



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

TOMAZ COSTA SOARES JUNIOR

**INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO ASSOCIADA À
TEMPERATURA EM AÇO 1020**

FORTALEZA

2016

TOMAZ COSTA SOARES JUNIOR

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO ASSOCIADA À TEMPERATURA
EM AÇO 1020

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S657i Soares Junior, Tomaz Costa.
 Influência da velocidade de deformação associada à temperatura em aço 1020 / Tomaz Costa Soares Junior. – 2016.
 53 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2016.
 Orientação: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu.
1. Ensaio de Tração. 2. Velocidade de Deformação. 3. Temperaturas Elevadas. I. Título.

CDD 669

TOMAZ COSTA SOARES JUNIOR

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO ASSOCIADA À TEMPERATURA
EM AÇO 1020

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Luis Flávio Gaspar Herculano
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Mohammad Masoumi
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Tomaz e Iris.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. Luis Flávio Gaspar Herculano e Me. Mohammad Masoumi pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos professores e funcionários da UFC, principalmente aos do Departamento de Engenharia Metalúrgica, pela qualidade do ensino prestado, em especial ao Prof. Dr. Marcelo José e ao Prof. Dr. Elineudo Pinho, respectivamente atual e antecessor Coordenador do Curso, e ao Prof. Dr. Lindberg Lima, pelo esforço de promover uma parceria com a CSN, empresa em que tive orgulho de estagiar.

Agradeço aos meus amigos Manuel Vasconcelos, Jefferson Alexandre, Francisco Diego, Engenheiros Francisco Leonardo, José Raphael, Marcos Paulo, Reinaldo Cerqueira, Carlos Filippe e Delaney Gomes.

Ao Dr. Neuman Fontenele Viana e ao Caio David do LACAM pelos auxílios prestados no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu primo José Jackson pela ajuda moral.

“Tudo o que outrora foi escrito, foi escrito para nossa instrução, para que, pela nossa constância, tenhamos firme esperança”.

São Paulo.

RESUMO

Ensaaios de tração em aços na temperatura ambiente são pouco influenciados pela velocidade em que são realizados. Com o aumento da temperatura do ensaio a influência da velocidade de deformação é significativa. Ensaaios em temperaturas elevadas são importantes para o estudo da deformação a quente dos materiais, normalmente nessas condições, a resistência diminui e a ductilidade aumenta, a deformação plástica é facilitada, reduzindo assim os esforços nas máquinas e nas peças a serem fabricadas por trabalho a quente. E a velocidade de deformação também afeta esse comportamento. Este trabalho visa estudar a influência da velocidade de deformação associada à temperatura em aço AISI 1020. A base desse estudo será o ensaio de tração, realizado em corpos de prova de seção circular, submetidos a cinco diferentes temperaturas, aplicando três diferentes velocidades de deformação. Neste estudo, serão levantadas as curvas tensão-deformação de engenharia, e obtidos valores de Limite de Escoamento, Resistência a Tração e Alongamento. Nos 15 ensaios realizados, observaram-se valores dessas propriedades, que chegaram a variar de 60 a 650 MPa, de Resistência, e de 36 a 600 MPa, de Escoamento, resultando numa redução drástica da tensão aplicada necessária para a deformação do metal. A propriedade mecânica de Ductilidade também sofreu uma variação, de 3 a 20 % de Alongamento. As curvas medidas serão comparadas com curvas tensão-deformação verdadeiras, calculadas usando a equação de Ludwik-Hollomon. Com estes dados, serão calculados o Expoente de Encruamento (n), o Coeficiente de Resistência (K), e o Coeficiente de Sensibilidade da Taxa de Deformação (m).

Palavras-chave: Ensaio de Tração. Temperaturas Elevadas. Velocidade de Deformação.

ABSTRACT

Tension test on steels at room temperature are little influenced by the speed at which are performed. With increase test temperature the influence of the strain rate is significant. Tests at elevated temperatures are important for the study of hot deformation of materials, normally under these conditions, the resistance decreases and the ductility increases, the plastic deformation is facilitated, thus reducing the stresses on the machines and parts to be fabricated by hot work. And the deformation speed also affects this behavior. This work aims to study the influence of strain rate associated with temperature in AISI 1020 steel. The basis of this study will be the tensile test, performed on test specimens of circular section, subjected to five different temperatures, applying three different strain rates. In this study, the strain-strain curves of engineering will be built, and obtained values of Yield Strength, Tensile Strength and Elongation. In the 15 tests performed, values of these properties were observed, which ranged from 60 to 650 MPa, of Resistance, and from 36 to 600 MPa, of Flow, resulting in a drastic reduction of the applied tension required for the deformation of the metal. The mechanical property of Ductility also experienced a variation, from 3 to 20% of Elongation. The measured curves will be compared with true strain-strain curves, calculated using the Ludwik-Hollomon equation. With these data, will be calculated the strain-hardening exponent (n), the coefficient of resistance (K) and the strain-rate sensitivity (m).

Keywords: Tensile Testing. High Temperatures. Strain Rates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representações esquemáticas das microestruturas para uma liga de ferro-carbono com composição hipoeutetóide C_0 (contendo menos do que 0,76%p C).....	17
Figura 2 – Fotomicrografia de um aço com 0,38%p C que possui uma microestrutura composta por perlita e ferrita proeutetóide. Ampliação de 635×.....	18
Figura 3 – Curva tensão-deformação de engenharia.....	20
Figura 4 – Comparação das curvas tensão-deformação de engenharia e tensão verdadeira-deformação verdadeira.....	24
Figura 5 – A influência do trabalho a frio sobre o comportamento tensão-deformação de um aço baixo teor de carbono.....	27
Figura 6 – Efeito da taxa de deformação na resistência à tração do cobre testado a várias temperaturas.....	29
Figura 7 – A influência da taxa de deformação na tensão de escoamento para vários valores de sensibilidade à taxa de deformação, m , indicada nas curvas.....	30
Figura 8 – Dois métodos de determinação de m . a) Duas contínuas curvas tensão-deformação em diferentes taxas de deformação são comparadas na mesma deformação. b) Abruptas alterações na taxa de deformação são feitas durante um ensaio de tração.....	31
Figura 9 – Sensibilidade à taxa de deformação dependendo da temperatura do 2024 e do alumínio puro.....	32
Figura 10 – Mudanças das curvas tensão-deformação de engenharia de aço doce com a temperatura.....	33
Figura 11 – Efeito da Temperatura na tensão limite de escoamento dos metais CCC Ta, W, Mo, Fe, e o metal CFC Ni.....	34
Figura 12 – Efeito da Alta ($1,0 \text{ s}^{-1}$) e Baixa ($0,05 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) Taxa de Deformação e Temperatura na Curva Tensão-Deformação de uma Chapa de Aço Carbono 1020 Laminada a Quente.....	35

Figura 13 – a) Geometria do CP utilizado no trabalho. b) Corpo de prova usinado.....	38
Figura 14 – Forno acoplado, hastes de fixação e um CP fixado.....	39
Figura 15 – Fotomicrografia do aço 1020 estudado a) da seção longitudinal e b) da seção transversal da barra. Ampliação 500×.....	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Tensão-deformação de engenharia a 27°C para as três velocidades.....	44
Gráfico 2	– Tensão-deformação verdadeira a 27°C para as três velocidades.....	44
Gráfico 3	– Tensão-deformação de engenharia a 300°C para as três velocidades.....	45
Gráfico 4	– Tensão-deformação verdadeira a 300°C para as três velocidades.....	45
Gráfico 5	– Tensão-deformação de engenharia a 500°C para as três velocidades.....	46
Gráfico 6	– Tensão-deformação verdadeira a 500°C para as três velocidades.....	46
Gráfico 7	– Tensão-deformação de engenharia a 700°C para as três velocidades.....	47
Gráfico 8	– Tensão-deformação verdadeira a 700°C para as três velocidades.....	47
Gráfico 9	– Tensão-deformação de engenharia a 900°C para as três velocidades.....	48
Gráfico 10	– Tensão-deformação verdadeira a 900°C para as três velocidades.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Efeito do encruamento sobre as propriedades de tração de um aço baixo carbono.....	26
Tabela 2 – Quantificação de cada microestrutura e carbono na amostra.....	43
Tabela 3 – Propriedades Mecânicas de engenharia, e os valores de n e K	49
Tabela 4 – Valores encontrados de m	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFC - Cúbica de Face Centrada
CCC - Cúbica de Corpo Centrado
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI - American Iron and Steel Institute
SAE - Society of Automotive Engineers
CP - Corpo de Prova
SI - Sistema Internacional
LE - Tensão Limite de Escoamento
RT - Limite de Resistência a Tração
TF - Tensão de Fratura
%AL - Alongamento Percentual
%TF - Porcentagem de Trabalho a Frio, igual a %CW
NBR - Designação de Norma da ABNT
ISO - International Organization for Standardization
LACAM - Laboratório de Caracterização de Materiais
LEM - Laboratório de Ensaios Mecânicos
ASTM - American Society for Testing and Materials

LISTA DE SÍMBOLOS

α - Estrutura CCC da liga Ferro-carbono (ferrita)

γ - Estrutura CFC da liga Ferro-carbono (austenita)

%p - Porcentagem em Peso

W_p - Fração de Perlita

W_α - Fração de α (ferrita)

s - Tensão de Engenharia

F - Carga Instantânea em um Ensaio de Tração

A_0 - Área Inicial da Seção Reta do CP

e - Deformação de Engenharia

Δl - Alongamento do Comprimento Útil do CP, $= l_i - l_0$

l_0 - Comprimento Útil Original do CP

l_i - Comprimento Instantâneo do CP

$F_{\text{máx}}$ - Carga Máxima em um Ensaio de Tração

l_f - Comprimento do CP no Momento da Fratura

σ - Tensão Verdadeira

ε - Deformação Verdadeira

n - Expoente de Encruamento

K - Coeficiente de Resistência

C - Constante de Resistência

m - Sensibilidade à Taxa de Deformação da Tensão de Escoamento

v - Velocidade do Travessão Móvel de uma Máquina de Tração

$\dot{\varepsilon}$ - Taxa de Deformação Expressa em Termos da Deformação Linear Convencional

$\dot{\varepsilon}$ - Taxa de Deformação Verdadeira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	Material em Estudo.....	16
3.1.1	<i>Aço Baixo Carbono.....</i>	16
3.2	Ensaio de Tração.....	19
3.2.1	<i>Curva Tensão-Deformação de Engenharia.....</i>	19
3.2.2	<i>Curva Tensão Verdadeira - Deformação Verdadeira.....</i>	23
3.2.3	<i>Propriedades de Tração de um Aço Baixo Carbono.....</i>	25
3.3	Ensaio de Tração à Temperatura Elevada.....	27
3.4	Taxa de Deformação.....	28
3.5	Efeito da Temperatura nas Propriedades de Escoamento.....	33
3.6	Efeito Combinado da Temperatura e da Taxa de Deformação.....	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1	Material.....	37
4.2	Ensaio de Tração.....	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
5.1	Análise Micrográfica.....	42
5.2	Resultados dos Ensaio de Tração.....	43
5.2.1	<i>Temperatura Ambiente.....</i>	44
5.2.2	<i>A Temperatura de 300°C.....</i>	45
5.2.3	<i>A Temperatura de 500°C.....</i>	46
5.2.4	<i>A Temperatura de 700°C.....</i>	47
5.2.5	<i>A Temperatura de 900°C.....</i>	48
5.3	Propriedades Mecânicas.....	49
5.4	Sensibilidade a Taxa de Deformação.....	50
6	CONCLUSÃO.....	51
7	TRABALHOS FUTUROS.....	52
	REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

O emprego de temperaturas diferentes da ambiente nos ensaios mecânicos é utilizado para estudos e pesquisas ou em casos específicos de materiais que devam resistir a essas temperaturas. (SOUZA, 1982)

No campo de altas temperaturas, fazem-se pesquisas para o desenvolvimento de materiais que resistam a temperaturas elevadas, podendo-se citar os equipamentos para produção de energia nuclear, indústria química e petrolífera, aeronáutica, projeteis e foguetes. Nesse campo, devem ser considerados além dos ensaios de fluência (creep), os ensaios de tração em temperaturas elevadas, a fim de determinar as tensões e deformações de um metal, porém diferente do ensaio de fluência, este estará submetido a uma tensão variável, e a uma velocidade de deformação preestabelecida. (SOUZA, 1982)

Além dos efeitos do encruamento na tensão de escoamento, o escoamento de um material também depende da taxa de deformação e temperatura. Ele geralmente aumenta com o aumento da taxa de deformação e diminui com o aumento da temperatura. Aumentando-se a temperatura e reduzindo-se a taxa de deformação, a deformação plástica é facilitada, reduzindo assim os esforços nas máquinas e nas peças a serem fabricadas por trabalho a quente. (HOSFORD, 2007)

2 OBJETIVOS

Avaliar as propriedades mecânicas de Tensão Limite de Escoamento, Limite de Resistência a Tração e Ductilidade em um aço de baixo teor de carbono (AISI 1020), em diferentes taxas de deformação e temperaturas (elevadas), obtendo valores de Coeficientes de Resistência, Expoentes de Encruamento, e de Sensibilidade a Taxa de Deformação, nessas condições. E avaliar micrograficamente o aço em estudo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Material em Estudo

3.1.1 Aço Baixo Carbono

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, visto que, a rigor os aços comerciais não são ligas binárias: de fato, apesar dos seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação. (CHIAVERINI, 2008)

"Aço é uma liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação", que é a mesma definição do autor para "aço-carbono", que ainda pode ser subdividido em "aços de baixo teor de carbono", com C inferior a 0,2%. Esses aços são chamados de hipoeutetóides, pois apresentam carbono abaixo de 0,77%, já que um aço com essa quantidade de carbono é chamado eutetóide. (CHIAVERINI, 2008)

