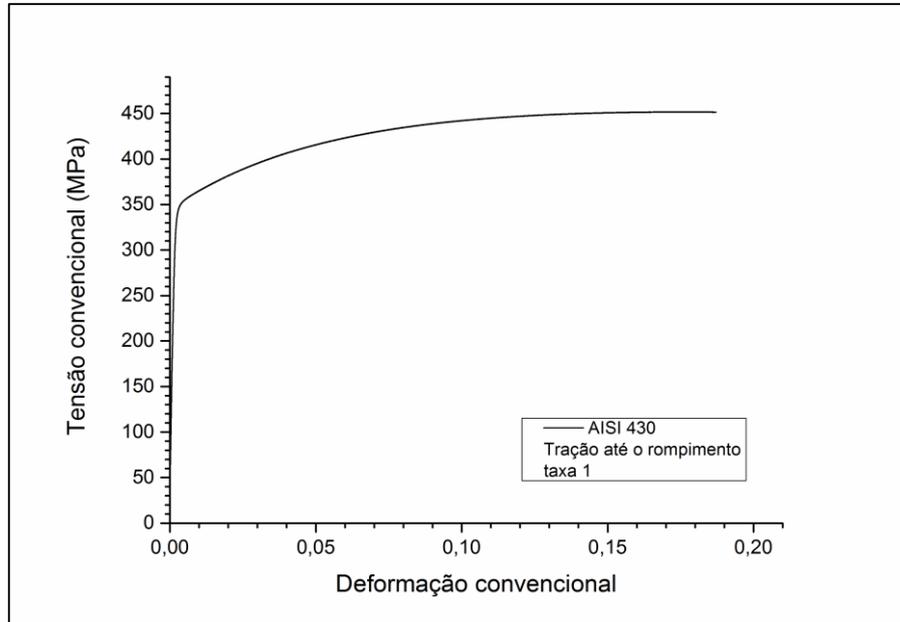
Fonte: Autor

Como se pode perceber, a matriz ferrítica apresentou grão sem uma direção preferencial, o que poderia ocorrer do processo de laminação. Percebe-se também a presença de alguns precipitados, que podem ser precipitados de compostos de nióbio.

5.1.2. Ensaio de tração

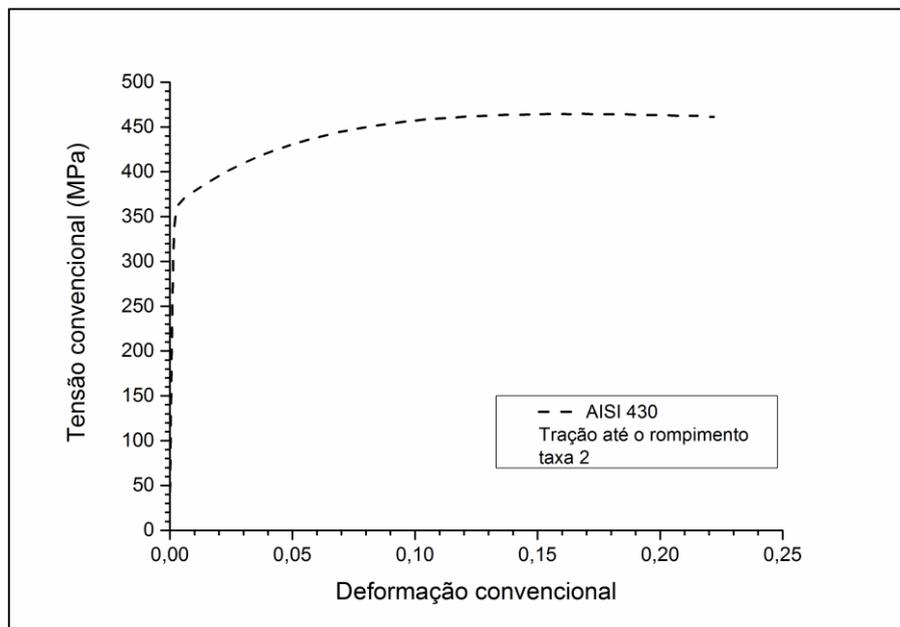
Realizou-se o ensaio de tração para se obter as propriedades mecânicas do material. Utilizou-se as duas taxas de deformação ($0,0001$ e $0,005s^{-1}$) para isso e as figuras 24 e 25 apresentam os gráficos obtidos para as duas taxas de deformação utilizadas.

