



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

LARYSSA COUTINHO DA SILVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VERGALHÕES DE AÇO SAE
1018 SUBMETIDOS A ENSAIOS DE TRAÇÃO EM DIFERENTES TEMPERATURAS**

FORTALEZA
2023

LARYSSA COUTINHO DA SILVA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VERGALHÕES DE AÇO SAE 1018
SUBMETIDOS A ENSAIOS DE TRAÇÃO EM DIFERENTES TEMPERATURAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do 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. Mauro Andres Cerra Florez

FORTALEZA
2023

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

- S581e Silva, Laryssa Coutinho da.
Estudo do comportamento mecânico de vergalhões de aço SAE 1018 submetidos a ensaios de tração em diferentes temperaturas / Laryssa Coutinho da Silva. – 2023.
45 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez.
1. Comportamento mecânico. 2. Vergalhões de aço. 3. Ensaio de tração em diferentes temperaturas. 4. Microestrutura. I. Título.

CDD 669

LARYSSA COUTINHO DA SILVA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VERGALHÕES DE AÇO SAE 1018
SUBMETIDOS A ENSAIOS DE TRAÇÃO EM DIFERENTES TEMPERATURAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do 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: 07/12/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Eng. Me. Gilberto Pereira Gonçalves Filho
Grupo Aço Cearense

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, expresso minha imensa gratidão aos meus pais, cujo apoio incondicional, encorajamento e amor foram a força motriz por trás de todas as minhas conquistas acadêmicas. Seu constante suporte foi o alicerce que me permitiu alcançar este marco significativo em minha jornada acadêmica.

Ao Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez, dedico meu sincero agradecimento pela orientação dedicada e pela expertise compartilhada ao longo deste processo. Sua mentoria foi essencial para moldar e direcionar este trabalho, proporcionando-me valiosas lições acadêmicas e profissionais.

Expresso minha gratidão especial ao meu companheiro Pedro Queiros, cujo suporte e troca de ideias foram fundamentais durante todas as etapas deste projeto. Sua colaboração incansável e apoio foram elementos-chave para superar desafios e alcançar resultados significativos.

Agradeço também aos colegas do Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM), do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) e do Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM). A troca de experiências e o ambiente colaborativo foram elementos cruciais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por compartilharem seus conhecimentos, experiências e equipamentos.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento deste trabalho, bem como pelo financiamento de outros projetos desenvolvidos durante minha graduação.

Aos demais colegas, professores, e a todos que, direta ou indiretamente, ofereceram seu suporte, orientação e incentivo ao longo desta jornada, meu profundo agradecimento. Cada contribuição foi essencial para o sucesso deste trabalho e para o meu crescimento como profissional e acadêmico.

Este trabalho é o resultado de um esforço coletivo e reflete o apoio valioso de cada um de vocês. Agradeço sinceramente por fazerem parte desta jornada e por tornarem possível a concretização deste projeto.

“O aprendizado é como o horizonte: não há limites.”
(Provérbio Chinês).

RESUMO

Os vergalhões de aço desempenham um papel crucial na construção civil, sendo utilizados como elementos estruturais em concretos armados para suportar cargas e garantir a estabilidade das estruturas. Os ensaios de tração nesses materiais permitem avaliar sua resistência e seu comportamento sob tensão. No entanto, há uma carência significativa de estudos que explorem as propriedades mecânicas de vergalhões em temperaturas diferentes da temperatura ambiente que podem afetar significativamente as propriedades mecânicas do aço. Nesse contexto, os ensaios de tração em diferentes temperaturas permitem avaliar as mudanças nas propriedades mecânicas para garantir a segurança e durabilidade das estruturas. O presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento mecânico de vergalhões de aço SAE 1018 quando submetidos a ensaios de tração a diferentes temperaturas bem como a realização de uma análise microestrutural, fractográfica e de microdureza. Dessa forma, este trabalho busca preencher essa lacuna, realizando ensaios de tração em diferentes temperaturas e analisando a microestrutura dos vergalhões. A partir dos dados obtidos, observou-se que a tensão máxima diminui gradativamente com o aumento da temperatura, enquanto a deformação plástica dos vergalhões aumentou. Além disso, houve um crescimento de grãos que diminuiu a dureza do material facilitando sua deformação e, também, verificou-se que o material apresentou fratura dúctil em todas as temperaturas.

Palavras-chave: vergalhões de aço; ensaio de tração em diferentes temperaturas; comportamento mecânico; microestrutura.

ABSTRACT

Steel rebars play a crucial role in civil construction, being used as structural elements in reinforced concrete to bear loads and ensure the stability of structures. Tensile tests on these materials allow for the evaluation of their strength and behavior under tension. However, there is a significant lack of studies exploring the mechanical properties of rebars at temperatures other than room temperature, which can significantly impact the mechanical properties of steel. In this context, tensile tests at different temperatures enable the assessment of changes in mechanical properties to ensure the safety and durability of structures. This study aims to investigate the mechanical behavior of SAE 1018 steel rebars when subjected to tensile tests at different temperatures, as well as the performance of microstructural, fractographic, and microhardness analyses. Thus, this work seeks to fill this gap by conducting tensile tests at different temperatures and analyzing the microstructure of the rebars. From the obtained data, it was observed that the maximum stress gradually decreases with the increase in temperature, while the plastic deformation of the rebars increased. Additionally, there was grain growth, which reduced the material hardness, facilitating its deformation. Furthermore, it was found that the material exhibited ductile fracture at all temperatures.

Keywords: steel bars; Tensile testing at different temperatures; mechanical behavior; microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vergalhões de superfície nervurada	14
Figura 2 - Representação esquemática das microestruturas para um aço-carbono hipoeutetóide com composição C_0	18
Figura 3 - Fotomicrografia de um aço com 0,15 %pC que possui microestrutura composta por perlita e ferrita	19
Figura 4 - Fio máquina	20
Figura 5 - Representação esquemática, em perspectiva, do processo de laminação	21
Figura 6 - Propriedades no ensaio de tração de aço baixo carbono em função do grau de deformação a frio	21
Figura 7 - Seção longitudinal de vergalhão CA60 de bitola 6 mm levemente encruado por processo de laminação a frio	22
Figura 8 - Diagrama Tensão-Deformação de Engenharia	23
Figura 9 - Diagrama Tensão-Deformação de um metal dúctil com fenômeno de escoamento	24
Figura 10 - Mudanças no diagrama Tensão-Deformação de um aço baixo-carbono com a temperatura	25
Figura 11 - a) Cortadora Metalográfica; b) Embutidora a quente	27
Figura 12 - a) Lixadeira; b) Politriz	28
Figura 13 - Microscópio ótico Leica DMI 3000M	28
Figura 14 - Microdurometro Shimadzu HVM-2	29
Figura 15 - Máquina de Ensaio EMIC DL-10000 equipada com forno resistivo	30
Figura 16 - Estereoscópio Olympus SZ61TR equipado com guia de luz modelo LG PS2	32
Figura 17 - Fotomicrografias das amostras em estudo a) Controle; b) 27°C; c) 100°C; d) 200°C; e) 300°C; f) 400°C; g) 500°C; h) 600°C; i) 700°C. Ampliação 500x, Escala: 20µm	33
Figura 18 - Curva Tensão - Deformação para $T = 27^{\circ}C$	37
Figura 19 - Curva Tensão - Deformação para $T = 100^{\circ}C$	37
Figura 20 - Curva Tensão - Deformação para $T = 200^{\circ}C$	38
Figura 21 - Curva Tensão - Deformação para $T = 300^{\circ}C$	38
Figura 22 - Curva Tensão - Deformação para $T = 400^{\circ}C$	39
Figura 23 - Curva Tensão - Deformação para $T = 500^{\circ}C$	39
Figura 24 - Curva Tensão - Deformação para $T = 600^{\circ}C$	40
Figura 25 - Curva Tensão - Deformação para $T = 700^{\circ}C$	40
Figura 26 - Curvas Tensão-Deformação	41
Figura 27 - Gráfico comparativo das propriedades mecânicas obtidas	42

Figura 28 - Fotomicrografias das amostras em estudo a) 27°C; b) 100°C; c) 200°C; d) 300°C; e) 400°C; f) 500°C; g) 600°C; h) 700°C. Ampliação 45x, Escala: 500µm..... 44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição em %p do vergalhão	27
Tabela 2 - Quantificação da microestrutura.....	34
Tabela 3 - Resultados Limite de Escoamento.....	35
Tabela 4 - Resultados Limite de Resistência a Tração	35
Tabela 5 - Resultados Limite de Ruptura	36
Tabela 6 - Resultados Alongamento	36
Tabela 7 - Resultados de Microdureza.....	43
Tabela 8 - Medidas médias do diâmetro da superfície da fratura	45

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
SAE	Society of Automotive Engineers
ISO	International Organization for Standardization
CA	Concreto Armado
CP	Corpo de Prova
HV	Hardness Vickers
%	Porcentagem
%W	Fração mássica
LE	Limite de Escoamento
LRT	Limite de Resistência a Tração
LR	Limite de Ruptura
AL	Alongamento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
2. OBJETIVO.....	16
2.1 Objetivos específicos.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Material em Estudo.....	17
3.1.1 Aços estruturais	17
3.1.2 Aços Baixo Carbono.....	17
3.1.2.1 Estrutura cristalina dos aços baixo-carbono.....	18
3.1.3 Fabricação de Vergalhões.....	20
3.2 Ensaio de Tração.....	22
3.2.1 Diagrama tensão-deformação de engenharia	22
3.3 Ensaio de Tração em Temperaturas Elevadas.....	24
3.3.1 Efeitos da Temperatura nas Propriedades de Escoamento.....	24
3.4 Ensaio de Dureza	25
3.4.1 Ensaio de Dureza Vickers.....	25
4. MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1 Material.....	27
4.2 Metalografia.....	27
4.3 Ensaio de Microdureza	29
4.4 Ensaio de Tração.....	30
4.5 Fractografia.....	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1 Análise Micrográfica	33
5.2 Ensaio de Microdureza.....	43
5.3 Ensaio de Tração	35
5.4 Análise Fractográfica	43
6 CONCLUSÃO.....	46
7 TRABALHOS FUTUROS.....	39
REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

Entre os materiais de construção, o aço tem uma posição de relevo: combina resistência mecânica, trabalhabilidade, disponibilidade e baixo custo. Assim sendo, é fácil compreender a importância e a extensão da aplicação dos aços em todos os campos da engenharia (CHIAVERINI, 2005).