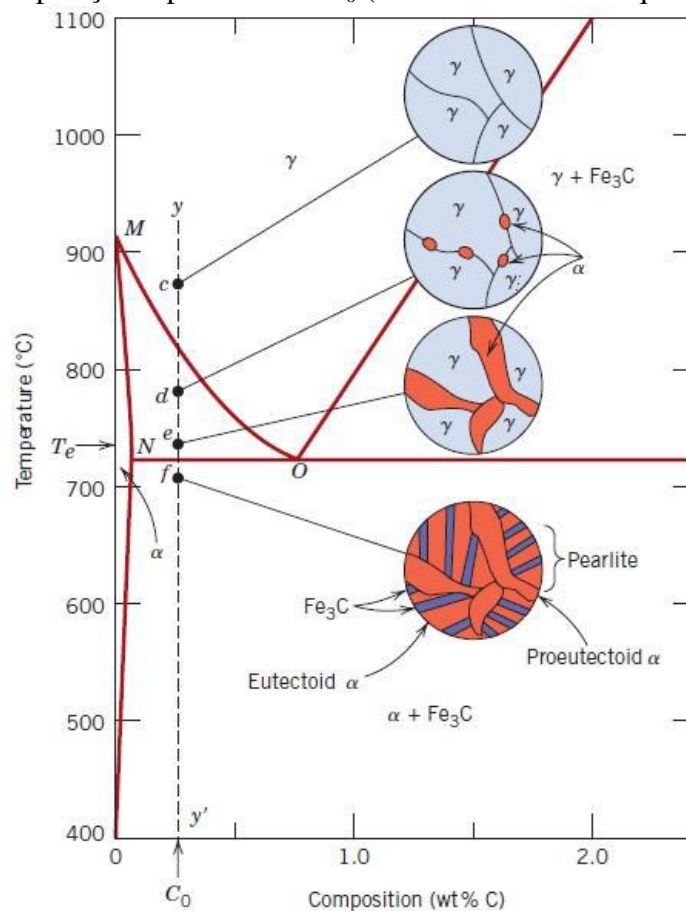
Dada a grande variedade de tipos de aços, foram criados sistemas para sua classificação, em grupos, em base de propriedades comuns, como composição, onde se encontram os aços-carbono. Há ulteriores subdivisões desses grupos, como aços-carbono de baixo, médio e alto teor de carbono. (CHIAVERINI, 2008)

Uma das classificações mais generalizada, e que, inclusive serviu de base para o sistema adotado no Brasil, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, é a que considera a composição química dos aços e, dentre os sistemas conhecidos, são muito usados os da "American Iron and Steel Institute - AISI" e da "Society of Automotive Engineers - SAE". Um exemplo desse sistema é a designação AISI-SAE 10XX, onde as letras XX correspondem às cifras indicadoras dos teores de carbono. Por outro lado, os dois primeiros algarismos diferenciam os vários tipos de aços entre si, pela presença ou somente de carbono como principal elemento de liga (além, é claro, das impurezas normais silício, manganês, fósforo e enxofre), assim, quando os dois primeiros algarismos são 10, os aços são simplesmente ao carbono. Com isso, por exemplo, a classe 1023 significa aço-carbono com 0,23% de carbono em média. (CHIAVERINI, 2008)

É imprescindível para o conhecimento perfeito dos aços, o estudo do seu diagrama de equilíbrio. O diagrama da liga binária de ferro-carbono (Fe-C) é geralmente representado do 0 até 6,7% de carbono, porque este elemento forma com o ferro o composto Fe_3C que contém aproximadamente, 6,7% de carbono. Esse diagrama de equilíbrio é, de fato, um diagrama ferro-carbeto de ferro (Fe- Fe_3C), visto que a extremidade direita do mesmo corresponde a 6,7% de carbono, que é a composição do carboneto de ferro, Fe_3C . (CHIAVERINI, 2008)

Porém, para uma liga hipoeutetóide Fe- Fe_3C , esse diagrama pode ser reduzido para até 2,0% de carbono, como mostra a Figura 1, onde também estão esquematizadas as microestruturas da ferrita, ou ferro α , que possui estrutura cristalina CCC; da perlita, que consiste em camadas alternadas, ou lamelas das duas fases, α e Fe_3C (carbeto de ferro ou cementita); e também da austenita, ou ferro γ , que possui estrutura cristalina CFC, como consequência de uma transformação polimórfica sofrida pela ferrita. (CALLISTER, 2008)

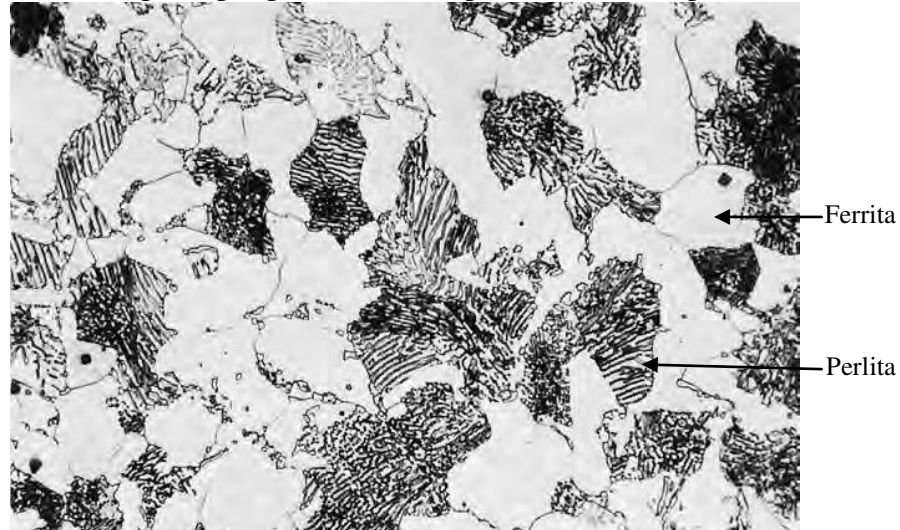
Figura 1 - Representações esquemáticas das microestruturas para uma liga de ferro-carbono com composição hipoeutetóide C_0 (contendo menos do que 0,76%p C).



Fonte: Callister (2008).

A ferrita e a perlita podem ser visualizadas na Figura 2, que é uma fotomicrografia de um aço contendo 0,38%p C; as regiões claras e maiores correspondem a ferrita. Já as regiões que alternam regiões claras (ferrita) e escuras (perlita). (CALLISTER, 2008)

Figura 2 - Fotomicrografia de um aço com 0,38%p C que possui uma microestrutura composta por perlita e ferrita proeutetóide. Ampliação de 635×.



Fonte: Callister (2008).

As quantidades relativas de α e de perlita podem ser determinadas usando a regra da alavanca em conjunto com a linha de amarração que se estende da fronteira entre as fases α - (α + Fe_3C) (0,022%p C, que é a solubilidade máxima de carbono na ferrita) até a composição eutetóide (0,76%p C), uma vez que a perlita é o produto da transformação da austenita que possui essa composição. Por exemplo, vamos considerar uma liga com composição C_0 na Figura 1. Dessa forma, a fração de perlita, W_p , pode ser determinada de acordo com

$$W_p = (C_0 - 0,022) / (0,76 - 0,022) = (C_0 - 0,022) / 0,74 \quad (1).$$

Adicionalmente, a fração de α , W_α , é calculada conforme a seguir:

$$W_\alpha = (0,76 - C_0) / (0,76 - 0,022) = (0,76 - C_0) / 0,74 \quad (2). \text{ (CALLISTER, 2008)}$$

3.2 Ensaio de Tração

3.2.1 Curva Tensão-Deformação de Engenharia

O comportamento mecânico pode ser averiguado através de um simples ensaio tensão-deformação. Tais ensaios são mais comumente realizados para metais à temperatura ambiente. Um dos ensaios mecânicos de tensão-deformação mais comum é conduzido sob tração. O ensaio de tração pode ser usado para averiguar diversas propriedades mecânicas dos materiais que são importantes para projetos. Uma amostra é deformada, geralmente até a fratura, por uma carga de tração que é aumentada gradativamente e que é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo maior do corpo-de-prova (CP). Normalmente, a seção transversal do CP é circular, e deve ser configurada com redução de seção, em comparação com as extremidades, pois assim durante o ensaio, a deformação fica confinada à região central mais estreita (que possui uma seção transversal uniforme ao longo do seu comprimento) e, ainda para reduzir a probabilidade de fratura nas extremidades do CP. O comprimento da seção reduzida deve ser de, pelo menos, quatro vezes o seu diâmetro. O CP é preso pelas suas extremidades nas garras de fixação do dispositivo de testes. A máquina de ensaios de tração é projetada para alongar o CP a uma taxa constante, ao mesmo tempo em que mede contínua e simultaneamente a carga instantânea que está sendo aplicada (com uma célula de carga) e os alongamentos resultantes. Tipicamente, um ensaio de tensão-deformação leva vários minutos para ser realizado e é destrutivo, ou seja, a amostra testada é deformada permanentemente e, frequentemente, fraturada. (CALLISTER, 2008)

O resultado de um ensaio de tração desse tipo é registrado (geralmente em um computador) na forma da carga ou força em função do alongamento. Essas características carga-deformação são dependentes do tamanho do CP. Para minimizar esses fatores geométricos, a carga e o alongamento são normalizados para os seus respectivos parâmetros de tensão de engenharia e deformação de engenharia. A tensão de engenharia, s , é a tensão longitudinal média no CP, e é obtida dividindo-se a carga instantânea, F , pela área inicial da seção reta do CP, A_0 ,

$$s = F/A_0 \quad (3)$$

onde F está em newton (N), A_0 está em (m²). A unidade para a tensão é megapascal, (MPa no SI, onde 1 MPa = 10⁶ N/m²). (CALLISTER, 2008; DIETER, 1961)

A deformação de engenharia, e , é a deformação linear média, que é obtida pela

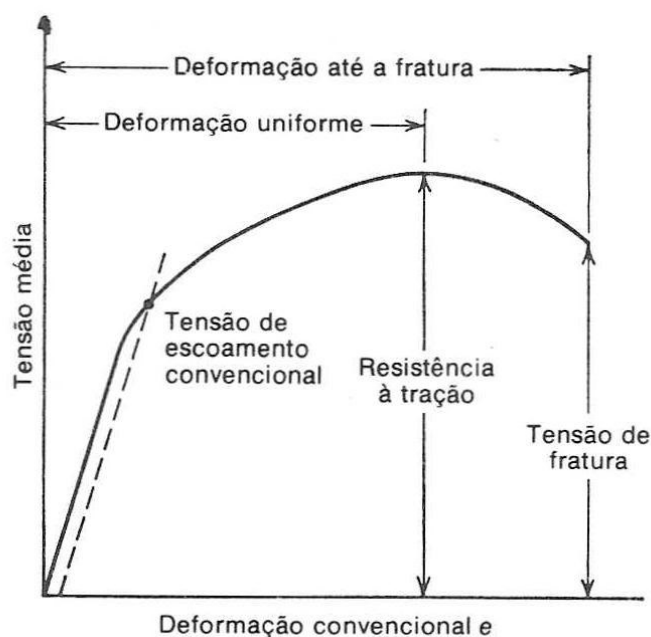
divisão do alongamento do comprimento útil do CP, $l_i - l_0 = \Delta l$, pelo seu comprimento útil original, l_0 , e l_i é o comprimento instantâneo do CP,

$$e = (l_i - l_0) / l_0 = \Delta l / l_0 \quad (4)$$

Algumas vezes, a grandeza Δl representa o alongamento de deformação ou a variação no comprimento em um dado instante, em referência ao comprimento original. A deformação é adimensional, porém metros por metros é usado com frequência, o valor da deformação é, obviamente, independente do sistema de unidades. Ocasionalmente, a deformação também é expressa como uma porcentagem, onde o valor da deformação é multiplicado por 100. (CALLISTER, 2008; DIETER, 1961)

Uma curva de engenharia tensão-deformação é mostrada na Figura 3, onde estão mostrados os pontos significativos, como a tensão limite de escoamento, LE, o limite de resistência à tração, RT, a tensão de fratura, TF, e a deformação, e . (DIETER, 1961)

Figura 3 - Curva tensão-deformação de engenharia.



Fonte: Dieter (1961).

Para a maioria dos materiais metálicos, o regime de deformação elástica, quando a tensão é linearmente proporcional a deformação, persiste apenas até deformações aproximadamente 0,005. Na medida em que o material é deformado além desse ponto, a tensão não é mais proporcional à deformação, e ocorre uma deformação não recuperável, ou deformação plástica. A transição do comportamento plástico é gradual para a maioria dos metais, é onde ocorre o fenômeno do escoamento, e onde há uma curvatura no ponto onde há

o surgimento da deformação plástica, a qual aumenta mais rapidamente com o aumento da tensão. (CALLISTER, 2008)

O Limite de Escoamento, LE, é a tensão necessária para produzir uma pequena quantidade específica de deformação plástica. É determinado pela tensão correspondente à interseção da curva tensão-deformação com uma linha paralela à porção elástica da curva, deslocada de uma deformação específica, como pode ser visto na Figura 3. Na maioria dos países, o deslocamento é normalmente especificado como uma deformação de 0,2 por cento ($\epsilon = 0,002$). (DIETER, 1961)

A Resistência a Tração, RT, ou tensão máxima, é a carga máxima dividida pela área da seção reta transversal inicial do CP,

$$RT = F_{\text{máx}}/A_0 \quad (5). \quad (\text{DIETER, 1961})$$

Toda deformação até esse ponto é uniforme ao longo de toda a região estreita do CP de tração. Contudo, nessa tensão máxima, uma pequena constrição ou estrangulamento começa a se formar em algum ponto, e toda a deformação subsequente fica confinada no estrangulamento. Esse fenômeno é conhecido como "empescoçamento" e a fratura, por fim, ocorre no empescoçamento. A Resistência à Fratura, TF, corresponde à tensão aplicada no momento da fratura. (CALLISTER, 2008)