Figura 24 - Gráfico Tensão convencional x Deformação convencional para a taxa 1 ($0,0001s^{-1}$)



Fonte: Autor

Figura 25 - Gráfico Tensão convencional x Deformação convencional para a taxa 2 ($0,005s^{-1}$)



Fonte: Autor

Com o auxílio dos gráficos acima, foi possível encontrar os valores de LE, LRT e AU para cada uma das taxas, valores estes indicados nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Valores de LE e LRT obtidos na taxa 1 (0,0001s⁻¹)

Limite de Escoamento, LE (MPa)	Limite de Resistência a Tração, LRT(MPa)	Alongamento Uniforme (%)
350±5	451,84	17,83

Fonte: Autor

Tabela 6 - Valores de LE e LRT obtidos na taxa 1 (0,005s⁻¹)

Limite de Escoamento, LE (MPa)	Limite de Resistência a Tração, LRT(MPa)	Alongamento Uniforme (%)
365±5	464,88	16,00

Fonte: Autor

Vale ressaltar que essa variação dos valores já era esperada, já que a mudança da taxa de deformação afeta o limite de escoamento do material seguindo a relação apresentada na equação 10. Além disso, é importante explicitar que os ensaios foram feitos na temperatura ambiente, dessa forma eliminando qualquer hipótese de que essas alterações nas propriedades mecânicas sejam devido a alterações de temperatura de realização do ensaio.

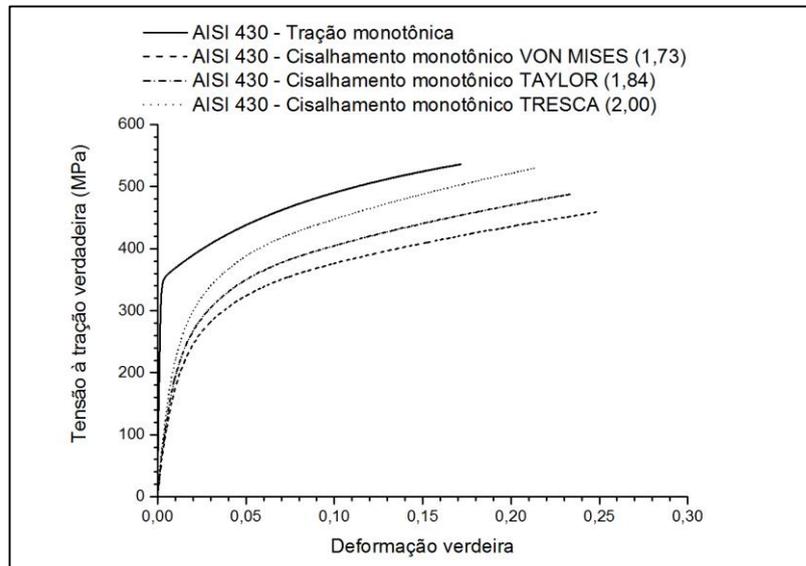
5.1.3. Ensaio de Dureza

A fim de conhecer mais sobre a amostra, realizou-se o ensaio de microdureza Vickers com os parâmetros já mencionados na metodologia. O valor obtido foi de 164,4±3 HV, valor esse condizente com a média das bibliografias.