Uma parte significativa do consumo mundial de aço compreende os aços estruturais, essa classificação engloba basicamente vergalhões para reforço de concreto, barras, chapas e perfis. Seu consumo aumenta significativamente quando ocorre expansão na construção e da infraestrutura em geral (COLPAERT, 2008).

Os vergalhões de aço (Figura 1) são amplamente utilizados na construção civil para compensar a baixa resistência a tração do concreto. Esse material é responsável por suportar cargas e garantir a estabilidade estrutural.

Figura 1 - Vergalhões de superfície nervurada



Fonte: DAROIT, 2012

As propriedades mecânicas do aço AISI-SAE 1018, como dureza (126 HB), limite de escoamento (370 MPa), resistência mecânica (440 MPa), módulo de elasticidade (205 GPa) e usinabilidade (76%), entre outras, o tornam ideal para uma ampla gama de aplicações incluindo a fabricação de fio-máquina que é utilizado na confecção de vergalhões para construção civil. Embora, outros aços possam superar suas propriedades mecânicas, esse material possui produção mecanizada eficiente e baixo custo de produção (HERNANDEZ, 2017).

No entanto, a maioria dos estudos existentes concentra-se nas propriedades mecânicas a temperatura ambiente desse componente estrutural, deixando uma lacuna significativa de conhecimento sobre seu comportamento em temperaturas diferente da temperatura ambiente.

De acordo com o estudo de HERNANDEZ et al observou-se que elevar a temperatura

até atingir o estado de austenização em um aço AISI – SAE 1018 permite que este apresente características mais definidas, como: maior módulo de elasticidade, maior resistência a tração e maior tensão de escoamento devido à fase martensítica.

É nesse contexto que se insere o objetivo deste trabalho que tem como propósito analisar o comportamento mecânico dos vergalhões de aço SAE 1018 quando submetidos a ensaios de tração em diversas temperaturas, levando em consideração a influência de sua microestrutura.

Entender como esses materiais se comportam sob tais condições é essencial para garantir a segurança e a integridade das estruturas construídas, principalmente em situações em que estão sujeitas a variações térmicas e sobrecargas.

2. OBJETIVO

Estudar o efeito da temperatura sobre as propriedades mecânicas de Dureza, Alongamento (AL), Limite de Escoamento (LE), Limite de Resistência a Tração (LRT), Limite de Ruptura (LR) de vergalhões de aço SAE 1018 submetidos a ensaio de tração em diferentes temperaturas.

2.1 Objetivos específicos

- Comparar as microestruturas obtidas por micrografias ópticas, correlacionando as mudanças microestruturais com as variações nas propriedades mecânicas.
- Investigar a influência da temperatura sobre a dureza utilizando ensaios de microdureza, visando compreender as alterações nas propriedades mecânicas em uma escala microscópica;
- Analisar e comparar a variação das propriedades mecânicas de Dureza, Alongamento, Limite de Escoamento, Limite de Resistência e Limite de Ruptura em vergalhões de aço SAE 1018 submetidos a ensaios de tração em diferentes temperaturas;
- Comparar as fractografias obtidas por meio do estereoscópio, correlacionando as mudanças as propriedades mecânicas com o tipo de fratura;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Material em Estudo

3.1.1 Aços Estruturais

Uma parte significativa do consumo mundial de aço compreende os aços estruturais, essa classificação engloba basicamente vergalhões para reforço de concreto, barras, chapas e perfis. Seu consumo aumenta significativamente quando ocorre expansão na construção e da infraestrutura em geral (COLPAERT, 2008).

Classicamente, os aços estruturais são aços de médio a baixo teor de carbono e em geral laminados em função das grandes quantidades produzidas. Para a maioria das aplicações estruturais, o teor de carbono desses aços varia de 0,15% a 0,40%, com os outros elementos (Mn, Si e S) nos teores considerados normais (CHIAVERINNI, 2005 ; COLPAERT, 2008)

Os principais requisitos para aços destinados a aplicações estruturais são: Tensão de escoamento e tenacidade elevadas, boa soldabilidade, boa formabilidade e custo mínimo (COLPAERT, 2008).

3.1.2 Aços Baixo-Carbono

De acordo com Chiaverini (2005), aço ou aço-carbono pode ser definido como uma “liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes dos processos de fabricação”.

Uma das subdivisões do aço-carbono são os “aços com baixo teor de carbono” já que apresentam teor de carbono inferior a 0,2%. Esses aços são chamados hipoeutetóides, devido a %pC ser menor que 0,77%, uma vez que aços com esse teor são denominados eutetóides (CHIAVERINI, 2005).

Dada a grande variedade de tipos de aços foram criados sistemas para sua classificação, os quais periodicamente são submetidos a revisão. Dentre esses sistemas, temos aqueles que consideram a composição química dos aços, sendo os mais conhecidos o da *American Iron and Steel Institute* (AISI) e da *Society of Automotive Engineers* (SAE). Um exemplo, é a designação AISI-SAE 10XX, onde XX correspondem à cifras indicadoras dos teores de carbono e os dois primeiros dígitos indicam que é simplesmente um aço ao carbono. Desta força, um aço AISI-SAE 1018 é um aço ao carbono com teor de carbono de 0,18%, em média (CHIAVERINI, 2005).

Uma das principais aplicações dos aços com baixo teor de carbono é na fabricação de elementos estruturais para construção civil como aço estrutural. Os aços estruturais devem ter

como características fundamentais: ductilidade e homogeneidade, valor elevado da relação entre limite de resistência e limite de escoamento, soldabilidade, suscetibilidade de corte por chama, sem endurecimento e resistência razoável à corrosão (CHIAVERINNI, 2005).

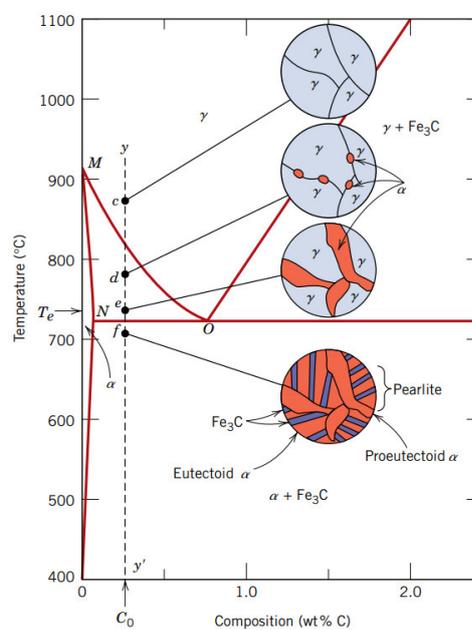
Com exceção da resistência à corrosão, todos os outros requisitos são satisfeitos em maior ou menor grau pelos aços-carbono, de baixo a médio carbono, obtidos por laminação, cujos limites de resistência à tração variam de 40 a 50 kgf/mm² (390 a 490 MPa) e cujo alongamento gira em torno de 20% (CHIAVERINNI, 2005).

3.1.2.1 Estrutura Cristalina do Aço Baixo-Carbono

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 Fe₃C (cementita) que contém aproximadamente, 6,7% de carbono (CHIAVERINI, 2005).

Entretanto, para uma liga hipoeutetóide pode-se reduzir esse diagrama para até de 2,0% de carbono, como mostra a figura 2, onde observar-se a esquematização das microestruturas da austenita, ou ferro γ ; da ferrita, ou ferro α ; e da perlita que consiste em lamelas alternadas de ferrita e cementita (CALLISTER,2014).