A RT é o valor mais frequentemente citado dos resultados de um ensaio de tração apesar de, na realidade, ser um valor com muita pouca importância fundamental com relação à resistência do material. Para metais dúcteis a RT deveria ser considerada como uma medida da carga máxima que um metal pode suportar com as condições muito restritas de carregamento uniaxial. É possível mostrar que este valor possui pouca relação com a resistência útil do metal sob condições mais complexas de tensão que são normalmente encontradas. Por muitos anos foi costume basear a resistência de peças na RT, adequadamente reduzida por um fator de segurança. A tendência atual é para uma aproximação mais racional a fim de basear o projeto estático de metais dúcteis no LE. Isso é feito, pois quando a tensão correspondente a RT chega a ser aplicada, com frequência a estrutura já sofreu tanta deformação plástica que se tornou imprestável. Entretanto, devido à longa prática do uso da RT para determinar a resistência dos materiais, ela se tornou uma propriedade muito familiar, e como tal é uma identificação muito útil de um material da mesma maneira que a composição química para identificar um metal ou uma liga. Além do mais, por ser uma propriedade bem reproduzível e de fácil obtenção, ela é útil para fins de especificações e para o controle de qualidade de um produto. Além disso, geralmente as TF, não são especificadas para fins de projetos de engenharia. (CALLISTER, 2008; DIETER, 1961)

A ductilidade é uma propriedade mecânica qualitativa e subjetiva importante de um material. Ela é uma medida do grau de deformação que foi suportado até a fratura. As medidas de ductilidade podem interessar de três maneiras: 1. Para indicar a extensão na qual um metal pode ser deformado sem fraturar em condições de transformação mecânica como a laminação e a extrusão; 2. Para indicar ao projetista, de uma maneira geral, a capacidade do metal escoar plasticamente antes da fratura. Uma alta ductilidade indica que o material é fortemente propenso a se deformar de uma maneira localizada antes de romper; 3. Para servir como um indicador da mudança do nível de impurezas ou condições de processamento. Medidas de ductilidade podem ser especificadas para avaliar a "qualidade" do material ainda que não exista uma relação direta entre as medidas de ductilidade e o desempenho em serviço. (CALLISTER, 2008; DIETER, 1961)

Uma medida convencional de ductilidade que são obtidas do teste de tração sob a deformação de engenharia na fratura, normalmente chamada de Alongamento, pode ser expressa quantitativamente como Alongamento Percentual, %AL, como sendo

$$\%AL = 100 \times (l_f - l_0) / l_0 \quad (6)$$

onde l_f é o comprimento do CP no momento da fratura, medido após a fratura e após as duas extremidades quebradas terem sido colocadas juntas novamente. (CALLISTER, 2008; DIETER, 1961)

A forma e a magnitude de uma curva tensão-deformação de um metal dependerão de sua composição, tratamento térmico, histórico anterior da deformação plástica e da taxa de deformação, temperatura e estado de tensões impostas durante o teste. Os parâmetros que são usados para descrever a curva tensão-deformação de um metal são: resistência à tração, RT, tensão limite de escoamento, LE, e o alongamento percentual, %AL. Os dois primeiros são parâmetros de resistência, e o último é uma indicação da ductilidade. (DIETER, 1961)

A forma geral da curva tensão-deformação de engenharia, Figura 3, requer maiores explicações. Na região elástica a tensão é linearmente proporcional à deformação. Quando a carga ultrapassa o valor correspondente ao LE, o CP sofre deformação plástica generalizada. (DIETER, 1961)

De uma perspectiva atômica, a deformação plástica corresponde à quebra de ligações com os átomos vizinhos originais, seguida pela formação de novas ligações com novos átomos vizinhos, na medida em que um grande número de átomos ou moléculas se movem uns em relação aos outros, e com a remoção da tensão, eles não retornam às suas posições originais. Para os sólidos cristalinos, a deformação ocorre por meio de um processo chamado escoamento, o qual envolve o movimento de discordâncias. O mecanismo de

aumento de resistência pelo movimento de discordâncias, quando deformado plasticamente, chama-se encruamento. (CALLISTER, 2008)

A partir do LE o CP está permanentemente deformado se a carga é reduzida a zero. A tensão para produzir cada vez mais deformação plástica cresce com o aumento desta última, isto é, o material encrua. O volume do corpo de prova permanece constante durante a deformação plástica, $Al = A_0l_0$, e conforme se alonga, a área da seção reta transversal decresce uniformemente ao longo do comprimento útil do CP. Inicialmente o encruamento compensa a diminuição da área da seção reta transversal e a tensão de engenharia (proporcional à carga F) continua a aumentar com o aumento da deformação. Eventualmente, atinge-se um ponto onde a diminuição da área da seção reta do CP é maior que o aumento da carga de deformação proveniente do encruamento. Essa condição será atingida primeiramente em algum ponto do CP que é ligeiramente mais fraco que o resto. Toda deformação plástica posterior será concentrada nessa região, onde o CP começará a formar um pescoço e a se afinar localmente - empescoçamento. Devido ao fato da área da seção reta diminuir agora mais rapidamente do que o aumento da carga de deformação pelo encruamento, a carga necessária para deformar o CP diminuirá e a tensão de engenharia dada pela Equação 3 igualmente continuará a cair até se atingir a fratura. (CALLISTER, 2008; DIETER, 1961)

3.2.2 Curva Tensão Verdadeira - Deformação Verdadeira

A curva tensão-deformação de engenharia não dá uma indicação verdadeira das características de deformação de um metal porque ela é inteiramente baseada nas dimensões originais do CP, e essas dimensões mudam continuamente durante o ensaio. Também um metal dúctil que é tracionado se torna instável e forma um pescoço no decorrer do teste. Como a área da seção reta transversal do CP está diminuindo rapidamente nesse estágio do ensaio, a carga necessária para continuar a deformação também diminui. Do mesmo modo, a tensão média baseada na área original decresce, e isso produz a queda na curva tensão-deformação após o ponto de carga máxima. Na realidade, o metal continua a encruar até a fratura, de maneira que a tensão necessária para produzir deformações adicionais deveria crescer mesmo depois da formação do pescoço. Se a Tensão Verdadeira, baseada na área real da seção reta transversal da amostra, é utilizada, verifica-se que a curva tensão-deformação aumenta continuamente até a fratura. Se o cálculo da deformação é baseado em medidas instantâneas, a curva que é obtida é conhecida como Curva Tensão Verdadeira - Deformação Verdadeira. Ela também é conhecida como Curva de Escoamento, uma vez que representa as características

básicas do escoamento plástico do material. Qualquer ponto da curva de escoamento pode ser considerado como tensão de escoamento para um metal deformado em tração pela quantidade mostrada na curva. Assim, se a carga fosse removida nesse ponto e então reaplicada, o material iria se comportar elasticamente até atingir a tensão de escoamento. (DIETER, 1961)

A tensão verdadeira, σ , é expressa em termos de tensão de engenharia, s , por

$$\sigma = s(e + 1) \quad (7).$$

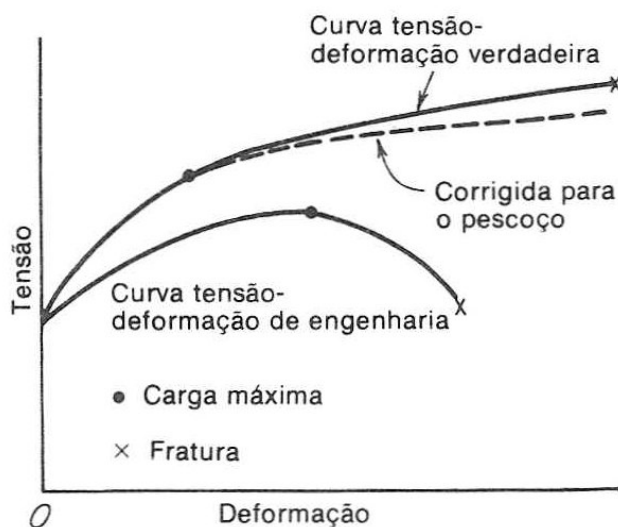
Porém essa equação só é válida somente até a ocorrência do empescoamento, pois admite que o volume seja constante e que a distribuição de deformação seja uniforme ao longo do comprimento útil do CP. (DIETER, 1961)

A deformação verdadeira, ε pode ser calculada a partir da deformação de engenharia ou convencional, e , por

$$\varepsilon = \ln(e + 1) \quad (8).$$

Essa equação é aplicável somente até o empescoamento pelas mesmas razões discutidas acima. (DIETER, 1961)

Figura 4 - Comparação das curvas tensão-deformação de engenharia e tensão verdadeira-deformação verdadeira.



Fonte: Dieter (1961)

A Figura 4 compara a curva tensão verdadeira-deformação verdadeira com a sua correspondente curva tensão-deformação de engenharia. A região elástica foi comprimida no eixo dos y devido à região de deformação plástica ser relativamente muito maior. De acordo com as Equações 7 e 8, a curva tensão verdadeira-deformação verdadeira está sempre à esquerda da curva de engenharia até a carga máxima seja atingida. Entretanto, além da carga máxima, há a introdução de um estado de tensões complexo na região do empescoamento

(i.e., a existência de outros componentes de tensão além da tensão axial). Como consequência disso, a tensão correta (axial) no empescoçamento é ligeiramente menor do que a tensão calculada a partir da carga aplicada e da área da seção transversal do empescoçamento. Isso leva à curva "corrigida" mostrada na Figura 4. (CALLISTER, 2008; DIETER, 1961)

Para alguns metais e ligas, a região da curva tensão-deformação verdadeira, de deformação plástica uniforme, pode ser aproximada pela equação de Ludwik-Hollomon - lei do expoente de encruamento

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (9)$$

onde n é o Expoente de Encruamento ou parâmetro do encruamento e K é o Coeficiente de Resistência. São constantes, e os valores vão variar de uma liga para outra e também dependerão da condição do material (i.e., se ele foi deformado plasticamente, tratado termicamente etc.). O expoente de encruamento é adimensional e possui um valor inferior à unidade, ele é uma medida da habilidade de um metal encruar; quanto maior for sua magnitude, maior será o encruamento para uma dada quantidade de deformação plástica. Já o coeficiente de resistência é uma tensão verdadeira, calculada na região desde o início da deformação plástica uniforme. Para um aço baixo carbono recozido tem-se um n igual a 0,21 e um K igual a 600 MPa. (CALLISTER, 2008; DIETER, 1961)

3.2.3 Propriedades de Tração de um Aço Baixo Carbono

As propriedades mecânicas dos aços estão diretamente relacionadas às dos seus microconstituintes, podendo-se prever as propriedades de qualquer tipo de aço-carbono resfriado normalmente, desde que se conheça a sua estrutura e admitindo ainda que essas propriedades dependam somente das quantidades relativas (proporção) dos diversos constituintes. Assim, ferro comercialmente puro, constituído só de ferrita, apresenta-se dúctil e pouco resistente à tração; à medida que o teor de carbono cresce, aumentam os valores representativos da resistência mecânica, isto é, o limite de escoamento, LE, e o limite de resistência à tração, RT, ao passo que caem os valores relativos à ductilidade, como alongamento, %AL. (CHIAVERINI, 2008)

No estado recozido, isto é, esfriados lentamente, tem-se na literatura, para um aço com 0,20% de carbono, valores de LE, RT e %AL em 2" iguais a 250 MPa, 405 MPa e 37%, respectivamente. (CHIAVERINI, 2008)

Porém o trabalho a frio, deformação plástica que ocorre abaixo da temperatura na qual a recristalização está completa após uma hora, que impõe ao metal um estado encruado,

característico de alguns dos mais importantes produtos siderúrgicos, como fios, fitas e chapas, provocam um efeito de aumento de resistência mecânica e diminuição da ductilidade, representada por um decréscimo de alongamento. A Tabela 1 nos mostra o efeito do encruamento obtido por laminação a frio sobre as propriedades mecânicas de tração de um aço com 0,14% de carbono. (CHIAVERINI, 2008)

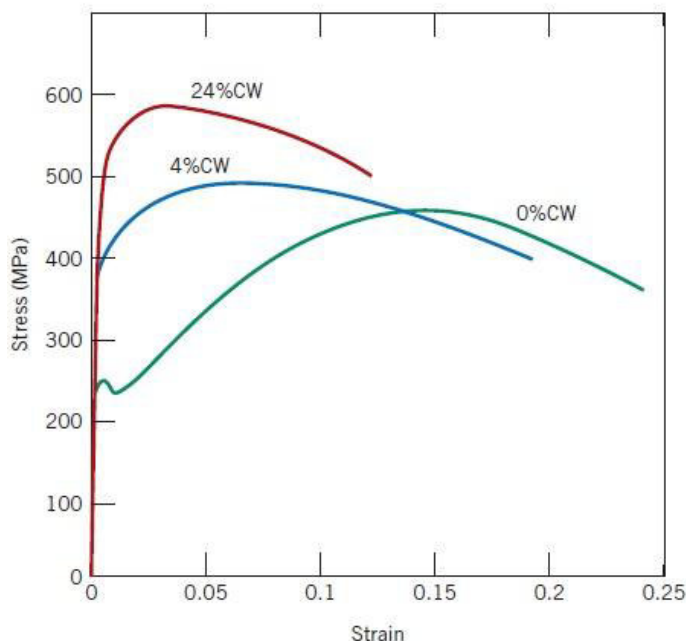
Tabela 1 - Efeito do encruamento sobre as propriedades de tração de um aço baixo carbono.

Propriedade	Estado Recozido	Encruado com 30% de redução	Encruado com 60% de redução
LE (MPa)	240	515	665
RT (MPa)	400	555	675
% AL em 4"	41,7	22,0	10,5

Fonte: CHIAVERINI

Durante a deformação plástica, o número de discordâncias aumenta drasticamente. A densidade de discordâncias em um metal que foi altamente deformado é muito elevada. Uma fonte importante dessas novas discordâncias são as discordâncias existentes, que se multiplicam; além disso, os contornos de grão, assim como os defeitos internos e irregularidades da superfície, os quais atuam como concentrações de tensões, podem servir como sítios para formação de novas discordâncias durante a deformação. Consequentemente, a distância média de separação entre as discordâncias diminui, as discordâncias ficam posicionadas mais próximas umas das outras, formando um emaranhado de discordâncias. Na média, as interações discordâncias-deformações das discordâncias são repulsivas. O resultado global é tal que o movimento de uma discordância é dificultado pela presença de outras discordâncias. Na medida em que a densidade das discordâncias aumenta, essa resistência ao movimento das discordâncias causado por outras discordâncias se torna mais pronunciada. Dessa forma, a tensão imposta, necessária para deformar um metal, aumenta com o aumento do trabalho a frio, - convenientemente expressa como uma Porcentagem de Trabalho a Frio (%TF). A influência do trabalho a frio sobre o comportamento tensão-deformação de um aço baixo carbono está mostrada na Figura 5 a seguir, onde %CW é igual %TF em língua inglesa. (CALLISTER, 2008)

Figura 5 - A influência do trabalho a frio sobre o comportamento tensão-deformação de um aço baixo teor de carbono.