5.1.4. Ensaio de Cisalhamento Planar Simples

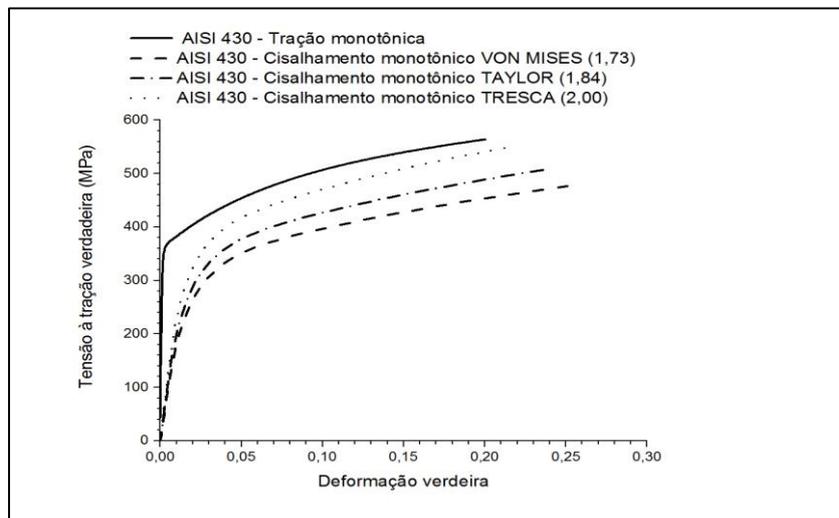
Realizou-se o ensaio de cisalhamento planar simples para determinar qual o melhor critério de escoamento para transformar deformação cisalhante em deformação efetiva para cada uma das taxas. Para isso, comparou-se os critérios de Tresca (2,00), Taylor (1,84) e Von Mises (1,73) (LOPES, 2009; DIETER, 1981). As figuras 26 e 27 apresentam os resultados dessa comparação.

Figura 26 - Análise dos fatores de correção para os ensaios de cisalhamento na taxa 1 ($0,0001s^{-1}$)



Fonte: Autor

Figura 27 - Análise dos fatores de correção para os ensaios de cisalhamento na taxa 2 ($0,005s^{-1}$)



Fonte: Autor

Como se pode observar nos gráficos acima, o melhor critério para as duas taxas de deformação foi o de Tresca 2,00, que foi o que se aproximou mais da curva de tração, ainda assim com os resultados muito distantes, isso contraria os resultados obtidos por Lopes (2006). Segundo Lopes, utilizando o mesmo material, o melhor critério a ser utilizado é o de Taylor (1,84). As possíveis hipóteses para essa discrepância são algum problema em algum dos ensaios realizados, as dimensões dos corpos de prova e a composição química do material serem diferentes das de Lopes (2006). Dessa forma, utilizou-se o coeficiente de Taylor para traçar os gráficos de tensão efetiva em função da deformação efetiva, uma vez que não houve a disponibilidade de testar essas hipóteses e o fato do valor já ter sido utilizado com sucesso anteriormente.

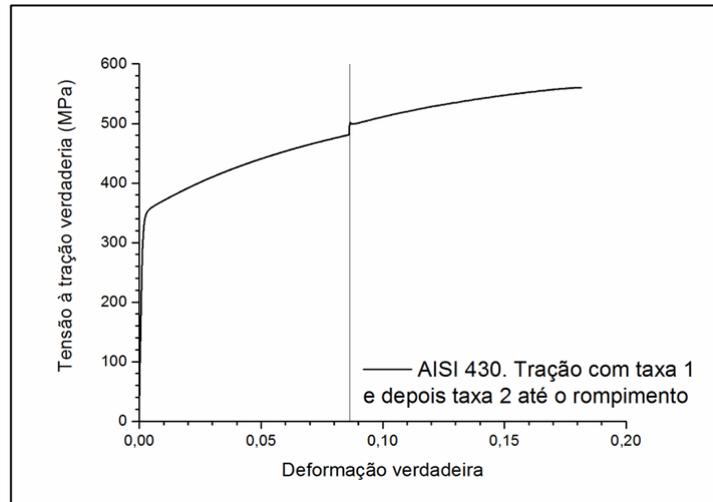
5.2. Análise quanto a mudança da taxa de deformação

Para se avaliar os efeitos da taxa de deformação nas propriedades mecânicas do material, realizou-se ensaios de tração e cisalhamento com mudanças de taxa durante o ensaio.