Figura 2 - Representação esquemática das microestruturas para um aço-carbono hipoeutetóide com composição C_0



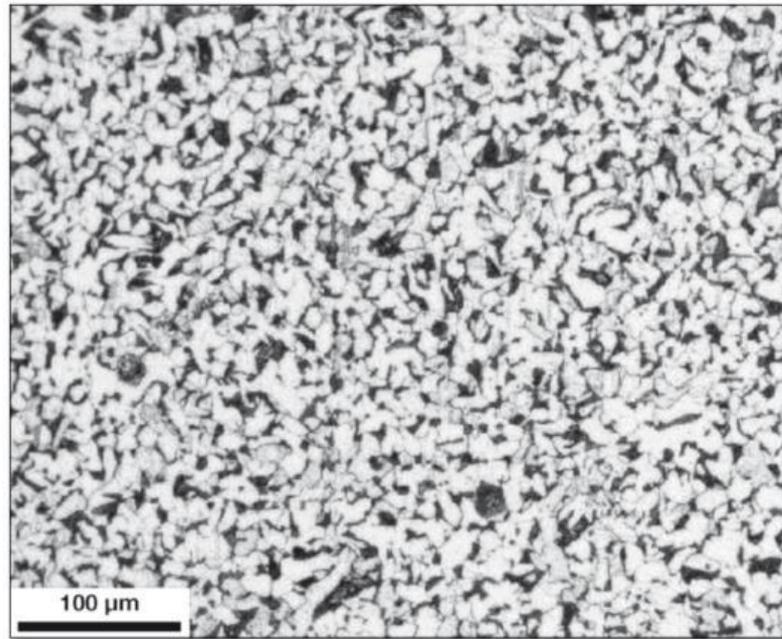
Fonte: Callister (2014)

As fases presentes no diagrama 2 podem ser descritas como: i) Ferrita: solução

sólida de carbono em ferro CCC existente até a temperatura de 912 °C; ii) austenita: solução sólida de carbono em ferro CFC existindo entre as temperaturas de 727 e 1495 °C; iii) Cementita: carboneto de estrutura ortorrômbica e de alta dureza. A cementita, junto com a ferrita, dão origem ao constituinte perlita (COSTA E SILVA, 2010).

A figura 3 é uma fotomicrografia de um aço que contém 0,15%pC, nela podemos observar a ferrita e a perlita. As grandes regiões claras representam a ferrita; já as regiões que alternam entre regiões claras e escuras correspondem a perlita, algumas regiões perlíticas aparentam ser mais escuras devido a possuírem camadas com espaçamento muito próximo que não são nítidas na ampliação da fotomicrografia (COLPAERT, 2008; CALLISTER, 2014).

Figura 3 - Fotomicrografia de um aço com 0,15 %pC que possui microestrutura composta por perlita e ferrita



Fonte: Colpaert (2008)

Segundo Callister (2014), as quantidades relativas de ferrita e de perlita podem ser determinadas pela regra da alavanca. Considerando uma liga hipoeutetóide com composição C_0 conforme a figura 2, a fração de perlita, W_p , pode ser determinada de acordo com:

$$W_p = \frac{C_0 - 0,022}{0,74} \quad (1)$$

Já a fração de ferrita, W_α , pode ser calculada de acordo com:

$$W_\alpha = \frac{0,76 - C_0}{0,74} \quad (2)$$

Três fatores afetam a microestrutura de uma liga, sendo elas: os elementos de liga presentes, as concentrações desse elemento e o tratamento térmico da liga (CALLISTER, 2014).

3.1.3 Fabricação de Vergalhões

A fabricação de vergalhões para concreto armado é especificada segundo a norma NBR 7480, sendo designados CA-xx, em que os dois algarismos indicados por xx representam o limite de escoamento mínimo em kgf/mm^2 (por exemplo, CA-25, CA-60, etc) (COLPAERT, 2008).

A conformação a frio ou encruamento é um tipo de tratamento que os aços para concreto armado frequentemente recebem para aumentar sua capacidade de trabalho. Esse método consiste na deformação do aço em uma temperatura abaixo da de recristalização ($400\text{-}500^\circ\text{C}$). (FIGUEIREDO, 2008)

Um dos métodos para encruamento na fabricação de vergalhões consiste na laminação a frio do fio-máquina (figura 4). (COLPAERT, 2008).

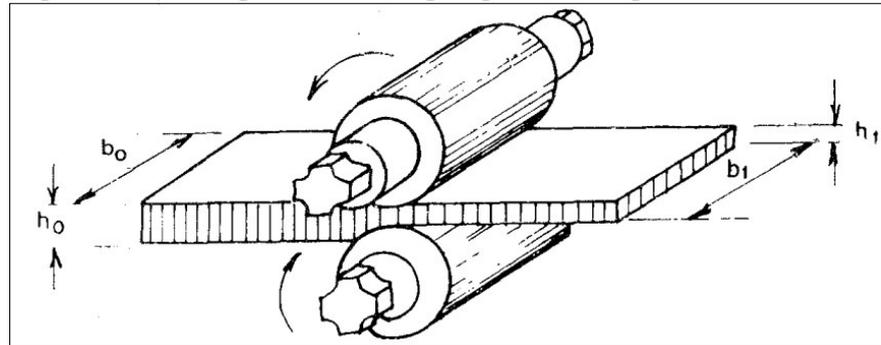
Figura 4 - Fio máquina



Fonte: AVB (2014)

A laminação a frio consiste na passagem de um material entre dois cilindros, girando em sentido oposto com a mesma velocidade superficial, separados entre si a uma distância menor que o valor da espessura da peça a ser deformada. Ao passar entre os cilindros, o metal sofre deformação plástica, a espessura é reduzida, o comprimento é aumentado e a largura é constante (figura 5). (CHIAVERINI,1986b).

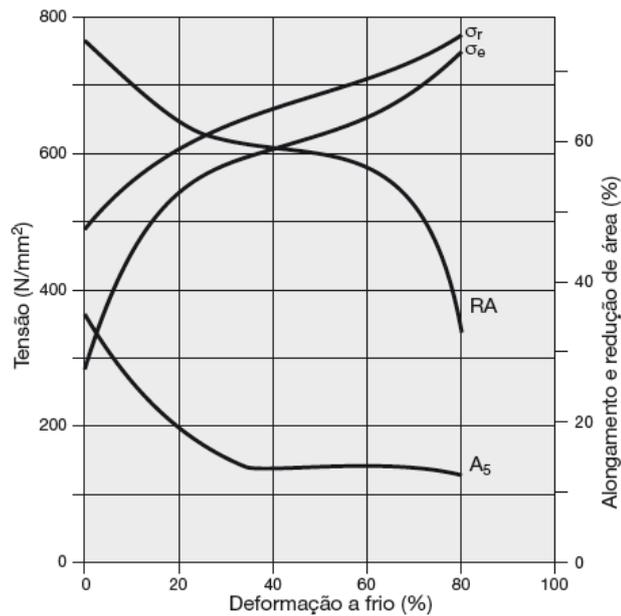
Figura 5 - Representação esquemática, em perspectiva, do processo de laminação



Fonte: Chiaverini (1986b)

Com a deformação a frio, a resistência mecânica aumenta e a ductilidade medida através da redução de área, do alongamento ou da tenacidade à fratura, normalmente diminui, como ilustrado na figura 6 (COLPAERT, 2008).

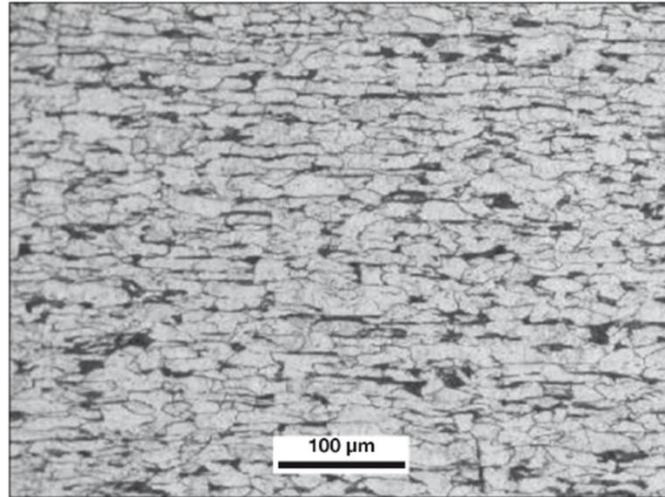
Figura 6 - Propriedades no ensaio de tração de aço baixo carbono em função do grau de deformação a frio



Fonte: Colpaert (2008)

O encruamento também modifica os grãos da microestrutura do material. Os grãos se alongam na direção de deformação. Na figura 7 observa-se a microestrutura de um vergalhão CA60 composta por ferrita e perlita, é perceptível uma leve deformação da ferrita na direção longitudinal (COLPAERT, 2008).

Figura 7 - Seção longitudinal de vergalhão CA60 de bitola 6 mm levemente encruado por processo de laminação a frio



Fonte: Colpaert (2008)

3.2 Ensaio de Tração

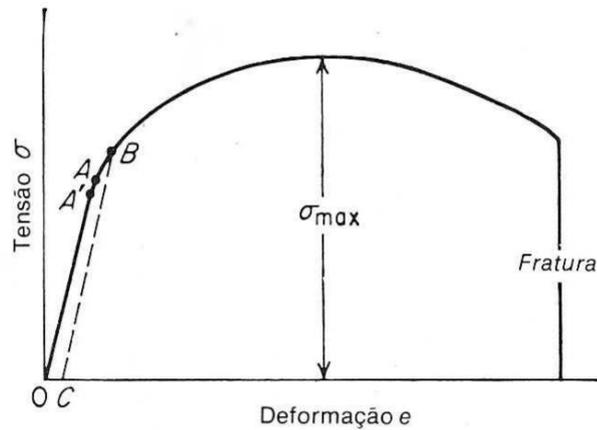
O ensaio consiste em deformar um corpo de prova por força de tração, geralmente até a fratura, para a determinação de uma ou mais propriedades mecânicas, entre elas o Alongamento (AL), Limite de Escoamento (LE), Limite de Resistência (LR), Limite de Ruptura (ABNT, 2013a).