Fonte: Callister (2008)

3.3 Ensaio de Tração à Temperatura Elevada

Temperatura elevada, ou alta temperatura, nesse trabalho vai ser considerada uma temperatura maior que 35°C, temperaturas maiores que a temperatura ambiente especificada na norma ABNT NBR ISO 6892-1, na qual algum dos valores de propriedades mecânicas de Limite de Escoamento, Resistência a Tração e de Alongamento será diferente dos encontrados na temperatura ambiente. Podendo assim ser iniciado fenômenos de recuperação, recristalização, crescimento de grão e/ou um tratamento térmico, normalmente de recozimento. Porém como o foco está na realização do ensaio de tração, em diversas condições, os possíveis fenômenos citados podem não chegar a serem iniciados e/ou finalizados. Este trabalho não foca diretamente nos estudos desses fenômenos.

A segunda parte da Norma ABNT NBR ISO 6892, complementa a primeira na descrição dos dois métodos de velocidade de ensaio. O primeiro, o Método A, é baseado em taxas de deformação (incluindo a taxa de separação do travessão) com tolerâncias apertadas ($\pm 20\%$), ao passo que o segundo, o Método B, é baseado em faixas e tolerâncias de taxa de deformação. O Método A tem por objetivo minimizar a variação das taxas de ensaio no momento em que são determinados os parâmetros sensíveis à taxa de deformação e, também, minimizar a incerteza de medição dos resultados dos ensaios. (ABNT NBR ISO 6892-2:2013)

A influência da velocidade de ensaio nas propriedades mecânicas, determinadas

pelo ensaio de tração, é normalmente maior em uma temperatura elevada que à temperatura ambiente. Tradicionalmente, as propriedades mecânicas determinadas por ensaios de tração em temperaturas elevadas têm sido determinadas a uma taxa de deformação ou tensão menor do que a temperatura ambiente. Nessa parte da norma recomenda-se o uso de taxas de deformação pequenas, mas, além disso, são permitidas taxas de deformação maiores para aplicações específicas, como comparação com propriedades à temperatura ambiente na mesma taxa de deformação. (ABNT NBR ISO 6892-2:2013)

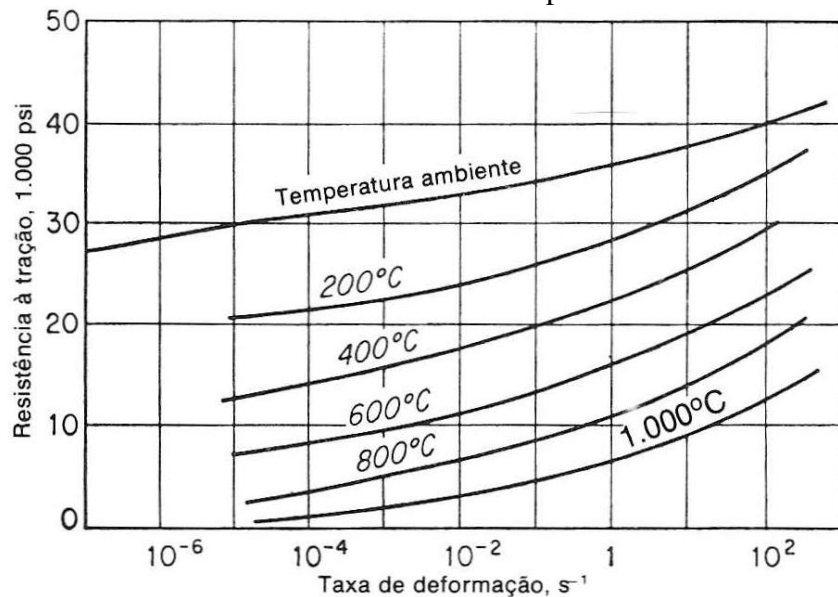
Enquanto a técnica do ensaio, o mesmo é realizado em máquinas que contenham um dispositivo especial para nele ser acoplado um forno. Os fornos acoplados nas máquinas de tração mais comuns produzem aquecimento por meio de radiação ou por resistência elétrica. O equipamento para ensaios em altas temperaturas deve ser constituído de materiais capazes de suportar as tensões aplicadas, sem se deformarem. O CP fica dentro do forno na temperatura desejada, que deve ser uniforme em todo o CP. Os CPs devem ser isolados do meio ambiente, e a medição da temperatura é feita por meio de pares termoeletrônicos, colocados ao longo do CP em posições igualmente espaçadas, para se conhecer a uniformidade da temperatura. O CP é tracionado da mesma maneira que no ensaio a temperatura ambiente. (SOUZA, 1982)

3.4 Taxa de Deformação

A velocidade de deformação que é aplicada num CP pode ter influência importante na tensão de escoamento. O aumento da taxa de deformação normalmente provoca um aumento na tensão de escoamento. A taxa de deformação é definida como $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$, e é convencionalmente expressa em unidades de "por segundo". Para as condições de testes de tração estática, só uma velocidade de ensaio, com máquinas hidráulicas ou de transmissão mecânica, o intervalo das taxas de deformação é de 10^{-5} a 10^{-1} s^{-1} . (DIETER, 1961; HOSFORD, 2007)

A Figura 6 mostra que o aumento da taxa de deformação aumenta a resistência à tração. Além disso, a dependência da resistência à tração com a taxa de deformação aumenta com o aumento da temperatura. Para pequenas deformações, a tensão limite de escoamento e a tensão de escoamento são mais dependentes da taxa de deformação do que da resistência à tração. Grandes taxas de deformação causam o aparecimento do limite de escoamento descontínuo em aços de baixo carbono que não é detectado para taxas de deformações usuais. (DIETER, 1961)

Figura 6 - Efeito da taxa de deformação na resistência à tração do cobre testado a várias temperaturas.



Fonte: Dieter (1961)

Nadai apresentou uma análise matemática das condições existentes durante a deformação em tração de um CP cilíndrico com um dos extremos fixo e o outro ligado ao travessão móvel de uma máquina de teste. A velocidade do travessão é $v = dl/dt$. A taxa de deformação expressa em termos da deformação linear convencional é

$$\dot{\epsilon} = v/l_0 \quad (10).$$

Então, a taxa de deformação convencional é proporcional à velocidade do travessão. Nas máquinas de teste modernas, nas quais a velocidade de deformação pode ser escolhida e controlada com precisão, podem-se realizar de maneira simples ensaios de tração convencionais com taxa de deformação constante. (DIETER, 1961)

A taxa de deformação verdadeira é dada por

$$\dot{\epsilon} = v/l \quad (11).$$

Essa equação indica que para uma velocidade constante do travessão a taxa de deformação verdadeira deve decrescer em proporção ao aumento no comprimento do CP. (DIETER, 1961)

O efeito da taxa de deformação a deformação constante pode ser aproximado por

$$\sigma = C \dot{\epsilon}^m \quad (12)$$

onde C é uma constante de resistência que depende da deformação, da temperatura, e do material, e m é a sensibilidade à taxa de deformação da tensão de escoamento. Para a maioria dos metais na temperatura ambiente, a magnitude de m é bastante baixa (entre 0 e 0,03). A razão das tensões de escoamento σ_2 e σ_1 , em duas taxas de deformação, $\dot{\epsilon}_2$ e $\dot{\epsilon}_1$, é

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right)^m \quad (13).$$

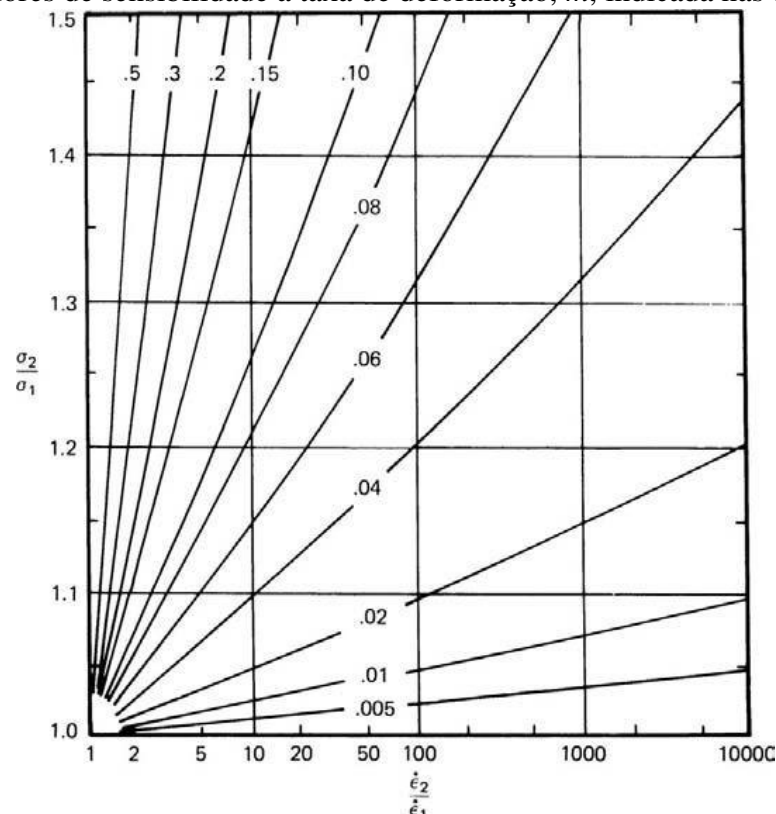
Tomando os logaritmos de ambos os lados, $\ln(\sigma_2/\sigma_1) = m \ln(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)$. Quando, como é provável a baixas temperaturas, σ_2 não é muito maior do que σ_1 , a Equação 13 pode ser simplificada para

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} \cong m \ln \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} = 2,3m \log \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \quad (14).$$

Por exemplo, se $m = 0,01$, aumentando a taxa de deformação por um fator de 10 iria aumentar a tensão de escoamento por apenas $0,01 \times 2,3 \cong 2\%$. Esse é o porquê dos efeitos da taxa muitas vezes serem ignorados. (HOSFORD, 2007)

No entanto, o efeito da taxa pode ser importante, em alguns casos. Por exemplo, caso se deseje prever a formação de cargas na trefilação de arames ou laminação de chapas (um processo no qual as taxas de deformação podem ser tão altas como $10^4/s$) a partir de dados obtidos num teste de tensão de laboratório, em que as taxas de deformação podem ser tão baixas quanto $10^{-3}/s$, a tensão de escoamento deve ser corrigida a menos que m seja muito pequeno. Razões de (σ_2/σ_1) calculados a partir da Equação 13 para vários valores de $(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)$ e m estão apresentados na Figura 7. (HOSFORD, 2007)

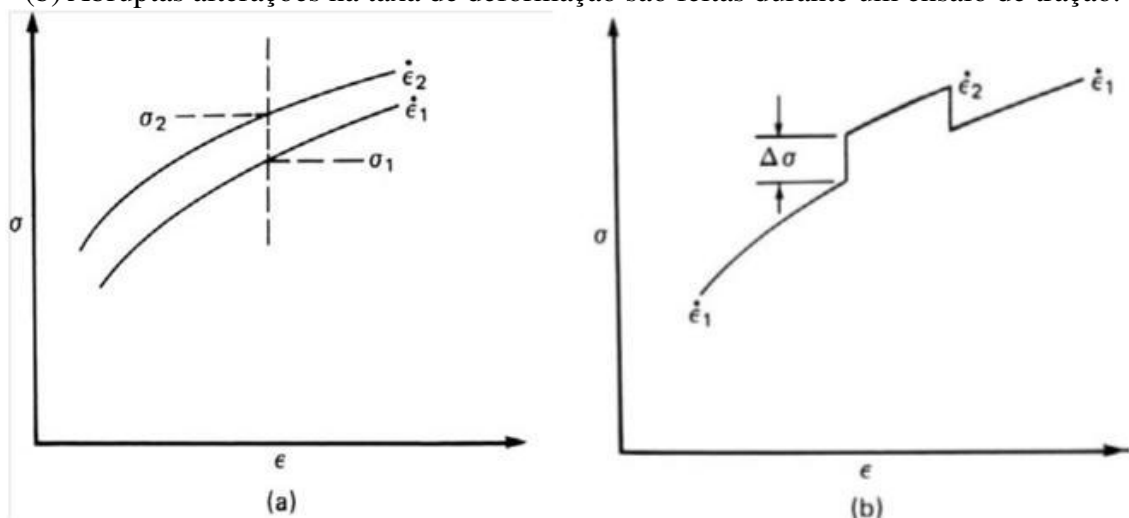
Figura 7 - A influência da taxa de deformação na tensão de escoamento para vários valores de sensibilidade à taxa de deformação, m , indicada nas curvas.



Fonte: Hosford, (2007)

Existem dois métodos comumente utilizados para medir m . Estes estão ilustrados na Figura 8. Um é o de comparar valores de tensão, a uma deformação fixa em ensaios de tração feitos em diferentes taxas de deformação usando a Equação 13. Este está mostrado na Figura 8 a), onde $m = \ln(\sigma_2/\sigma_1) / \ln(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)$. O outro é fazer mudanças bruscas de velocidade de deformação durante um ensaio de tração e usar o valor correspondente de $\Delta\sigma$ na Equação 14. Este está mostrado na Figura 8 b), onde $m = (\Delta\sigma/\sigma) / \ln(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)$. Aumentar as taxas de deformação causa um encruamento ligeiramente maior, de modo que o uso de curvas tensão-deformação contínuas produz ligeiramente maiores valores de m do que o segundo método, que compara as tensões de escoamento para a mesma estrutura. O segundo método tem a vantagem de que várias mudanças de taxa de deformação podem ser feitas em um único corpo-de-prova, enquanto contínuas curvas tensão-deformação exigem amostras distintas, independentes, para cada taxa de deformação. (HOSFORD, 2007)

Figura 8 - Dois métodos de determinação m . a) Duas contínuas curvas tensão-deformação em diferentes taxas de deformação são comparadas na mesma deformação. (b) Abruptas alterações na taxa de deformação são feitas durante um ensaio de tração.