5.2.1. Ensaio de tração

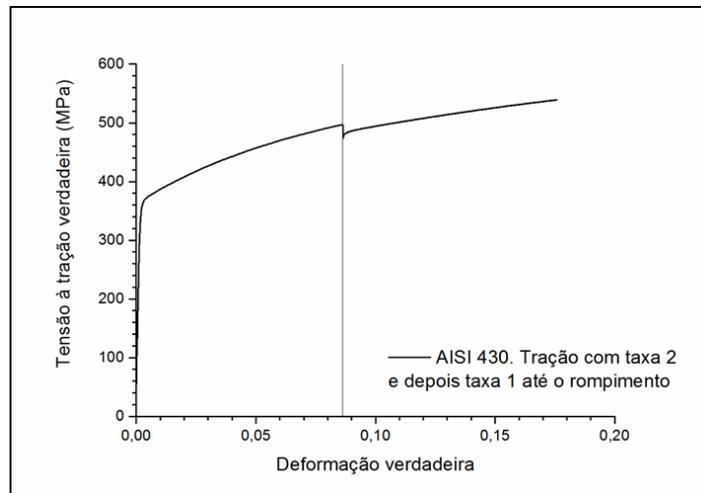
Realizou-se ensaios de tração com a variação da taxa de deformação próximo ao valor de 9% de deformação convencional. Os ensaios foram feitos em duplicata para reduzir os erros. Os gráficos representados nas figuras 28 e 29, apresentam os resultados obtidos com mudança de taxa ascendente (Rota 1) e descendente (Rota 2), respectivamente.

Figura 28 - Curva tensão verdadeira em função da deformação verdadeira de um ensaio de tração com mudança de taxa de deformação: da taxa 1 ($0,0001s^{-1}$) para a taxa 2 ($0,005s^{-1}$) - Rota 1



Fonte: Autor

Figura 29 – Curva tensão verdadeira em função da deformação verdadeira de um ensaio de tração com mudança de taxa de deformação: da taxa 2 ($0,005s^{-1}$) para a taxa 1 ($0,0001s^{-1}$) - Rota 2



Fonte: Autor

Com os dados dos gráficos acima, dos dados obtidos pelo ensaio de tração e utilizando o método apresentado na figura 11, pode-se calcular o coeficiente de sensibilidade da tensão de escoamento, utilizando a equação 12. A tabela 7 apresenta os valores calculados para o coeficiente m , assim como o maior valor de tensão verdadeira obtido para cada rota.

Tabela 7 - Valores do coeficiente de sensibilidade a deformação e tensões máximas obtidas nas rotas 1 e 2

Rota	Coeficiente de sensibilidade da tensão de escoamento, m	Valor máximo da tensão verdadeira (MPa)
1	0,009970715	559,9094315
2	0,012369435	539,2319259

Fonte: Autor

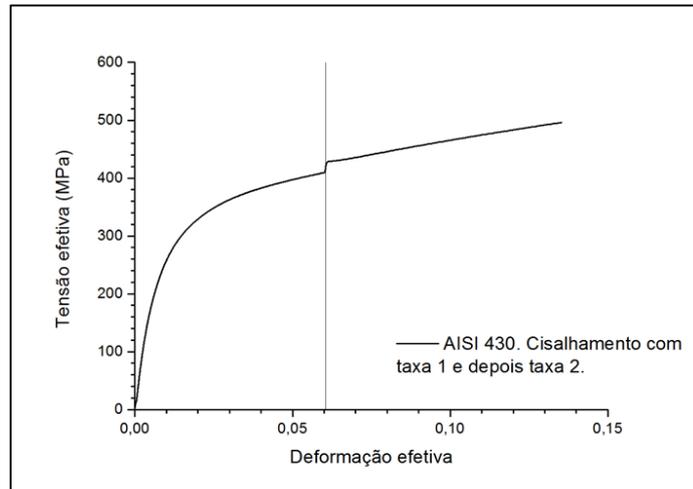
Ao se observar a tabela 7, percebe-se que o valor obtido para m na rota 1 foi menor do que o obtido na rota 2, o que se era esperado, já que na rota 1 a variação na taxa de deformação é ascendente.

Outro ponto que vale salientar são os valores máximos de tensão verdadeira obtidos. Como esperado, a rota 1 obteve maior valor máximo de tensão verdadeira se comparado à rota 2. Esse resultado era esperado, já que a taxa final era a maior taxa (taxa 2), o que fez o processo transcorrer mais rápido e dar menos tempo para o movimento das discordâncias.