No Brasil, os ensaios de tração são regulamentados pela norma NBR ISO 6892-1.

3.2.1 Diagrama Tensão-Deformação de engenharia

Quando se submete uma barra metálica a uma carga de tração, gradativamente crescente, ela sofre uma deformação progressiva de extensão ou aumento de comprimento. A relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante pode ser representada graficamente mediante um diagrama (ou curva) “*Tensão-Deformação*”, ilustrado na figura 8 (CHIAVERINNI, 1986).

Figura 8 - Diagrama Tensão-Deformação de Engenharia



Fonte: DIETER (2014)

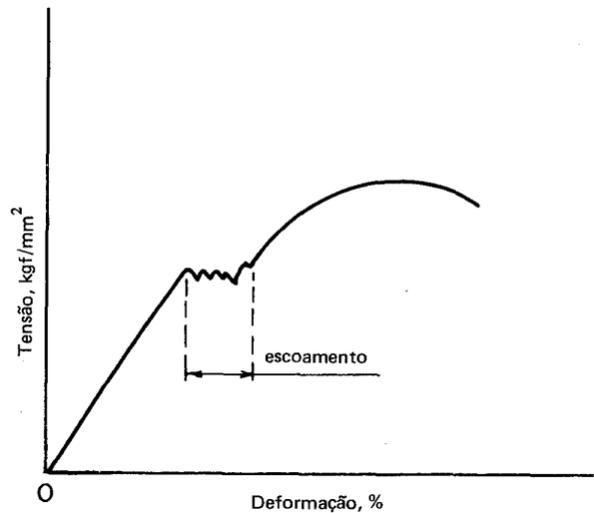
A porção linear inicial do diagrama, AO, é a região elástica onde o ponto A é o limite elástico que pode ser definido como a “tensão máxima que o material pode suportar sem que apresente deformação após a retirada da carga” (DIETER, 1981).

O ponto B é o limite de escoamento convencional que pode ser definido como “a tensão que produz uma pequena quantidade de deformação permanente”, no diagrama essa deformação equivale a OC que geralmente possui o valor de 0,002. (DIETER, 1981)

Com o aumento da carga, o limite elástico é excedido e inicia-se a deformação plástica. Eventualmente, a carga atinge um valor máximo ($\sigma_{\text{máx}}$) denominado limite de resistência a tração. Para um metal dúctil, o diâmetro do corpo de prova começa a decrescer rapidamente ao se ultrapassar o limite de resistência; dessa forma, a carga necessária para continuar a deformação diminui até que haja a fratura do material (DIETER, 1981).

Ademais, alguns metais dúcteis, em particular os aços baixo-carbono, apresentam um fenômeno chamado de “escoamento”, o qual caracteriza o início da fase plástica. Durante o escoamento, verifica-se um grande alongamento sem acréscimo de carga que oscilam entre valores máximos e mínimos. A figura 9 mostra o fenômeno de escoamento. (CHIAVERINI, 1986).

Figura 9 - Diagrama Tensão-Deformação de um metal dúctil com fenômeno de escoamento



Fonte: CHIAVERINI (1986)

3.3 Ensaio de Tração em Temperaturas Elevadas

Neste trabalho, entender-se-á por alta temperatura ou temperatura elevada o patamar superior a 35°C. Essa definição engloba temperaturas que excedem aquelas estabelecidas como ambiente padrão na norma NBR ISO 6892-1. Nesse cenário, haverá variações nos valores de propriedades mecânicas, como Limite de Escoamento, Resistência à Tração e Alongamento, em comparação com os resultados obtidos em condições de temperatura ambiente. (ABNT, 2013b)

No Brasil, os ensaios de tração em temperaturas elevadas são regulamentados pela norma NBR ISO 6892-2.

3.3.1 Efeitos da Temperatura nas Propriedades de Escoamento

O comportamento do diagrama Tensão-Deformação e as características de escoamento e fratura observadas no teste de tração estão significativamente influenciados pela temperatura na qual o teste é conduzido (DIETER, 1981).

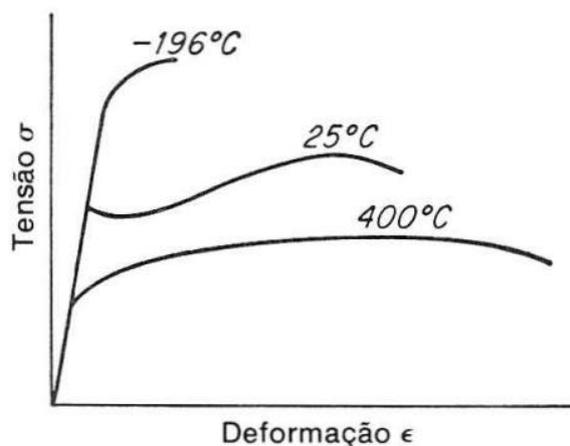
A região plástica dos metais se deve principalmente à movimentação das discordâncias dentro da estrutura cristalina e à mobilidade dos contornos de grão. Com o aumento da temperatura, esses deslocamentos se tornam mais intensos, pois as discordâncias encontram menos resistência para superar obstáculos que a elas se interpõem. Isso resulta na diminuição

da capacidade de encruamento do metal e no aumento do tamanho da zona plástica. (SOUZA, 1982)

De modo geral, observa-se uma redução na resistência e um aumento no alongamento à medida que a temperatura de teste é elevada. No entanto, é importante salientar que transformações estruturais, como precipitação, envelhecimento induzido por deformação ou recristalização, podem ocorrer em intervalos específicos de temperatura, levando a modificações nesse comportamento geral (DIETER, 1981).

A figura 10 ilustra as mudanças no diagrama Tensão-Deformação em diferentes temperaturas.

Figura 10 - Mudanças no diagrama Tensão-Deformação de um aço baixo-carbono com a temperatura



Fonte: DIETER (2014)

3.4 Ensaio de Dureza

A dureza de um material é a resistência à deformação permanente. A determinação da dureza dos metais constitui um método rápido e não-destrutivo que permite avaliar as condições de fabricação e tratamento das ligas, as diferenças na microestrutura locais e a influência dos elementos de liga. Além de correlaciona-se com razoável aproximação com algumas propriedades mecânicas, como a resistência a tração (CHIAVERINI, 1986).

O ensaio de dureza por penetração e por choque são mais usados no ramo da Metalurgia e da Mecânica, sendo a dureza por penetração a mais citada nas especificações técnicas. Os ensaios dureza de baseados no princípio de penetração consistem na aplicação de uma carga

por intermédio de um “penetrador” na superfície do metal. (SOUZA, 1982; CHIAVERINI, 1986).

3.4.1 Ensaio de Dureza Vickers

A escala Vickers foi proposta em 1925 por Smith e Sandland. O nome Vickers é originário da empresa que fabricava as primeiras máquinas deste tipo de ensaio. Nesse ensaio, o penetrador é uma pirâmide de diamante de base quadrada e com ângulo de 136° entre as faces opostas. A Dureza Vickers (HV), deixa na amostra uma impressão que, quando observada com auxílio de um microscópio óptico, tem a geometria de um losango retangular de lado l (PADILHA, 2000).

Como o penetrador é um diamante, ele é praticamente indeformável e como todas as impressões são semelhantes entre si, a dureza Vickers (HV) é independente da carga. Para esse tipo de dureza, a carga varia de 1 até 120 kgf. A mudança de carga é necessária para obter uma impressão regular, sem deformação e de tamanho compatível para a medida de suas dimensões no visor da máquina (SOUZA, 1982).

A dimensão da dureza Vickers é normalmente dada em kg/mm^2 e é definida pelo quociente da carga P pela área de contato: (PADILHA, 2000).

$$HV = \frac{1,8544 P}{l^2} \quad (3)$$

As vantagens do método Vickers são: 1) escala contínua; 2) impressões extremamente pequenas que não inutilizam a peça, grande precisão de medida; 5) deformação nula do penetrador. 6) aplicação em qualquer espessura de material, entre outras. (SOUZA, 1982).

As limitações dos métodos de dureza, principalmente no que se refere a precisão dos resultados em função da espessura das peças levaram ao desenvolvimento dos ensaios de “microdureza”. A microdureza Vickers envolve o mesmo procedimento prático que o ensaio Vickers, porém utiliza cargas menores que 1 kgf. A carga pode ter valores tão pequenos como, por exemplo, 10 gf. (CHIAVERINI, 1986; PADILHA, 2000).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Material

O material utilizado neste trabalho consiste em vergalhões CA-60 ($LE_{\min} = 600$ MPa) fabricados com aço baixo carbono SAE 1018 e com diâmetro de 5 mm. As amostras são de um mesmo lote, cortesia de uma indústria siderúrgica localizada no Estado do Ceará.

A composição química (Tabela 1) foi fornecida pela fabricante.