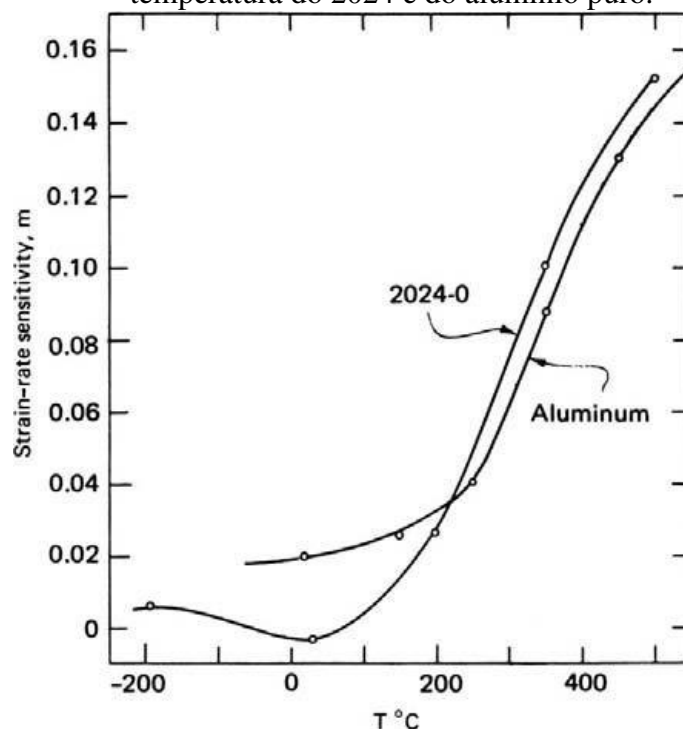
Fonte: Hosford (2007)

A sensibilidade à taxa de deformação de um material depende da temperatura. Em temperaturas de trabalho a quente, m normalmente sobe para 0,10 ou 0,20, tornando os efeitos da taxa muito maior do que em temperatura ambiente. Sob certas circunstâncias, valores de m de 0,5 ou superiores têm sido observados em vários metais. (HOSFORD, 2007)

Dados mais detalhados para ligas de alumínio são apresentados na Figura 9. Apesar da definição de m nesta figura está baseada em dados de taxa de tensão-deformação de cisalhamento, ela é equivalente para a definição derivada a partir da Equação 12. Para as ligas de alumínio e de muitos outros metais, existe um mínimo em m próximo da temperatura

ambiente e, como indicado, valores negativos de m às vezes são encontrados. Em baixas taxas de deformação, solutos segregam para as discordâncias; isso diminui sua energia de modo que as forças necessárias para mover as discordâncias são maiores do que aquelas exigidas para discordâncias livres em soluto. Em taxas de deformação elevadas ou temperaturas mais baixas, no entanto, discordâncias se movem mais rápido do que os átomos de soluto podem se difundir, por isso, discordâncias estão relativamente livres de solutos e o arrasto é minimizado. A sensibilidade à taxa negativa tende a localizar o escoamento em uma estreita região que se propaga ao longo de um corpo-de-prova de tração como uma banda de Lüders. A localização do escoamento em uma faixa estreita ocorre porque isso permite que o material deformando experimente uma taxa de deformação mais elevada e, portanto, uma tensão de escoamento inferior. (HOSFORD, 2007)

Figura 9 - Sensibilidade à taxa de deformação dependendo da temperatura do 2024 e do alumínio puro.



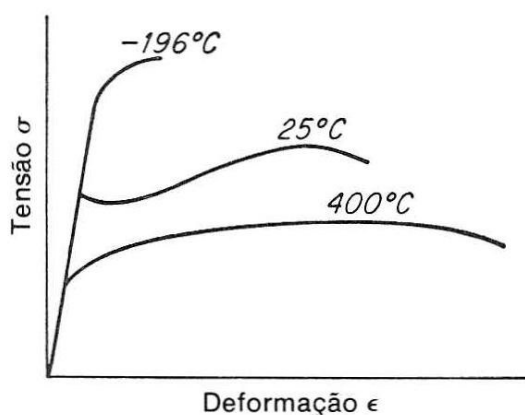
Fonte: Hosford (2007)

Os maiores valores de sensibilidade à taxa em temperaturas elevadas são atribuídos ao aumento da taxa de processos ativados termicamente, tais como emaranhado de discordâncias e deslizamento dos contornos de grão. (HOSFORD, 2007)

3.5 Efeito da Temperatura nas Propriedades de Escoamento

A curva tensão-deformação e as propriedades de escoamento e fratura derivadas do teste de tração são fortemente dependentes da temperatura em que se realiza o teste. A região plástica dos metais se deve principalmente à movimentação das discordâncias no interior da estrutura cristalina, conforme já foi mencionado, e à movimentação dos contornos de grão. Com a elevação da temperatura, essas movimentações se tornam mais intensas, devido a maior facilidade das discordâncias em ultrapassar os obstáculos que a eles se interpõem, diminuindo assim a capacidade de encruamento do metal e aumentando o tamanho da zona plástica. Assim em geral, a resistência e o módulo de elasticidade do metal ou liga diminuem e a ductilidade aumenta quando a temperatura do ensaio sobe acima da ambiente. Isso é obedecido, porém, caso esse aumento de temperatura não provoque nenhuma mudança estrutural na liga metálica. A curva tensão-deformação se achata, provando assim que o coeficiente n de encruamento diminui em altas temperaturas. Entretanto, mudanças estruturais tais como a precipitação, envelhecimento por deformação ou recristalização pode ocorrer em certas faixas de temperatura, alterando esse comportamento geral. Processos termicamente ativados favorecem a deformação e reduzem a resistência em temperaturas elevadas. (SOUZA, 1982; DIETER, 1961)

Figura 10 - Mudanças das curvas tensão-deformação de engenharia de aço doce com a temperatura.

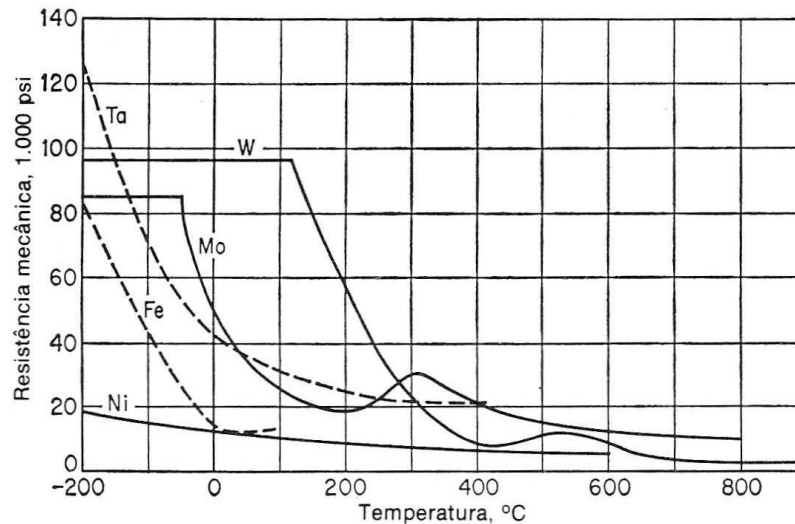


Fonte: Dieter (1961)

A mudança com a temperatura da curva de engenharia tensão-deformação do aço doce está apresentada esquematicamente na Figura 10. A Figura 11 mostra a variação de tensão de escoamento com a temperatura para os metais CCC: tântalo, tungstênio, molibdênio, ferro e, para o metal CFC, níquel. Nota-se que para os metais CCC a tensão de escoamento aumenta rapidamente com a diminuição da temperatura, enquanto que para o

níquel (e outros metais CFC) a tensão de escoamento é apenas ligeiramente dependente da temperatura. (DIETER, 1961)

Figura 11 - Efeito da Temperatura na tensão limite de escoamento dos metais CCC Ta, W, Mo, Fe, e o metal CFC Ni.



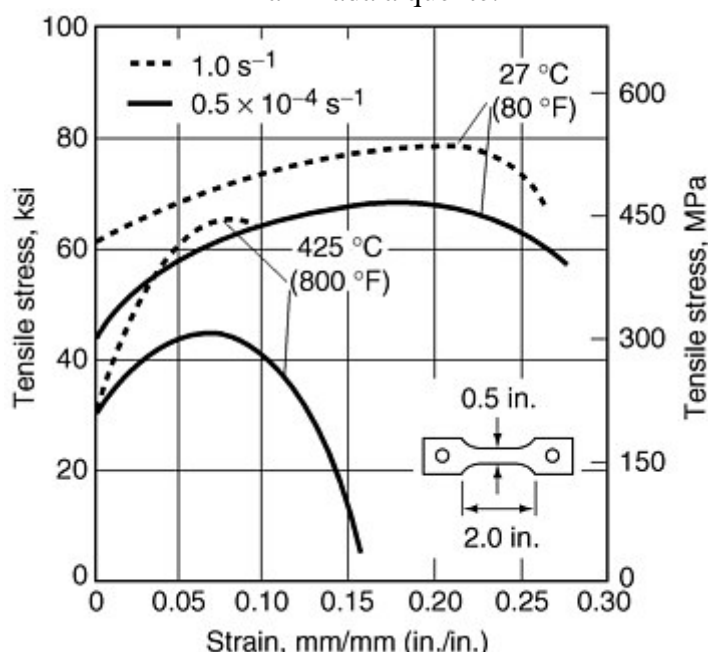
Fonte: Dieter (1961)

Nos metais CFC, a tensão de escoamento não é fortemente dependente da temperatura, mas o expoente do encruamento, n , diminui com o aumento da temperatura. Isso acarreta um achatamento na curva tensão-deformação com o aumento da temperatura, e a resistência à tração se torna mais dependente da temperatura do que a tensão limite de escoamento. O valor da tensão de escoamento depende da subestrutura de discordâncias existentes no momento em que essa tensão é medida. A subestrutura de discordâncias mudará com a temperatura, taxa de deformação, e com a própria deformação. (DIETER, 1961)

3.6 Efeito Combinado da Temperatura e da Taxa de Deformação

Ensaio de tração efetuados a altas temperaturas - porém abaixo da temperatura de recristalização do metal - , como mostrado na Figura 12, são mais intensamente influenciados pela velocidade de deformação do que ensaios em temperatura ambiente. Principalmente nos metais CFC, quando maior for a velocidade de deformação, mais a parte plástica da curva tensão-deformação será deslocada para a esquerda, isto é, mais será a sua inclinação com relação ao eixo das deformações. Esse efeito é, portanto, o oposto do efeito causado pela temperatura nos ensaios de tração com velocidade de deformação normal. (SOUZA, 1982)

Figura 12 - Efeito da alta ($1,0 \text{ s}^{-1}$) e baixa ($0,05 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) taxa de deformação e temperatura na curva tensão-deformação de uma chapa de aço carbono 1020 laminada a quente.



Fonte: ASM Handbook Vol. 8 - Mechanical Testing and Evaluation (2000)

O efeito combinado da temperatura e da taxa de deformação pode ser representado por uma Equação Mecânica de Estado, isto é, que a tensão de escoamento dependia apenas do valor instantâneo da deformação, taxa de deformação e temperatura. Enquanto existem inúmeras pesquisas publicadas nas quais o material segue uma equação mecânica de estado, existem muitas outras nas quais a tensão de escoamento depende de condições prévias de temperatura e taxa de deformação bem como seus valores instantâneos. Uma vez que as propriedades fundamentais do escoamento dependem da estrutura de discordâncias que, por sua vez, dependem fortemente da temperatura e das taxas de deformação prévias, não é surpresa que as propriedades de escoamento de um metal como as normalmente determinadas num teste de tração não sigam geralmente uma equação mecânica de estado. Porém, Hart mostrou teoricamente como a tensão de escoamento para uma estrutura constante pode ser determinada como uma função da taxa de deformação e da temperatura, a partir de testes de relaxação de tensões. Nessas experiências o CP é primeiro deformado rapidamente em tração até um nível de deformação plástica desejável. O braço de deformação da máquina é então mantido fixo e a relaxação de tensões resulta da conversão de deformação elástica do CP em deformação plástica. Os dados da relaxação da tensão com o tempo produzem relações da tensão com a taxa de deformação para vários valores da deformação plástica. Li mostrou como as relações tensão-deformação obtidas dessa maneira

numa variedade de metais CCC e CFC seguem a lei de uma equação mecânica. (DIETER, 1961)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Material

O material a ser estudado no presente trabalho foi adquirido como uma barra cilíndrica trefilada de 3/4" de diâmetro de aço AISI 1020. A escolha desse aço se dá pelo fato deste ser um aço baixo carbono, estes são a base para os diversos tipos de aços usados industrialmente, pois possuem interstícios livres para serem ocupados pelos elementos de liga.

Para verificar sua microestrutura, foram preparadas amostras para um estudo metalográfico no Laboratório de Caracterização de Materiais - LACAM, a fim de se obter mais informações sobre esse material, como por exemplo, a confirmação da deformação a frio. Para isso foram serradas, da barra original, uma amostra da seção transversal e outra da seção longitudinal. A seguir essas amostras foram embutidas na mesma baquelite, para facilitar os processos seguintes de lixamento e polimento. As lixas sequencialmente utilizadas foram as de granulometria 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. O polimento foi feito em pano usando como abrasivo suspensão de alumina de granulometria igual a 2 µm (micrometros). Procedeu-se com o ataque por imersão em Nital de concentração de 2%, por dois segundos. Seguiu-se para análise micrográfica em microscópio óptico, obtendo-se as imagens que serão apresentadas posteriormente.