5.2.2. Ensaio de cisalhamento

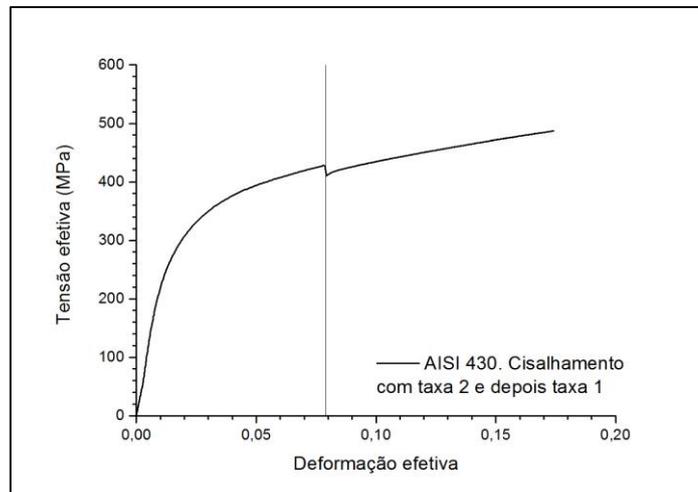
Repetiu-se os mesmos procedimentos, realizados no item anterior, para os ensaios de cisalhamento das rotas 3 (variação de taxa ascendente) e 4 (variação de taxa descendente). As figuras 30 e 31 apresentam os gráficos provenientes dessas análises.

Figura 30 - Curva tensão verdadeira em função da deformação verdadeira de um ensaio de cisalhamento com mudança de taxa de deformação: da taxa 1 ($0,0001s^{-1}$) para a taxa 2 ($0,005s^{-1}$) - Rota 3



Fonte: Autor

Figura 31 - Curva tensão verdadeira em função da deformação verdadeira de um ensaio de tração com mudança de taxa de deformação: da taxa 2 ($0,005s^{-1}$) para a taxa 1 ($0,0001s^{-1}$) - Rota 4



Fonte: Autor

Da mesma forma, utilizando os resultados obtidos no gráfico, a equação 12 e o método apresentado na figura 11, pode-se calcular o valor do coeficiente de sensibilidade da tensão de escoamento para cada taxa, apresentado na tabela 8.

Tabela 8 - Valores do coeficiente de sensibilidade a deformação e tensões máximas obtidas nas rotas 3 e 4

Rota	Coeficiente de sensibilidade da tensão de escoamento, m	Valor máximo da tensão verdadeira (MPa)
3	0,01252026	496,0326568
4	0,010537854	486,9889647

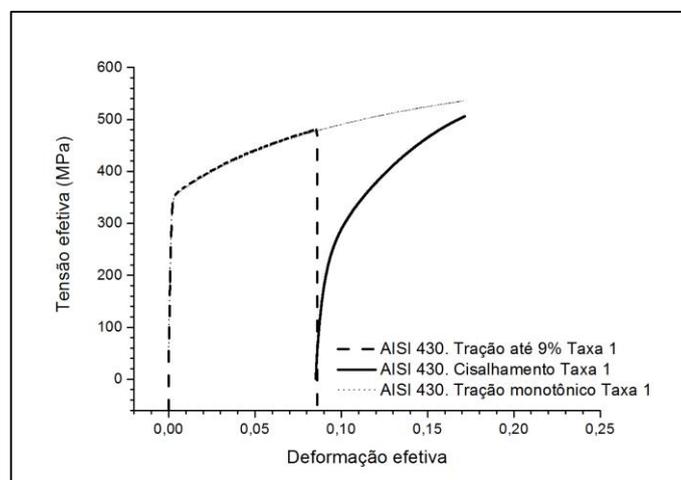
Fonte: Autor

Ao contrário do observado nas rotas que utilizaram a tração, a maior sensibilidade foi observada na rota 3 (mudança da menor para a maior taxa), quando que o esperado era que se repetisse o padrão observado nas rotas de tração.

5.3. Análise quanto à mudança do modo de deformação

Para avaliar o efeito da mudança do modo de deformação, primeiro deformou-se amostras de tração até 50% do alongamento uniforme (9% da deformação convencional). Após isso, com o auxílio de uma guilhotina, cortou-se essas amostras para produzir corpos de prova para o ensaio de cisalhamento. O resultado do procedimento da rota 5 é apresentado no gráfico da figura 32.