Tabela 1- Composição em %p do vergalhão

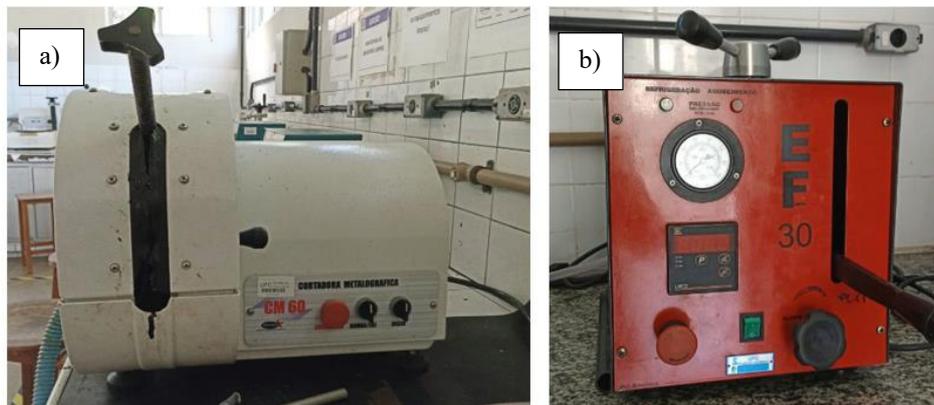
Elemento	C	Mn	Si	P (máx)	S (máx)
% p	0,18	0,70	0,22	0,028	0,027

Fonte: Fabricante

4.2 Metalografia

Após o ensaio de tração, as amostras foram cortadas a cerca de 2cm abaixo da região da fratura com auxílio de uma cortadora metalográfica (figura 11a) e embutidas com auxílio de uma embutidora a quente (figura 11b). Foram preparadas 27 amostras, sendo três do material conforme recebido (controle) e as demais em triplicata para cada temperatura em estudo.

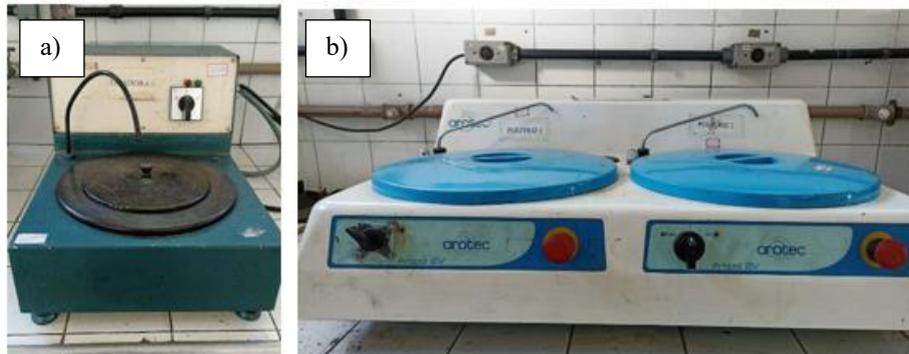
Figura 11 - a) Cortadora Metalográfica; b) Embutidora a quente



Fonte: Elaboração Própria

O procedimento de preparação de amostras para metalografia foi realizado com o auxílio de uma lixadeira/politriz manual (figura 12). E consistiu no lixamento utilizando lixas de 80, 120, 220, 320, 400, 600, 1200 mesh utilizando água como agente lubrificante. Já o polimento foi realizado com pasta de diamante aplicada em pano de polimento 6,3 e 1 μ e com água destilada e detergente neutro como lubrificantes.

Figura 12 - a) Lixadeira; b) Politriz



Fonte: Elaboração Própria

O ataque químico foi realizado com Nital 2% mergulhando a peça na solução e aguardando 10 segundos para prosseguir com a secagem primária, realizada com chumaço de algodão embebido em álcool, e secagem secundária, realizada com jato de ar quente. Em seguida, foi realizado a micrografia utilizando um microscópio ótico Leica DMI 3000 M (figura 13).

Figura 13 - Microscópio ótico Leica DMI 3000M



Fonte: Elaboração Própria

Foram tiradas 27 fotomicrografias, buscou-se em cada uma das amostras quaisquer alteração microestruturais e foi selecionada uma das amostras por temperatura para tirar fotomicrografias com ampliação 200 \times , 500 \times e 1000 \times . A partir das micrografias obtidas, foi possível identificar a microestrutura do material.

Ademais, devido ao diâmetro dos CP's não foi possível confirmar a composição química dos vergalhões. Portanto, com o auxílio do software ImageJ foi possível quantificar cada microestrutura e conseqüentemente o %C, para a amostra de controle utilizando a fotomicrografia com ampliação 500× e escolhendo 4 regiões da imagem para tornar a estimativa mais assertiva, sendo a região 1 a fotomicrografia completa e as demais regiões escolhidas aleatoriamente. Esse procedimento utilizou a norma ASTM E562–11 que estabelece a prática da determinação da fração volumétrica de microconstituintes com base na análise de imagens obtidas por meio de técnicas metalográficas.

4.3 Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizada com auxílio do microdurômetro Shimadzu HMV-2 (figura 14).

Figura 14 - Microdurometro Shimadzu HMV-2



Fonte: Elaboração Própria

Os procedimentos foram realizados segundo a norma ASTM E384 – 22 que regulamenta os métodos de determinação da microdureza dos materiais usando os ensaios Knoop e Vickers. Foram realizadas 3 medições para amostra, com carga de 9,80 N aplicada durante 10 segundos. As amostras utilizadas foram as mesmas preparadas para metalografia.

O ensaio é realizado na seguinte sequência: selecionar o script adequado (carga e tempo), posicionar o corpo de prova, zerar a medição, aplicar a carga, realizar a medição das diagonais e aguardar o resultado do número HV. Em seguida, a partir dos resultados obtidos foram calculados os valores médios de dureza para cada temperatura e, também, o desvio padrão com

auxílio do software Microsoft Excel.

4.4 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) da Universidade Federal do Ceará (UFC), utilizando a máquina de ensaios universais EMIC equipada com forno, figura 15.

Figura 15 - Máquina de Ensaios EMIC DL-10000 equipada com forno resistivo



Fonte: Elaboração Própria

Os procedimentos foram realizados segundo as normas ABNT NBR ISO 6892 e 6892-2 que regulamentam os ensaios de tração em temperatura ambiente e ensaios de tração em temperaturas elevadas, respectivamente.

Os ensaios foram realizados em 8 temperaturas (27°C, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C) com o objetivo de se obter os Limites de escoamento (LE), Limites de Resistência (LR) e Alongamento Percentual (Al). A velocidade de ensaio permaneceu constante, sendo no valor de 5mm/min. Em cada uma das temperaturas o ensaio foi realizado em triplicata para garantir a confiabilidade dos resultados experimentais. Não foi possível realizar ensaios em temperaturas superiores a 700°C devido ao alongamento das amostras serem superiores ao limite de fim de curso da EMIC.

Foram ensaiados 24 corpos de prova (CP), com comprimento inicial (L_0) de 650mm, que foram retirados de segmentos do material recebido. Segundo a NBR 7480/1996, para

ensaios de tração em vergalhões os CP's não devem ser usinados.

Ao longo do comprimento, foram realizadas marcações com riscos que não influenciam a ruptura do material com distância de 10 mm entre os traços. O objetivo dessas marcações é auxiliar a definir o AL do material. Para todas as temperaturas, selecionou-se a velocidade de 5 mm/s.

Na temperatura ambiente ($T = 27^{\circ}\text{C}$), o ensaio pode ser iniciado após o posicionamento do CP, já demarcado, na máquina. O ensaio finaliza com a ruptura do CP.

Já para as demais temperaturas, o forno deve ser configurado na temperatura desejada para o ensaio. Espera-se que sua temperatura estabilize e então o CP é posicionado e mantido dentro do forno. O tempo de encharque de 10 minutos é observado para garantir que a temperatura seja homogênea em toda a peça. Então, o ensaio é iniciado com o CP, ainda no interior do forno, e após o rompimento o CP é retirado do forno e resfriado ao ar em temperatura ambiente.

Ao fim dos ensaios, o comprimento final (L_f) foi medido através da união das duas partes do corpo de prova rompido na mesma posição inicial, de forma que seus eixos estivessem alinhados.

Para determinar o Al utilizou-se a equação:

$$Al = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100 \quad (4)$$

Ao final de cada ensaio foi possível obter uma matriz de dados fornecidos pelo software da EMIC que foram submetidos a tratamento de dados para traçar as curvas *Tensão-Deformação*, bem como os valores para LE, LRT e LR. Com auxílio do software Microsoft Excel, elaborou-se as curvas tensão-deformação para cada temperatura. Além disso, calculou-se as médias aritméticas das propriedades e desvio padrão.

Além disso, elaborou-se, a partir das matrizes de dados, uma curva Tensão-Deformação que representa a média dos 3 CP's de cada temperatura. Para isso, calculou-se a média aritmética de cada ponto dos dados obtidos das triplicatas de cada temperatura.

4.5 Fractografia

Após os ensaios de tração, a região da fratura foi cortada com auxílio da cortadora metalográfica. As amostras com comprimento de cerca de 2cm foram submetidas a ataque químico com Nital 2% durante 1 s para remover a oxidação da região fraturada. Em seguida, foram realizadas fractografias com auxílio do estereoscópio Olympus SZ61TR equipado com guia de luz modelo LG – PS2 (Figura 16).