Outra informação que podemos obter por esse método é a quantificação da concentração aproximada de carbono no aço. Se avaliarmos através de microscopia seu teor (percentagem de área) de ferrita e perlita, podemos estimar seu teor de carbono utilizando a Equação 1, desconsiderando os valores muito pequenos, como

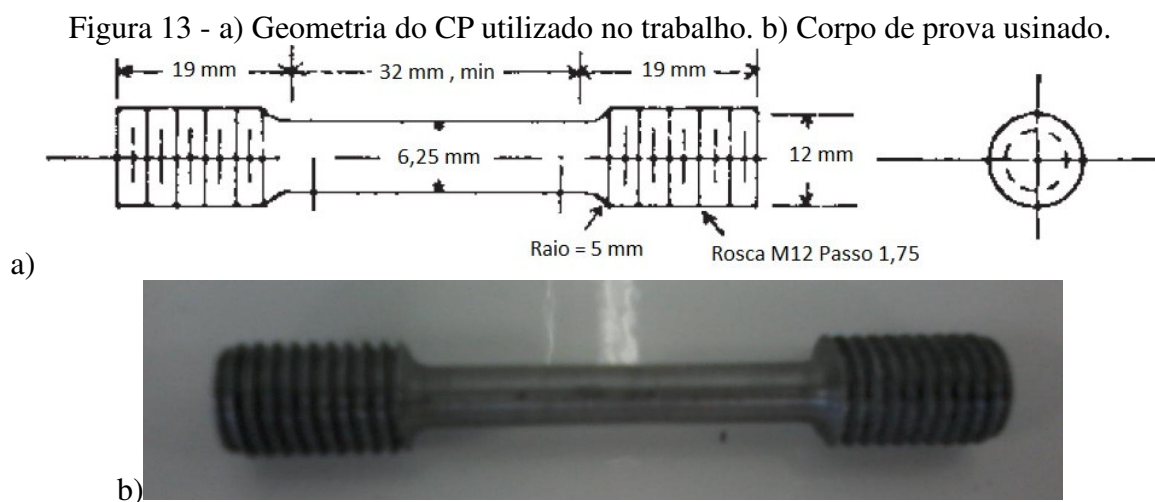
$$\%C = (\%Perlita \times 0,77) / 100 \quad (15). \text{ (SILVA, 1988)}$$

Mas para isso se faz necessário a utilização de softwares de processamento de imagem, para obter imagens somente em preto e branco, sem escalas de cinza; onde o preto seria os contornos de grão e a perlita, onde está praticamente todo o carbono; e o branco da imagem seria a ferrita; e a percentagem em área da parte escura e da clara nas fotos.

Foram tiradas quatro micrografias do aço analisado, duas para a amostra longitudinal, nas ampliações de 500× e 1000×, e duas para a transversal, também nas mesmas ampliações.

4.2 Ensaios de Tração

Este trabalho visa estudar a influência da velocidade de deformação associada à temperatura em aço AISI 1020. A base desse estudo será o ensaio de tração, realizado em CPs de seção circular, usinados a partir da barra trefilada de aço 1020. A escolha dessa geometria se deve pelo fato das hastes de fixação dos CPs, que são utilizadas para ensaios em temperaturas elevadas, no Laboratório de Ensaios Mecânicos - LEM, possuírem fixação rosqueada métrica M12, assim a geometria dos CPs utilizados nesse trabalho estão conformes à norma ASTM A 370-03a, seguindo a sugestão dos tipos de extremidades para CP padrão reduzido de ensaio de tração, fazendo-se algumas modificações chegou-se a Figura 13 a seguir.



Fonte: a) ASTM A 370 modificado. b) Próprio autor.

A máquina de ensaio utilizada foi uma Emic com as seguintes características técnicas relevantes ao trabalho:

- Capacidade: de 10000 kgf tração ou compressão.
- Faixas de velocidade: 0,02 a 500 mm/min.
- Transdutores de medição de deslocamento: embutido na máquina.

Um forno resistivo está acoplado a esta máquina como pode ser visto na Figura 14, onde também podemos observar as hastes de fixação do CP, a superior é fixada na célula de carga da máquina, já a inferior é fixada na base da máquina.

Figura 14 - Forno acoplado, hastes de fixação e um CP fixado.



Fonte: Próprio autor.

A célula de carga está fixada no travessão, este se move com a velocidade preestabelecida, como sendo a velocidade do ensaio.

Para avaliar as propriedades mecânicas do aço 1020 sob tração, foram selecionadas três velocidades de ensaio, múltiplas de cinco, que são: 0,5 mm/min; 2,5 mm/min; 12,5 mm/min. Desse modo já é possível avaliar a influência da velocidade de ensaio nas propriedades a tração, como na seção 3.4 desse trabalho.

É necessário informar a máquina a velocidade do ensaio, o diâmetro do CP e o comprimento útil do mesmo.

E ainda foram escolhidas cinco temperaturas de ensaio, que são: temperatura ambiente, 300°C, 500°C, 700°C e 900°C, avaliando a influência da temperatura sobre as propriedades a tração, como na seção 3.5 desse trabalho. Para cada uma das temperaturas escolhidas serão feitos três ensaios, um para cada velocidade de ensaio, procurando assim avaliar a influência da velocidade de deformação e da temperatura nas propriedades a tração, como na seção 3.6 desse trabalho. Portanto serão necessários no mínimo 15 CPs, um para cada condição temperatura-velocidade de deformação.

O forno é regido pelo seu controlador que mostra a temperatura interna próxima ao CP. De acordo com a norma ABNT após a temperatura chegar à de ensaio, é necessário

esperar no mínimo dez minutos para iniciar o ensaio. A dilatação do CP pode ser verificada em tempo real no computador através da diminuição da carga, e pode-se controlá-la até um determinado momento, sempre corrigindo o comprimento útil do CP, dado fornecido à máquina para proceder aos cálculos de deformação.

Com isso serão feitos ao todo quinze ensaios onde a máquina nos fornece como resultados a deformação em mm; e a força em Newton (N), para cada instante do ensaio.

Trabalhando esses valores iniciais num software de planilhas eletrônicas, podemos plotar as curvas tensão-deformação de engenharia, usando para isso as Equações 3 e 4, sendo que para esta última, chamaremos de deformação específica, e multiplicaremos o resultado por 100, para ficar como porcentagem. Esperam-se assim gráficos como o da Figura 3.

Com isso já podemos obter os valores de tensão limite de escoamento, LE, limite de resistência à tração, RT, e de Alongamento percentual, %AL.

Para obtermos o LE será necessário investigar no gráfico um valor aproximado dessa tensão.

Para o RT é possível calculá-lo através da Equação 5.

Para se ter uma medida de ductilidade, tomaremos a deformação específica, em porcentagem, no instante da fratura do CP, calculada pela Equação 3, igual ao %AL.

Para completarmos os objetivos do trabalho, obtendo valores de expoente de encruamento, n , coeficiente de resistência, K , e de sensibilidade a taxa de deformação, m , é necessário plotar as curvas tensão verdadeira-deformação verdadeira. Para isso partiremos dos pontos (tensão, deformação) do gráfico de engenharia para alimentar as Equações 7 e 8, sendo que esta última será dividida por 100, para que a deformação específica não fique mais em porcentagem.

Porém como vimos estas equações são válidas até o empescoamento, na carga máxima, a partir de então devemos usar a Equação 9 para os valores de tensão corrigidos, espera-se assim gráficos como o da Figura 4. Mas para isso é necessário o n e o K .

A carga máxima no ensaio de tração é alcançada quando $\varepsilon = n$, então na carga máxima a tensão verdadeira pode ser expressa como $\sigma_{\text{máx}} = Kn^n$, como já conhecemos essa tensão, é possível calcular o K como

$$K = \sigma_{\text{máx}}/n^n \quad (16).$$

Para o cálculo da sensibilidade a taxa de deformação, m , usaremos o primeiro método exemplificado na Figura 8 a), pois na máquina de tração utilizada não é capaz de realizar abruptas alterações na taxa de deformação, ela só consegue trabalhar na mesma taxa de deformação. Como vimos a taxa de deformação, $\dot{\varepsilon}$, é proporcional a velocidade do

travessão da máquina, que é a velocidade do ensaio, v . Por esse método trabalharemos com o fator $(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)$, como mostra a Figura 7, podemos considerar que (v_2/v_1) é proporcional a $(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)$, tomamos assim a taxa de deformação igual a velocidade do ensaio e podemos calcular a sensibilidade a taxa como

$$m = \ln(\sigma_2/\sigma_1) / \ln(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1) \quad (17).$$

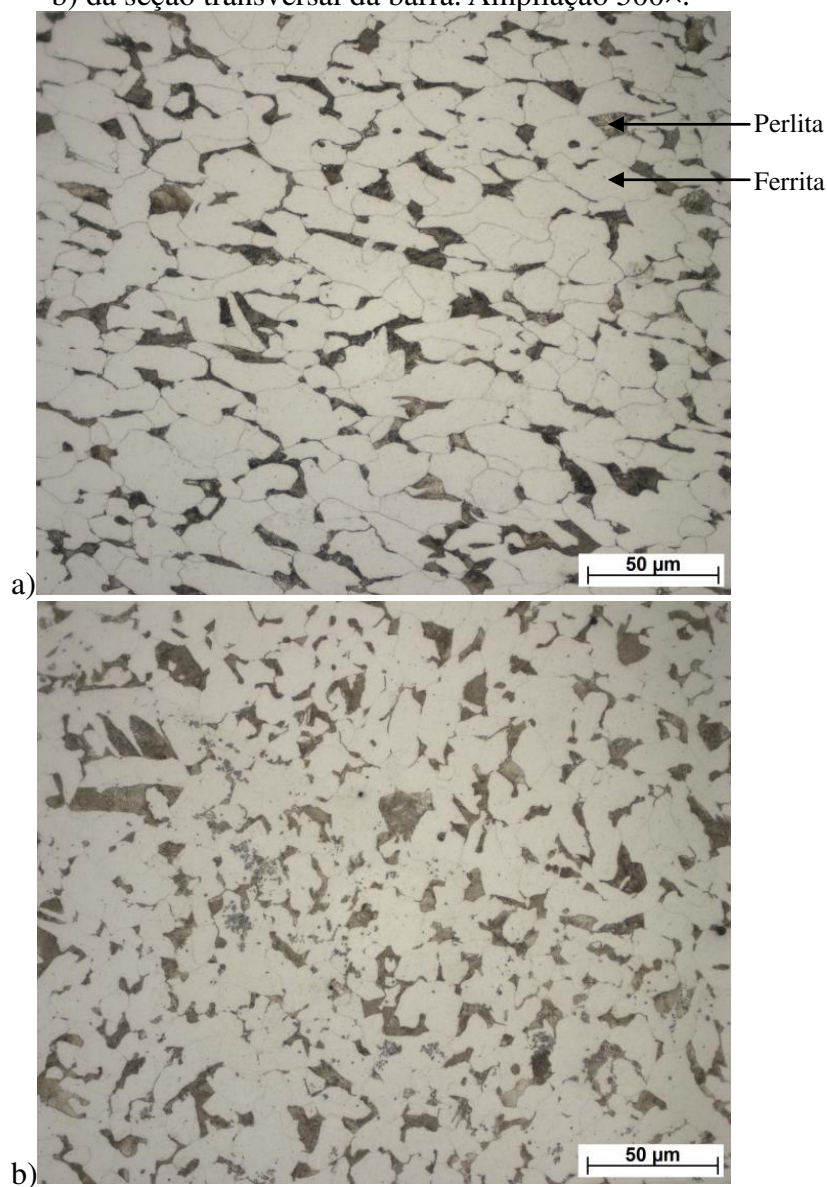
Lembrando que a velocidade de ensaio está em mm/min, e a unidade da taxa é s^{-1} , por isso é necessário dividir a velocidade por 60, ficando assim com os seguintes valores: $0,0083 s^{-1}$; $0,0417 s^{-1}$ e $0,2083 s^{-1}$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise Micrográfica

Da metalografia foram obtidas as seguintes imagens:

Figura 15 - Fotomicrografia do aço 1020 estudado a) da seção longitudinal e b) da seção transversal da barra. Ampliação 500 \times .



Fonte: LACAM.

Pode-se verificar pela Figura 15 a) que a barra foi deformada a frio, pois os grãos estão alongados (achatados) numa mesma direção.

Pode-se dizer também, de forma comparativa com a Figura 2 que a microestrutura do aço analisado é de ferrita e perlita.

Já a quantificação de cada microestrutura e consequentemente a de %C das amostras, através da Equação 15 é mostrada na Tabela a seguir.

Tabela 2 - Quantificação de cada microestrutura e carbono na amostra.

	%Ferrita	%perlita	%Carbono
1020_500x_2_longitudinal	84.347	15.653	0.12
1020_1000x_2_ longitudinal	84.428	15.572	0.12
1020_500x_transversal	79.781	20.219	0.16
1020_1000x_ transversal	82.162	17.838	0.14
		Média	0.14

Fonte: LACAM.

Verificando assim que o aço é um de baixo carbono, e que mesmo levando em consideração as aproximações e tolerâncias, lembrando que os grãos da amostra longitudinal estão achatados, não se pode considera-lo um AISI 1020 através desse método.

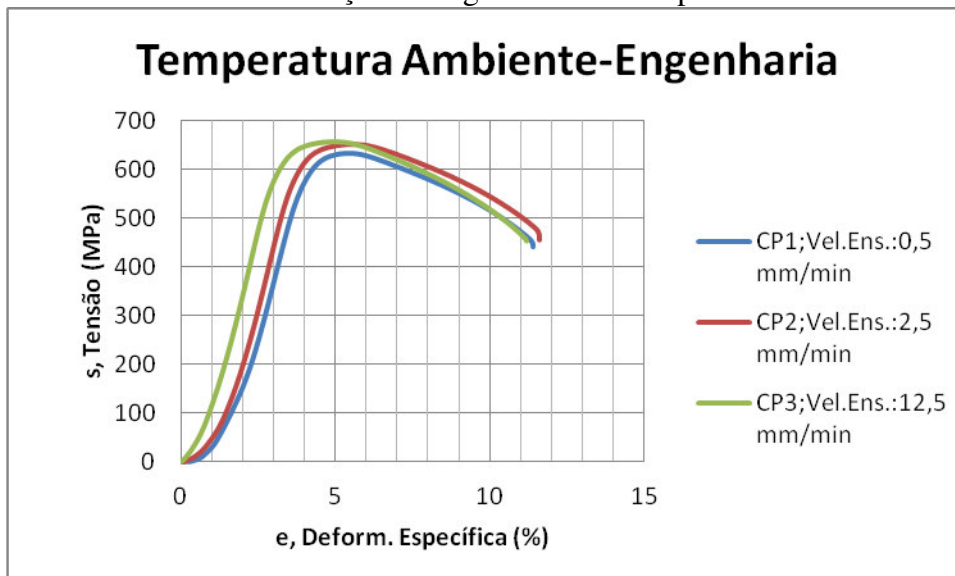
Porém pode-se afirmar que é uma barra de baixo carbono, pois estas possuem um teor máximo de carbono de 0,15%. (CHIAVERINI, 2008)

5.2 Resultados dos Ensaios de Tração

Serão apresentadas as curvas de tensão-deformação de engenharia e as de tensão verdadeira-deformação verdadeira, para cada temperatura de ensaio analisada, e para cada temperatura, três velocidades de ensaio foi analisada.