Figura 32 - Curva tensão verdadeira em função da deformação verdadeira de um ensaio de cisalhamento com uma pré deformação por tração até 9% de deformação convencional, ambos feitos na taxa $1(0,0001s^{-1})$ - Rota 5

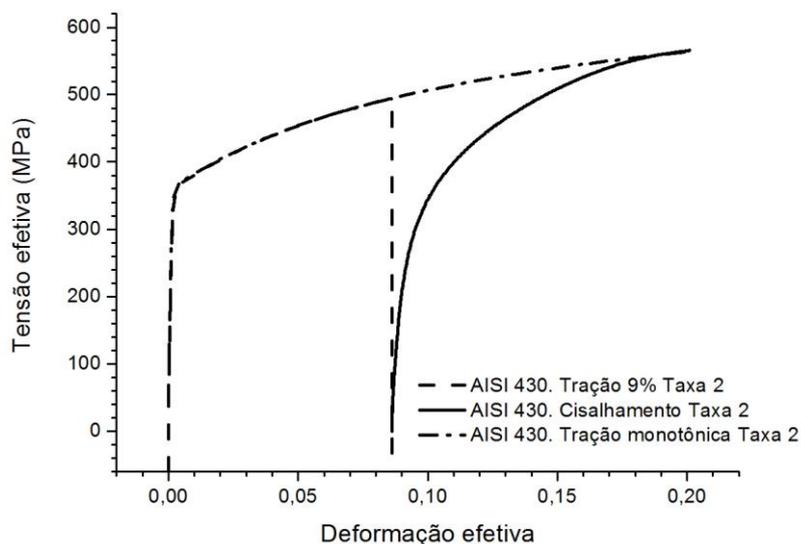


Fonte: Autor

A partir do gráfico pode-se observar que não houve um endurecimento do material devido a pré deformação, já que a tensão inicial do ensaio de cisalhamento ficou abaixo da tensão final da pré deformação em tração. Comparando o valor máximo de tensão efetiva obtido na rota 5 (505,81MPa) com o valor obtido na caracterização por cisalhamento monotônico na taxa 1 (535,91 MPa), percebe-se que a pré deformação não foi efetiva para aumentar a resistência do material, e que ao contrário do esperado, houve um amaciamento do mesmo.

O gráfico da rota 6 é apresentado na figura 33. O método utilizado segue a metodologia usada na rota anterior, mudando somente a taxa de deformação no cisalhamento para a taxa 2.

Figura 33 - Curva tensão verdadeira em função da deformação verdadeira de um ensaio de cisalhamento com uma pré deformação por tração até 9% de deformação convencional, ambos feitos na taxa 2(0,005s⁻¹) - Rota 6



Fonte: Autor

Assim como na rota anterior, observou-se que não houve um endurecimento inicial por causa da pré deformação em tração, porém não houve o aumento no valor máximo de tração efetiva.

Além disso, as duas rotas (5 e 6) tiveram uma severa mudança na trajetória de deformação. Schmitt, Aernoudt e Baudelet (1985) propuseram um parâmetro α , que referencia esse grau de severidade. Por definição esse parâmetro varia de -1 a 1, sendo -1 para quando não há mudança na trajetória de deformação e 1 para quando a aplicação da carga é contrária, como no efeito Bauschinger. Para Schmitt, Aernoudt e Baudelet (1985), a sequência de deformação

tração mais cisalhamento tem $\alpha=0$, que significa que haverá atividade dos planos de escorregamento que estavam latentes quando a amostra foi pré deformada. Esse valor de α é dado para os testes chamados de sequência ortogonais, como tração seguida de cisalhamento na mesma direção, que é o escopo desse trabalho.