Figura 16 - Estereoscópio Olympus SZ61TR equipado com guia de luz modelo LG PS2



Fonte: Elaboração Própria

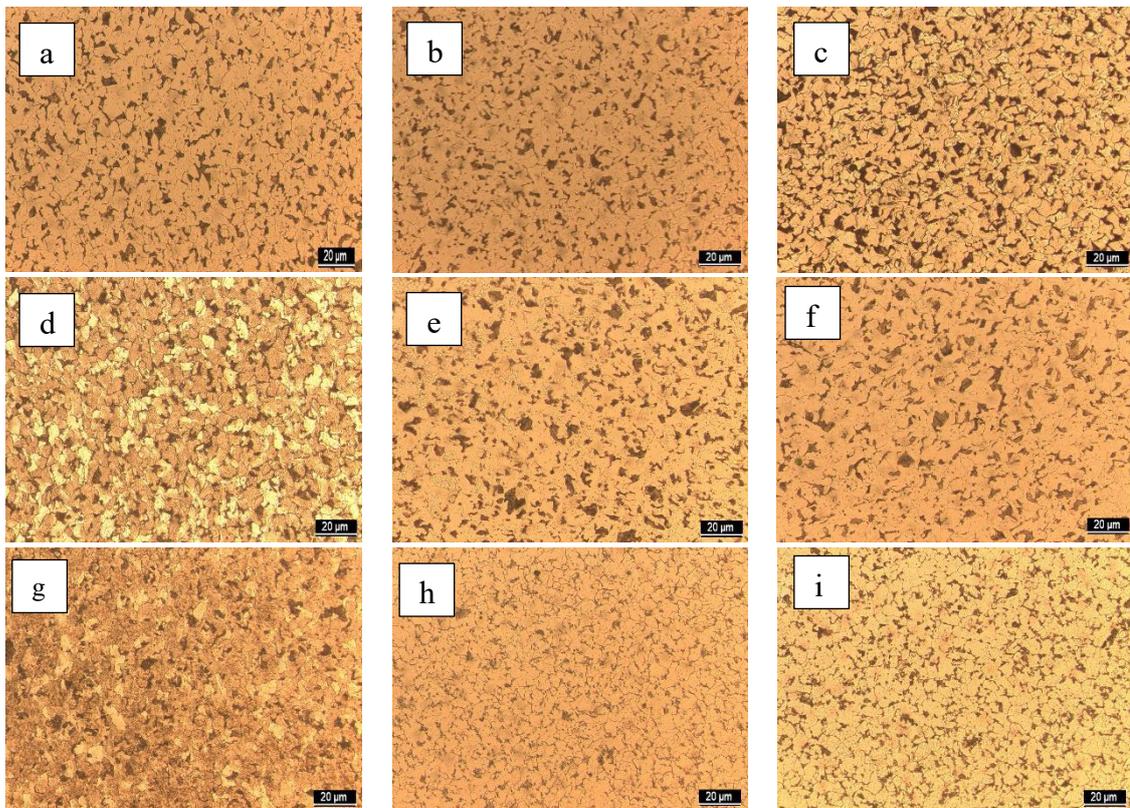
Também foi possível realizar medições do diâmetro da fratura dos CP's, realizou-se a medição de um dos lados da fratura dos CP's escolhido de forma aleatória e retirou-se uma medição em cada CP.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise Micrográfica

A partir da metalografia foram obtidas as seguintes imagens para cada temperatura:

Figura 17 - Fotomicrografias das amostras em estudo a) Controle; b) 27°C; c) 100°C; d) 200°C; e) 300°C; f) 400°C; g) 500°C; h) 600°C; i) 700°C. Ampliação 500x, Escala: 20µm



Fonte: Elaboração Própria

A figura 17a apresenta os grãos orientados numa única direção devido ao processo de conformação a frio e pode-se identificar que a microestrutura é composta por ferrita α (mais clara) e perlita (mais escura).

A quantificação da microestrutura e conseqüentemente a de %pC da amostra de controle revelou os resultados apresentados na tabela 2. Verifica-se que esse de fato é um aço baixo-carbono SAE 1018.

Tabela 2 - Quantificação da microestrutura

Amostra - Controle	%W_a	%W_p	%pC
Região 1	23,9304	76,0696	0,1879
Região 2	22,5732	77,4268	0,1777
Região 3	25,2678	74,7322	0,1980
Região 4	21,5066	78,4974	0,1697
Fonte: Elaboração Própria		Média	0,1833

Analisando as fotomicrografias 17b-i, observa-se que não houve surgimentos de novas fases em nenhuma das amostras. À medida que a temperatura aumenta, ocorre o crescimento dos grãos que causa aumento na deformação. Nas temperaturas de 600° e 700°C observa-se uma microestrutura predominantemente ferrítica com grãos ainda maiores, tornando os grãos mais macios e suscetíveis a deformações plásticas. Isso ocorre porque os contornos de grãos atuam como barreiras à movimentação de discordâncias, e grãos maiores facilitam o deslizamento plástico, resultando em maior deformação antes da falha.

Ademais, é importante salientar que as tensões residuais que podem surgir durante a conformação dos vergalhões e devido aos processos térmicos durante o próprio ensaio interagem de maneiras complexas com o material a temperaturas mais altas, afetando as propriedades mecânicas.

5.2 Ensaio de Tração

A tabela 3 apresenta os valores para LE em cada uma das amostras.

Tabela 3 - Resultados Limite de Escoamento

Limite de Escoamento					
Temperatura (°C)	Tensão (MPa)			Média (MPa)	Desvio Padrão
	CP1	CP2	CP3		
27	714,98	695,04	678,00	696,00	18,51
100	650,15	679,91	688,62	672,90	20,17
200	640,70	665,41	674,33	660,15	17,42
300	631,07	623,33	624,40	626,27	4,20
400	496,52	493,26	481,93	490,57	7,65
500	255,89	244,40	306,01	268,77	32,76
600	89,07	76,37	76,89	80,78	7,19
700	42,22	43,69	47,71	44,54	2,84

Fonte: Elaboração Própria

A tabela 4 apresenta os valores para LRT em cada uma das amostras.

Tabela 4 - Resultados Limite de Resistência a Tração

Limite de Resistência a Tração					
Temperatura (°C)	Tensão (MPa)			Média (MPa)	Desvio Padrão
	CP1	CP2	CP3		
27	772,64	778,93	767,41	772,99	5,77
100	744,47	765,50	770,75	760,24	13,91
200	711,05	702,50	749,51	721,02	25,04
300	705,91	695,92	697,30	699,71	5,41
400	499,27	499,09	488,28	495,55	6,29
500	259,16	250,75	310,13	273,35	32,13
600	95,08	83,75	85,99	88,27	6,00
700	42,90	44,20	49,43	45,51	3,45

Fonte: Elaboração Própria

A tabela 5 apresenta os valores para LR em cada uma das amostras.

Tabela 5 - Resultados Limite de Ruptura

Limite de Ruptura					
Temperatura (°C)	Tensão (MPa)			Média (MPa)	Desvio Padrão
	CP1	CP2	CP3		
27	641,77	664,90	659,50	655,39	12,10
100	548,71	528,51	585,42	554,21	28,85
200	599,84	583,55	630,65	604,68	23,92
300	517,98	546,61	533,06	532,55	14,32
400	259,50	266,54	284,22	270,09	12,74
500	51,66	114,98	161,50	109,38	55,13
600	43,07	32,95	50,97	42,33	9,03
700	24,54	33,39	27,12	28,35	4,55

Fonte: Elaboração Própria

A tabela 6 apresenta os valores para AL em cada uma das amostras.

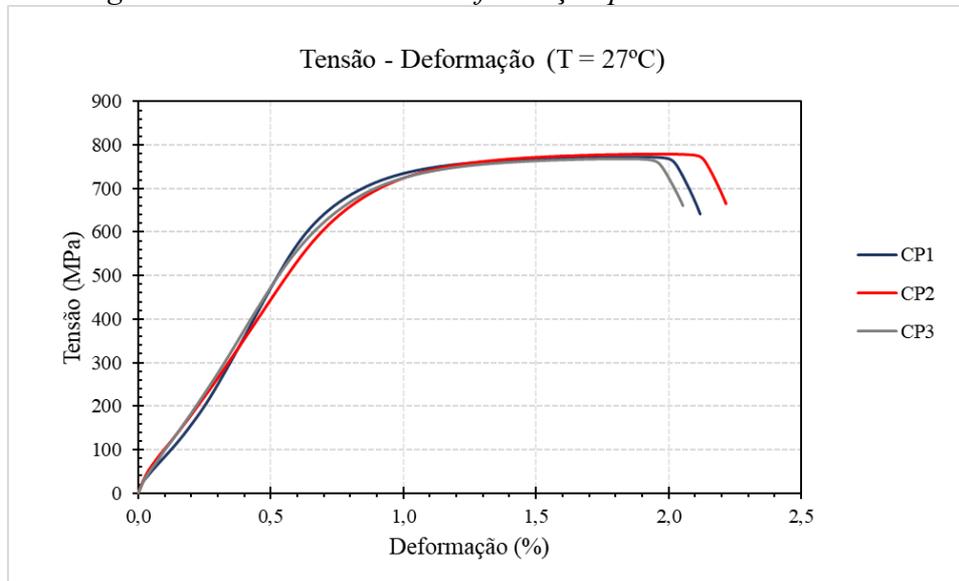
Tabela 6 - Resultados Alongamento

Alongamento					
Temperatura (°C)	Alongamento (%)			Média (%)	Desvio Padrão
	CP1	CP2	CP3		
27	2,15	2,22	2,10	2,16	0,06
100	1,70	1,80	2,30	1,93	0,32
200	2,21	1,84	2,21	2,09	0,21
300	3,26	3,49	3,61	3,45	0,18
400	3,16	3,02	2,97	3,05	0,10
500	3,73	3,39	4,51	3,88	0,57
600	10,40	9,81	9,41	9,87	0,50
700	15,10	12,93	13,59	13,87	1,11