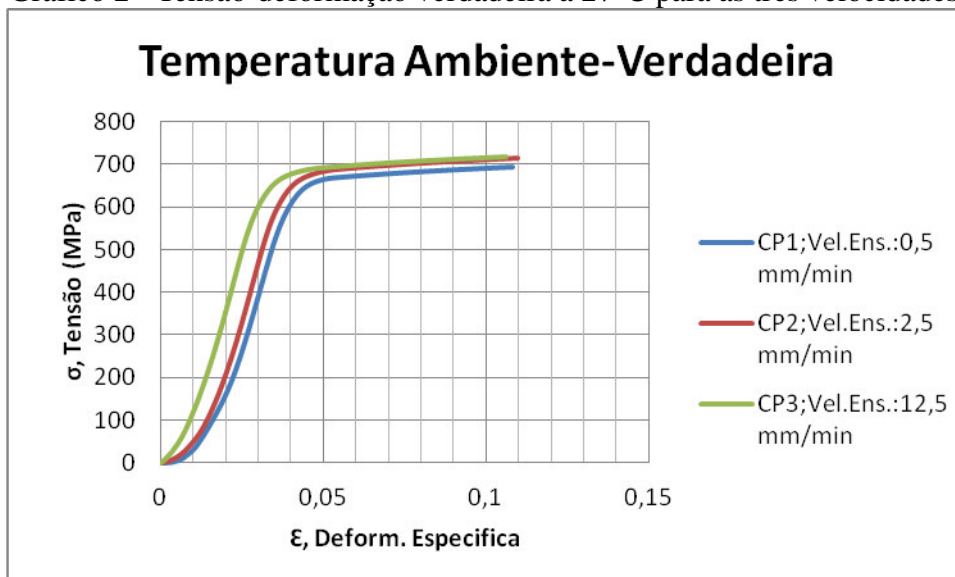
5.2.1 Temperatura Ambiente

Gráfico 1 - Tensão-deformação de engenharia a 27°C para as três velocidades.



Fonte: Próprio autor.

Gráfico 2 - Tensão-deformação verdadeira a 27°C para as três velocidades.

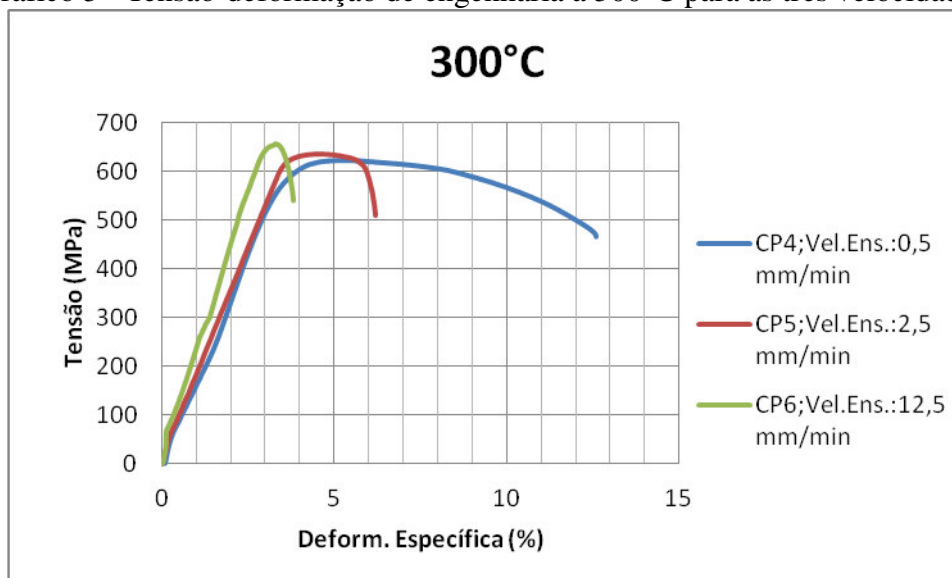


Fonte: Próprio autor.

Na temperatura ambiente o aço não demonstrou ser muito influenciado pela variação da velocidade de deformação, verificando valores de propriedades mecânicas muito próximos, e muito elevados, indicando que o material está no estado encruado, e que, de acordo com o exposto na seção 3.2.2 desse trabalho, pode-se dizer que a Porcentagem de Trabalho a Frio foi superior a 30%.

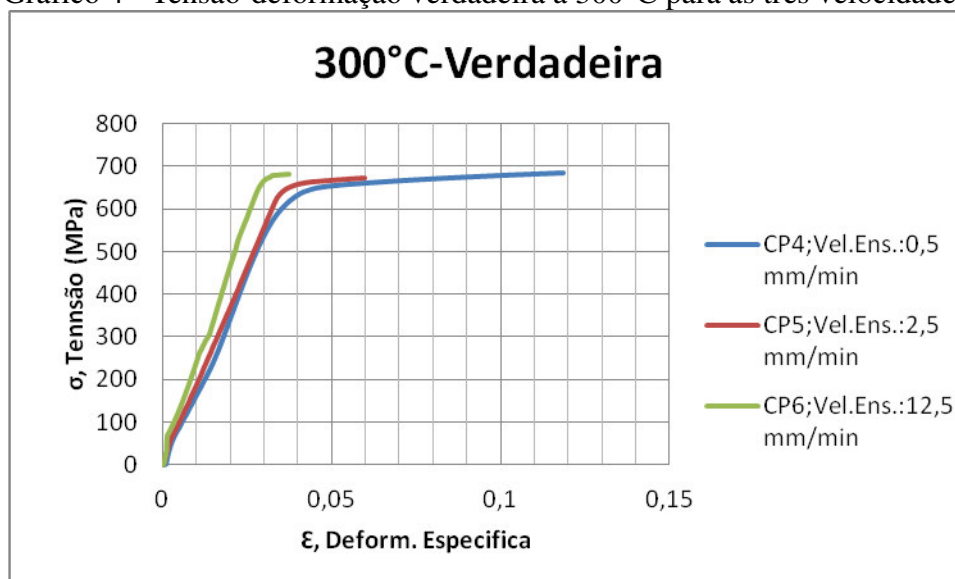
5.2.2 A Temperatura de 300°C

Gráfico 3 - Tensão-deformação de engenharia a 300°C para as três velocidades.



Fonte: Próprio autor.

Gráfico 4 - Tensão-deformação verdadeira a 300°C para as três velocidades.



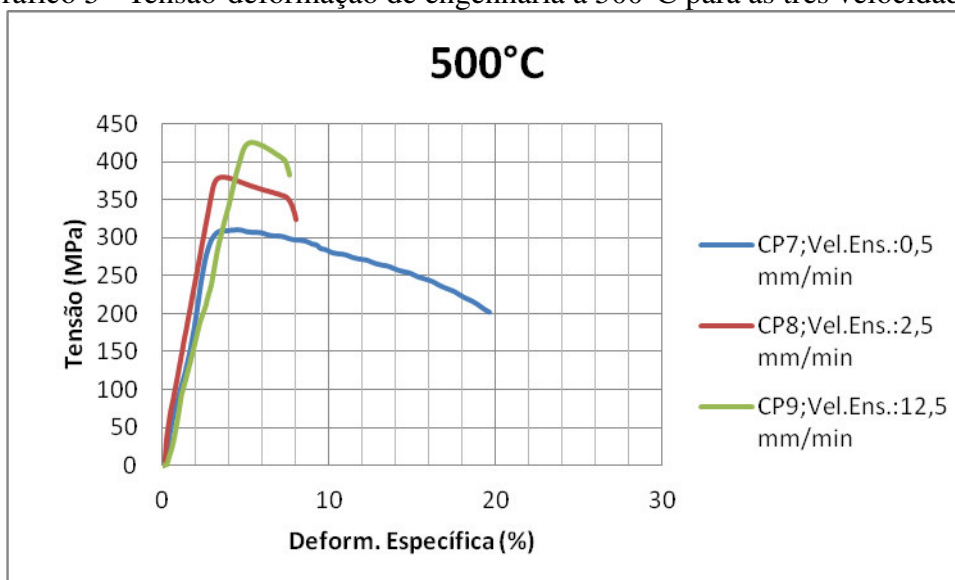
Fonte: Próprio autor.

A 300°C a diminuição nos valores de LE e RT comparados com os na temperatura ambiente, é muito pequena, e eles também não variaram de forma significativa com a velocidade de ensaio. Mas nessas condições a ductilidade, na forma de deformação específica, se mostrou fortemente afetada pela velocidade de ensaio. O aço se deformou cada vez menos com o aumento da velocidade, seguindo o que ficou exposto na Figura 12. Com isso os valores de LE ficaram próximos ao de RT.

Com o aumento da temperatura a movimentação das discordâncias é facilitada, porém o material já estava encruado, atingindo-se o estado de emaranhado de discordâncias (elevada densidade de discordâncias, impossibilitando a movimentação das mesmas) em deformações menores, quando se aumenta a velocidade de ensaio. Nessas condições o RT é alcançado em deformações menores e o metal fratura com uma deformação específica muito menor que aquelas a temperatura ambiente.

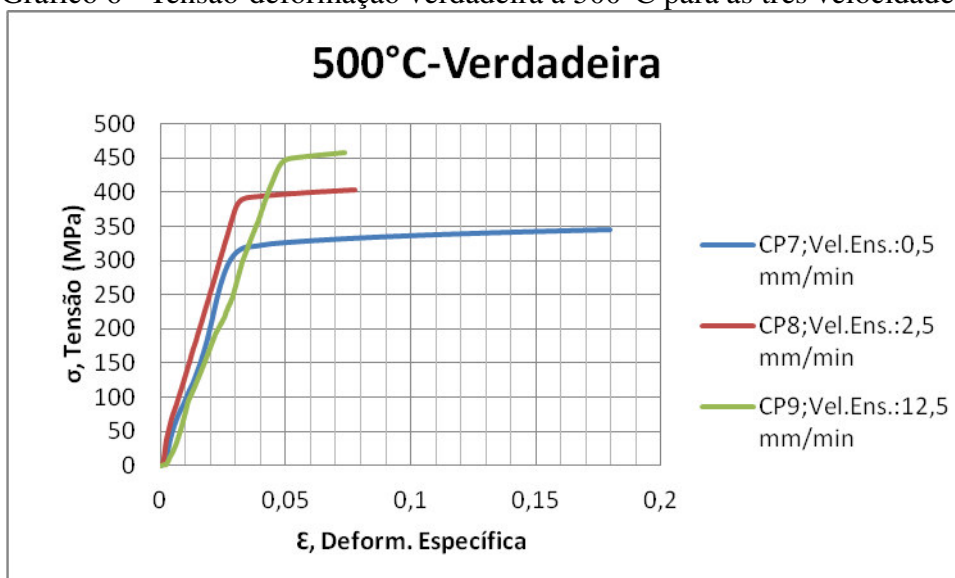
5.2.3 A Temperatura de 500°C

Gráfico 5 - Tensão-deformação de engenharia a 500°C para as três velocidades.



Fonte: Próprio autor.

Gráfico 6 - Tensão-deformação verdadeira a 500°C para as três velocidades.

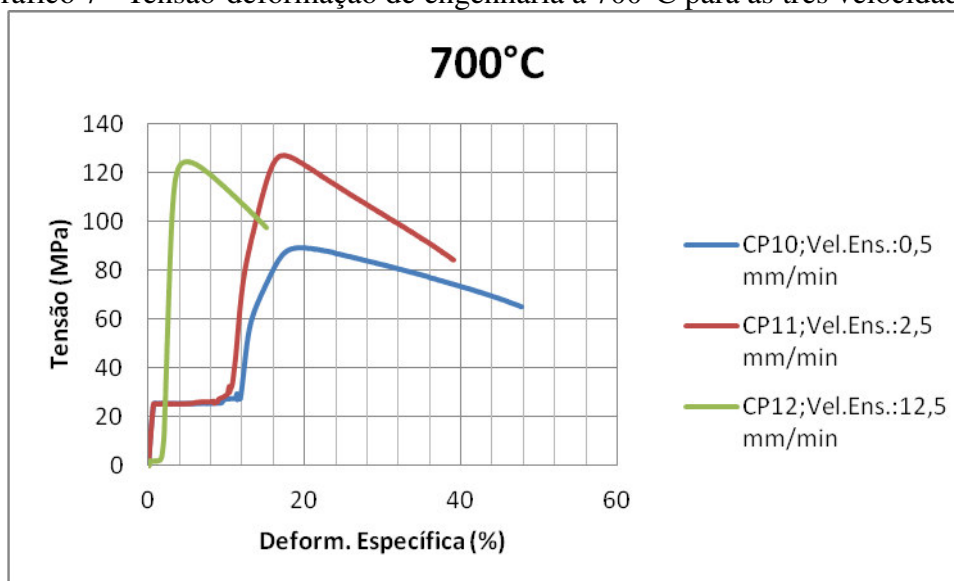


Fonte: Próprio autor.

A 500°C a diminuição dos valores de LE e RT já é bastante considerável comparado com os de 300°C, e ainda variaram significativamente com a velocidade de ensaio. Os valores de LE e RT cresceram com a velocidade de deformação. Assim como em 300°C essa velocidade afetou de forma significativa a deformação específica, que diminuiu com o aumento da velocidade.