6. CONCLUSÕES

- I. Verificou-se a sensibilidade da tensão à mudança das taxas de deformação aplicadas ao aço AISI 430;
- II. A adoção dos critérios de escoamento de von Mises, Taylor e Tresca não foi adequada para equalizar os esforços de tração e de cisalhamento, sendo isso associado a erros de medição da largura efetiva submetida ao cisalhamento;
- III. Ao se mudar a taxa de deformação do menor para o maior (rotas 1 e 3), valores de taxa de deformação percebeu-se o aumento inicial da tensão de fluxo acompanhado por endurecimento por encruamento para a curva de fluxo do último valor de taxa de deformação aplicado ao aço AISI 430;
- IV. Ao se mudar a taxa de deformação do maior para o menor valores de taxa de deformação (rotas 2 e 4), percebeu-se a queda inicial da tensão de fluxo acompanhada por endurecimento por encruamento para a curva de fluxo do último valor de taxa de deformação aplicado ao aço AISI 430;
- V. Notou-se a queda da resistência mecânica logo após a mudança dos modos de deformação plástica de tração para cisalhamento (rotas 5 e 6), acompanhando por endurecimento por encruamento com a continuidade da deformação em cisalhamento.
- VI. O amaciamento na rota 5 (Tração/cisalhamento na taxa de $0,0001\text{s}^{-1}$) mostrou-se alto, ao ponto de reduzir a resistência mecânica do material ao ser comparado com o ensaio de tração monotônico.

REFERÊNCIAS

BOUVIER, S. et al. Simple shear tests: Experimental techniques and characterization of the plastic anisotropy of rolled sheets at large strains. **Journal Of Materials Processing Technology**, Paris, p. 96-103. 20 fev. 2006.

CALLISTER JUNIOR, William D.. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. 705 p.

CARBÓ, Héctor Mario. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. Disponível em: <ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM343/artigo_acoinox_aplicacao_especificacao.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2013.

CETLIN, Paulo Roberto; HELMAN, Horacio. **Fundamentos da conformação: Mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2012. 600 p.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 672 p.

DIETER, George E.. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653 p.

FERREIRA, J. S. **Efeito da fração volumétrica de martensita, formada no resfriamento após recozimento intercrítico, no grau de estiramento, propriedades mecânicas e estampabilidade de um aço tipo AISI 430**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 118p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alves; SANTOS, Carlos Alexandre do. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HEDWORTH, J.; STOWELL, M. J.. The Measurement of Strain-Rate Sensitivity in Superplastic Alloys. **Journal Of Materials Science**, Saffron Walden, v. 6, n. 8, p.1061-1069, ago. 1971.

LOPES, Wellington. **Efeito da pré-deformação e direção de solicitação no comportamento mecânico do aço inoxidável AISI 430E com uso do ensaio de cisalhamento para alterar a trajetória de deformação**. 2006. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, UFMG, Belo Horizonte, 2006.

LOPES, W. **Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. 186p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

MANSUR, Herman Sander. **Técnicas de Caracterização de Materiais**. Disponível em: <<http://www.biomaterial.com.br/capitulo7part01.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2013.

MARCONDES, Prof. Doutor Paulo. **Propriedades Mecânicas Fundamentais**. Curitiba: Demec / Ufpr, 2016. Color. Disponível em: <[http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM262/Material_Aulas/2 - Propriedades Mecanicas Fundamentais.pdf](http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM262/Material_Aulas/2_-_Propriedades_Mecanicas_Fundamentais.pdf)>. Acesso em: 30 nov. 2016.

MORAIS, Willy Ank de. **Conformação Plástica dos Metais**. Disponível: <<http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo8/Capitulo2-parte2.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2016.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C.. **Aços inoxidáveis autênticos: Microestrutura e propriedades**. São Paulo: Hermus, 1994. 170 p.

SCHMITT, J.H.; AERNOUD, E; BAUDELET, B. Yield loci for polycrystalline metals without texture. **Materials Science & Engineering**. vol. 75, p. 13-20, 1985

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2010. 646 p.

SIQUEIRA, Rodrigo Pinto de et al. **Recristalização do aço AISI 430 com estrutura colunar de grãos**. *Rem: Rev. Esc. Minas*, Mar 2007, vol.60, no.1, p.117-122. ISSN 0370-4467

STOETERAU, Rodrigo Lima. **Tribologia**: - EMC 5315 -. Florianópolis: UFSC, 2002. 179 p.