Fonte: Elaboração Própria

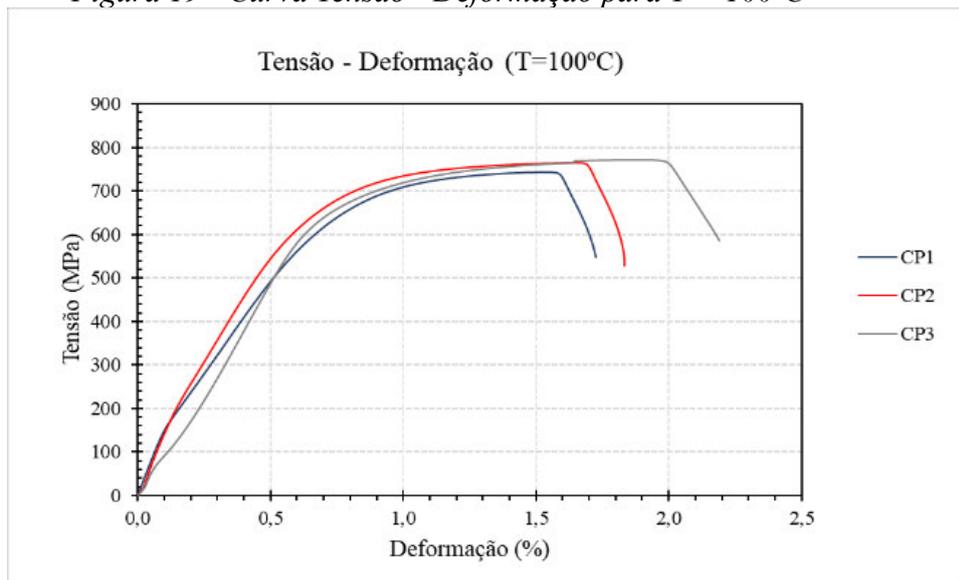
As figuras 18 a 25 mostram as Curvas Tensão-Deformação elaboradas através das matrizes de dados obtidas nos ensaios de tração.

Figura 18 - Curva Tensão - Deformação para $T = 27^{\circ}\text{C}$



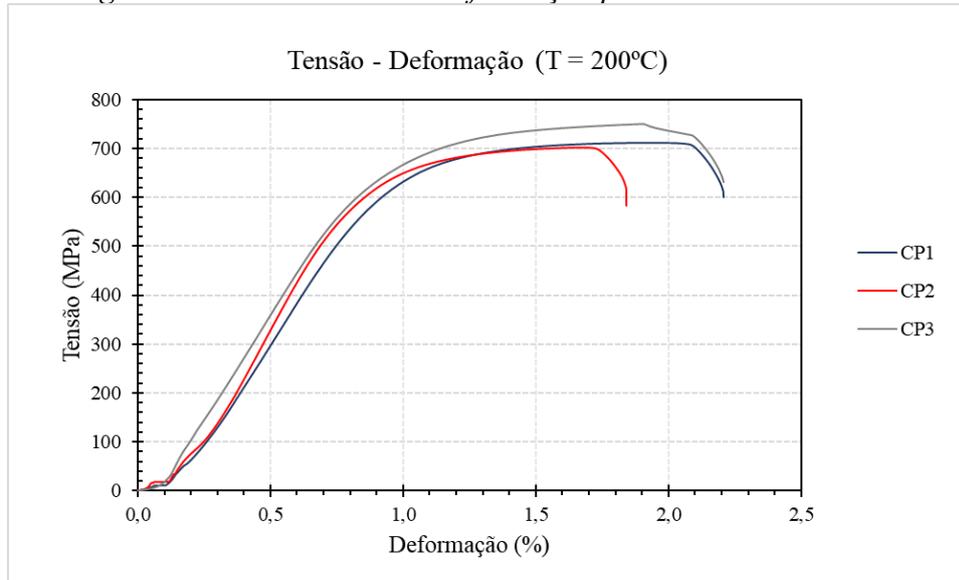
Fonte: Elaboração Própria

Figura 19 - Curva Tensão - Deformação para $T = 100^{\circ}\text{C}$



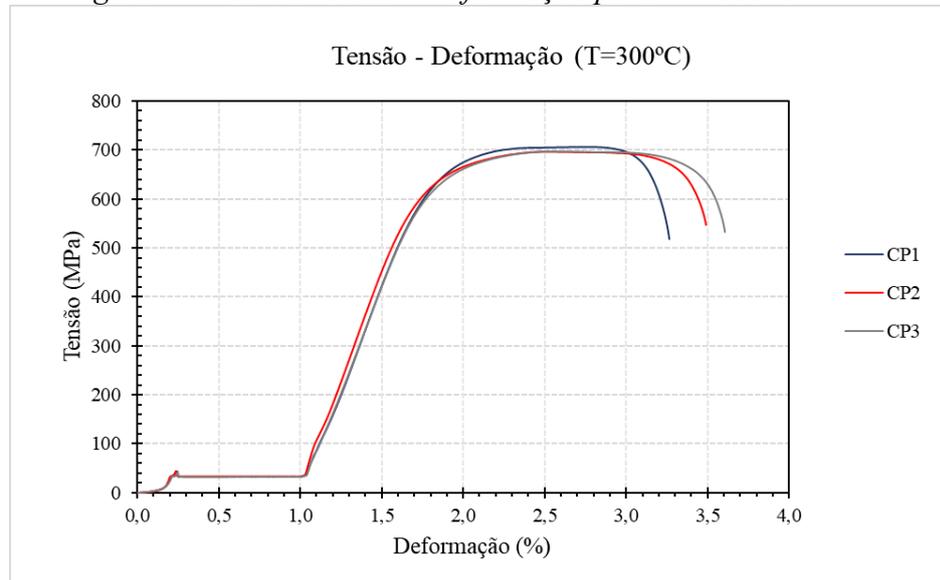
Fonte: Elaboração Própria

Figura 20 - Curva Tensão - Deformação para $T = 200^{\circ}\text{C}$

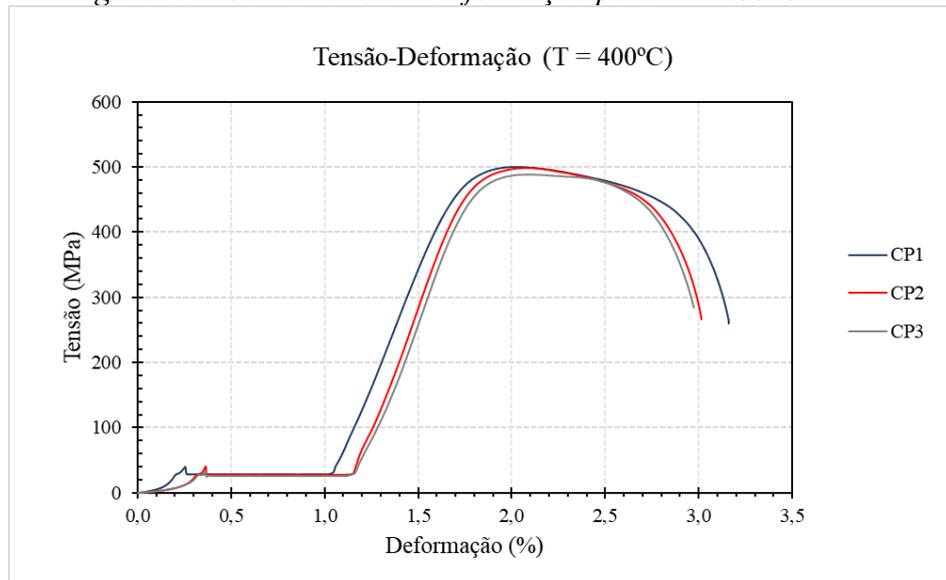


Fonte: Elaboração Própria

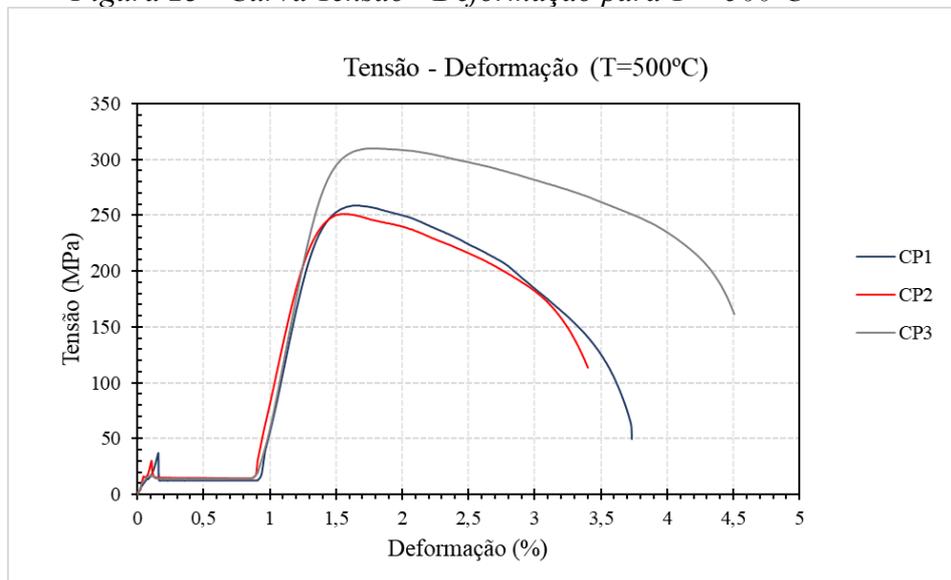
Figura 21 - Curva Tensão - Deformação para $T = 300^{\circ}\text{C}$