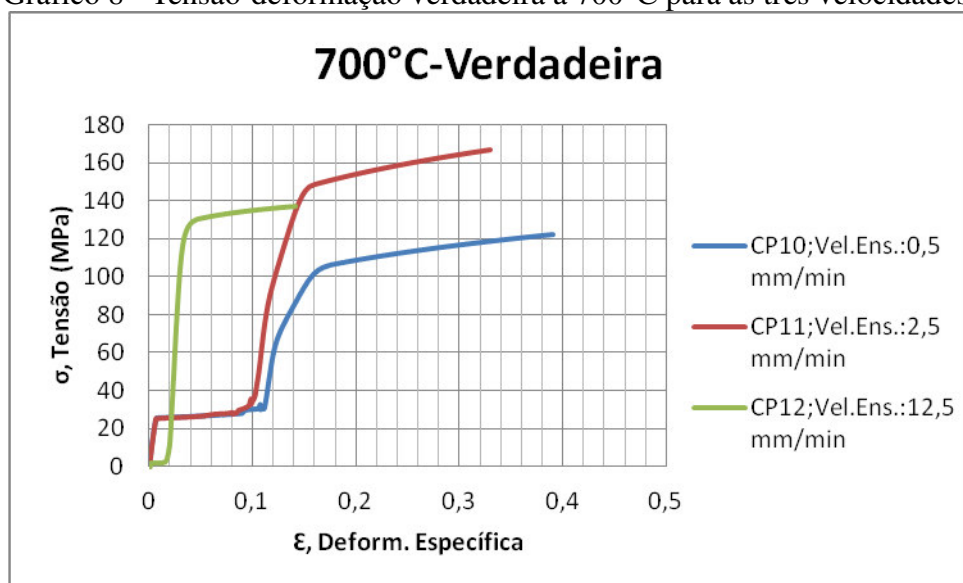
5.2.4 A Temperatura de 700°C

Gráfico 7 - Tensão-deformação de engenharia a 700°C para as três velocidades.



Fonte: Próprio autor.

Gráfico 8 - Tensão-deformação verdadeira a 700°C para as três velocidades.

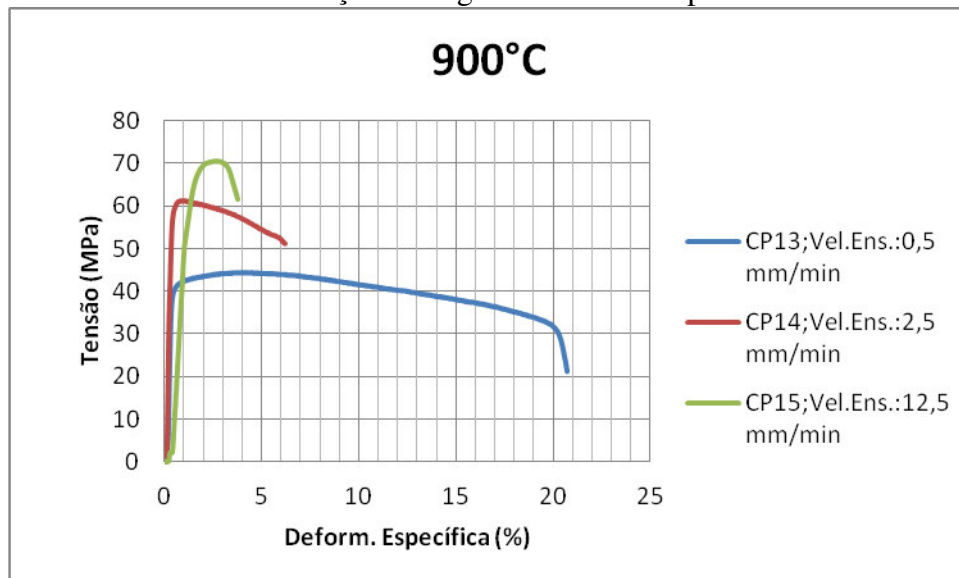


Fonte: Próprio autor.

A 700°C ocorreu um patamar de escoamento - quando a transição do regime elástico para o plástico é muito bem definida e ocorre de uma forma abrupta. A deformação plástica é iniciada com uma tensão muito baixa; a deformação que se segue flutua ligeiramente em torno de algum valor constante de tensão; subsequentemente a tensão aumenta com o aumento da deformação; - nas duas menores velocidades de ensaio, a uma tensão muito baixa e que provocou uma deformação considerável, o que não era esperado, e uma das possíveis causas é a deformação a frio, trefilação, a qual a barra originária dos CPs, sofreu, e que a essa temperatura sofreu algum processo termicamente ativado, que favorece a deformação e reduz a resistência em temperaturas elevadas, podendo ter ocorrido um recozimento de alívio de tensões. Esses dois CPs provaram as maiores deformações, com comprimentos finais de, 58,5 e 55,5 mm, para o CP10 e CP11 respectivamente. Provavelmente um processo relacionado à movimentação de discordâncias, já que para a maior velocidade o material se comportou como esperado.

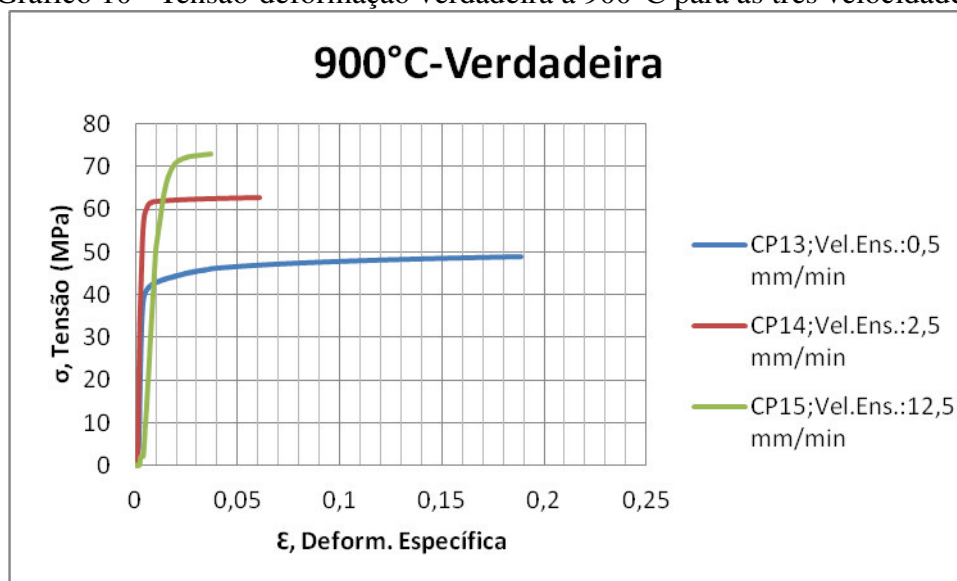
5.2.5 A Temperatura de 900°C

Gráfico 9 - Tensão-deformação de engenharia a 900°C para as três velocidades.



Fonte: Próprio autor.

Gráfico 10 - Tensão-deformação verdadeira a 900°C para as três velocidades.



Fonte: Próprio autor.

A 900°C as propriedades de resistência tiveram os seus menores valores verificados e obedeceu ao comportamento geral, os LE e RT são menores aos obtidos a 700°C, e aumentam com o aumento da velocidade de ensaio, e a ductilidade diminui com o aumento da velocidade de ensaio.

5.3 Propriedades Mecânicas

Tabela 3 - Propriedades Mecânicas de engenharia, e os valores de n e K .

Amostra	Temp.(°C)	$\dot{\epsilon}$ (/sec)	LE(MPa)	LR(MPa)	%AL	n	k
CP1	27	0,0083	611,9764	633,5062	11,4232	0,0525	779,4820
CP2		0,0417	625,2937	651,5387	11,6073	0,0535	803,9958
CP3		0,2083	628,6812	658,2111	11,2073	0,0483	799,6263
CP4	300	0,0083	602,9008	623,5363	12,5924	0,0521	766,1850
CP5		0,0417	620,1249	636,1229	6,1792	0,0441	762,9815
CP6		0,2083	631,1449	656,5687	3,8266	0,0326	758,2896
CP7	500	0,0083	298,2993	311,2987	19,6701	0,0440	373,2478
CP8		0,0417	374,2044	379,5766	8,0541	0,0350	442,0138
CP9		0,2083	414,7181	426,1811	7,6170	0,0523	523,9317
CP10	700	0,0083	27,2886	89,1268	47,7613	0,1750	144,0484
CP11		0,0417	26,8201	126,9544	39,0957	0,1597	199,6436
CP12		0,2083	119,3591	124,4450	15,1815	0,0457	149,9874
CP13	900	0,0083	40,5527	44,3872	20,7346	0,0365	51,9498
CP14		0,0417	58,5902	61,2534	6,2307	0,0082	64,2281
CP15		0,2083	67,6691	70,4526	3,7729	0,0255	79,3521

Fonte: Próprio autor.

Os valores de coeficiente de resistência, K , foram obtidos através a Equação 16, onde o expoente de encruamento é igual a deformação verdadeira na carga máxima. Os valores de K decrescem com o aumento da temperatura, já que as tensões também diminuem.

Os valores de n também diminuem com o aumento da temperatura, mas de forma muito discreta. Porém a única exceção foi também a 700°C para as menores velocidades de ensaio. Esses valores foram os mais próximos dos valores teóricos, geralmente na temperatura ambiente igual a 0,2. Os outros ficaram bem abaixo destes, já que o material se encontrava previamente encruado, e com a movimentação de discordâncias facilitadas com o aumento da temperatura, não tinha mais a capacidade de encruar.

5.4 Sensibilidade a Taxa de Deformação

A Sensibilidade a Taxa de Deformação, m , foi calculado de acordo com a Equação 17, e os valores estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores encontrados de m .

Amostra	Temp.(°C)	Amostras	Verdadeira					
		i-j	ϵ	ϵ_i	ϵ_j	σ_i	σ_j	m
CP1	27	2-1	0,0499	0,0417	0,0083	682,7966	664,0031	0,0173
CP2		3-2		0,2083	0,0417	691,8674	682,7966	0,0082
CP3		3-1		0,2083	0,0083	691,8674	664,0031	0,0128
CP4	300	5-4	0,0355	0,0417	0,0083	638,7084	603,2367	0,0355
CP5		6-5		0,2083	0,0417	680,2452	638,7084	0,0391
CP6		6-4		0,2083	0,0083	680,2452	603,2367	0,0373
CP7	500	8-7	0,0601	0,0417	0,0083	400,6046	329,8012	0,1208
CP8		9-8		0,2083	0,0417	452,3605	400,6046	0,0755
CP9		9-7		0,2083	0,0083	452,3605	329,8012	0,0982
CP10	700	11-10	0,1203	0,0417	0,0083	98,0171	59,8209	0,3068
CP11		12-11		0,2083	0,0417	136,1698	98,0171	0,2043
CP12		12-10		0,2083	0,0083	136,1698	59,8209	0,2555
CP13	900	14-13	0,0307	0,0417	0,0083	62,4220	45,4993	0,1965
CP14		15-14		0,2083	0,0417	72,6196	62,4220	0,0940
CP15		15-13		0,2083	0,0083	72,6196	45,4993	0,1452

Fonte: Próprio autor.

Os valores de m crescem com o aumento da temperatura, já que a variação das tensões são maiores em temperaturas mais elevadas, mas variam de forma discreta dentro da mesma temperatura. Aqui também os valores que se destoam dos demais estão relacionadas à temperatura de 700°C, pois a diferença de tensões de uma curva para outra, para uma mesma deformação é grande.

6 CONCLUSÃO

Diante das curvas tensão-deformação obtidas pelos ensaios de tração, em diferentes temperaturas e velocidades de ensaios, foi possível avaliar os efeitos dessas variáveis sobre as propriedades mecânicas do aço baixo carbono estudado.

Na temperatura ambiente o aço não apresenta variação relevante na resistência, e no alongamento com as mudanças de velocidade de ensaio.

O que se observou na maioria dos resultados foi que o aumento da temperatura causa um efeito de achatamento das curvas tensão-deformação, obtendo valores de propriedades mecânicas como, o Limite de Escoamento e Resistência a Tração, menores. O mesmo acontece para os valores de Expoente de Encruamento, e de Coeficiente de Resistência. Estas propriedades têm seus valores aumentados com o aumento da velocidade de deformação.

A ductilidade é mais afetada pela velocidade de deformação do que pela temperatura. A ductilidade aumenta com o aumento da temperatura, até a 900°C, quando diminuiu. Porém a menores velocidades de deformação a ductilidade obtida é relativamente, para a mesma temperatura, grande, e para velocidades maiores, são observados valores relativamente baixos de deformação.

Verificou-se que Sensibilidade a Taxa de Deformação aumenta com o aumento da temperatura.

7 TRABALHOS FUTUROS

Pode-se realizar uma quantidade maior de ensaios, a fim de se ter uma amostragem razoável de resultados. Para ser estatisticamente aceitável, deveriam ser realizados no mínimo cinco ensaios para o mesmo aço, nas mesmas condições, e eliminar os dois com resultados mais discrepantes, e fazer a média dos três aceitáveis.

Realizar ensaios para outras temperaturas e sob outras velocidades de ensaio.

O ensaio de tração em elevadas temperaturas pode auxiliar em pesquisas relacionadas aos processos de conformação mecânica, por exemplo, laminação, tanto a frio, quanto a quente.

Analisar os tipos de fraturas e as microestruturas obtidas ao término do ensaio. Pode-se também analisar, o nível de encruamento remanescente, se houve recristalização e/ou aumento do tamanho de grão, para cada condição de ensaio.

Aprofundar-se mais nos estudos sobre teorias relacionadas às discordâncias, como o encruamento e o emaranhado de discordâncias, a fim de ter uma melhor base para poder discursar de forma mais concisa os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. amp. e rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. 599p. (Chaverini, Vicente).
- CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais**: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, c2008. xx, 705 p.
- SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos**: fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo, SP: Editora E. Blucher, c1982. 286p.
- HOSFORD, William F; CADDELL, Robert M. **Metal Forming**: mechanics and metallurgy. 3rd. ed. UpperSaddle River, N.J.: PTR Prentice Hall, c2007. 364p.
- DIETER, George Elwood. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Guanabara Koogan S.A, 1961. 650 p.
- ABNT NBR ISO 6892-2:2013; **Materiais Metálicos - Ensaio de Tração Parte 2: Método de ensaio à temperatura elevada**. ABNT NBR ISO 6892-2:2013. 21 páginas.
- ASM Handbook. **Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation**. 2000.
- SILVA, Andre Luiz da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 2. ed. Sumaré: Eletrometal, 1988. 528p.
- ASTM A 370 - 03a; **Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**. 2003. 49p.