Fonte: Elaboração Própria

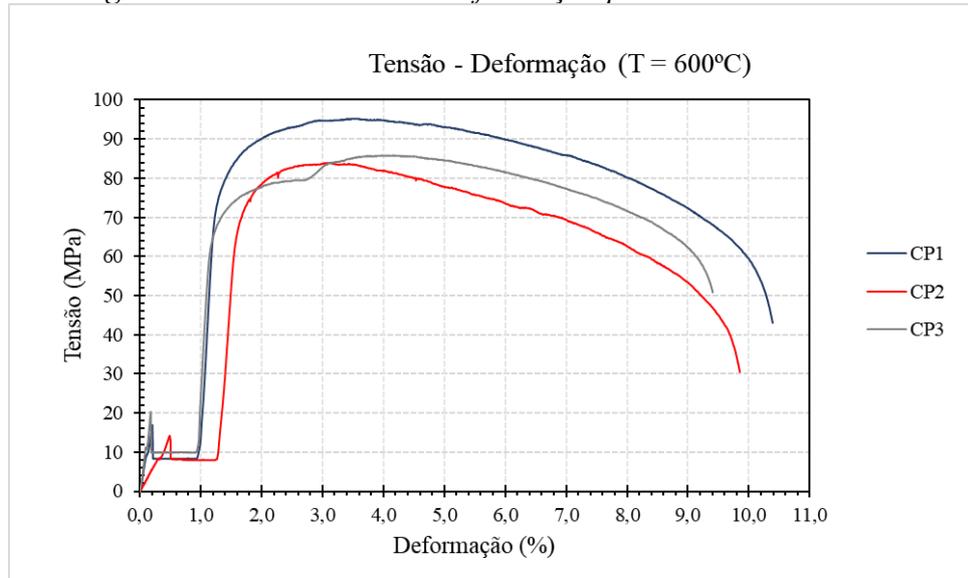
Figura 22 - Curva Tensão - Deformação para $T = 400^{\circ}\text{C}$ 

Fonte: Elaboração Própria

Figura 23 - Curva Tensão - Deformação para $T = 500^{\circ}\text{C}$ 

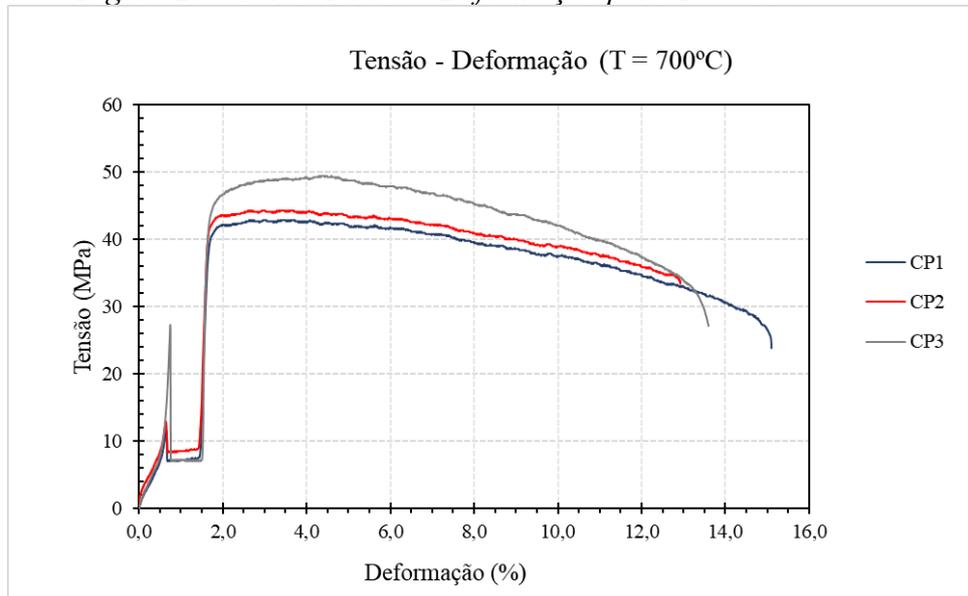
Fonte: Elaboração Própria

Figura 24 - Curva Tensão - Deformação para $T = 600^{\circ}\text{C}$



Fonte: Elaboração Própria

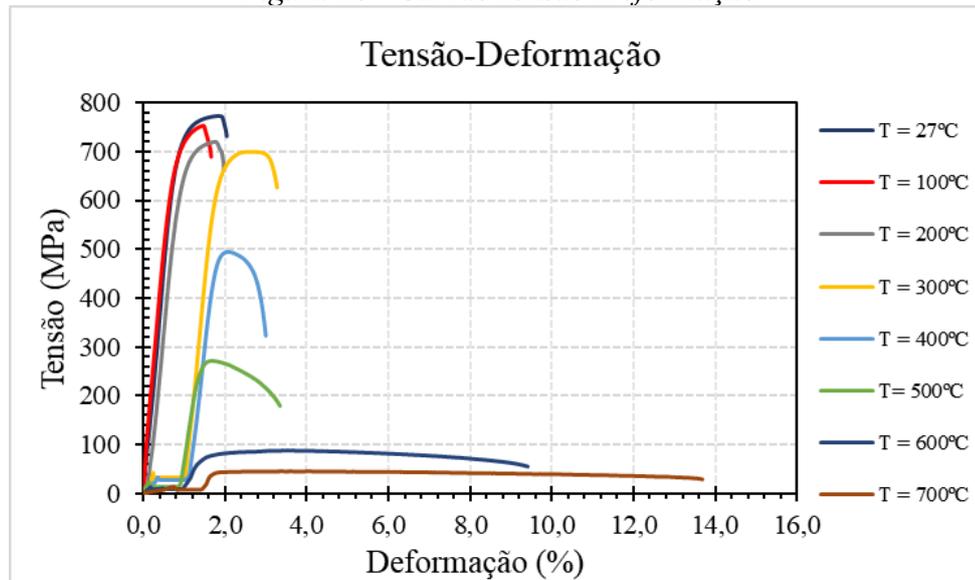
Figura 25 - Curva Tensão - Deformação para $T = 700^{\circ}\text{C}$



Fonte: Elaboração Própria

A figura 26 faz um comparativo entre as Curvas Tensão – Deformação em cada temperatura que representa os valores médios dos CP's. Para sua obtenção, realizou-se a média aritmética dos pontos das matrizes de dados dos três CP's de cada temperatura. Analisar-se-á o comportamento do material mediante essa figura e pelas tabelas 3,4,5 e 6 objetivando simplificar a observação dos resultados obtidos.

Figura 26 - Curvas Tensão-Deformação



Fonte: Elaboração Própria

Na temperatura ambiente ($T = 27^{\circ}\text{C}$), o material apresenta o comportamento típico de materiais metálicos: apresenta uma região elástica inicial onde a tensão aumenta linearmente com a deformação e após o limite de proporcionalidade entra na região de escoamento plástico no qual a tensão aumentará de forma constante com a deformação até atingir o ponto de ruptura.

Nas temperaturas de 100°C e 200°C temos um comportamento semelhante ao da temperatura ambiente. Na temperatura de 100°C observa-se uma leve diminuição nos valores de LE, LRT, LR e AL quando comparados a temperatura ambiente (ver tabelas 3,4,5 e 6).

A diminuição do alongamento é um resultado contrário ao esperado. Entretanto o baixo desvio padrão revela a homogeneidade dos dados, e uma vez que não foram observadas mudanças relevantes na microestrutura, o valor obtido pode estar relacionado a variações das propriedades físicas e mecânicas inerentes ao material relacionados a variação de composição ou leve variação na microestrutura devido ao processo de fabricação do material.

Na temperatura de 200° temos diminuição do LE, LRT, LR e aumento no AL devido a deformação causadas pela temperatura que leva a aumentar a energia do material que promove o movimento atômico e a migração de discordâncias facilitando o deslizamento dos planos cristalinos. Dessa forma, a deformação plástica do material ocorre com mais facilidade.

Nas temperaturas de 300°C , 400°C e 500°C , observa-se que antes do regime elástico, o material apresenta um patamar onde ocorre deformação com tensão constante devido ao aumento da temperatura que faz com que haja dilatação do material sem ser necessário que a

carga aplicada pela máquina de ensaio aumente para gerar deformação.

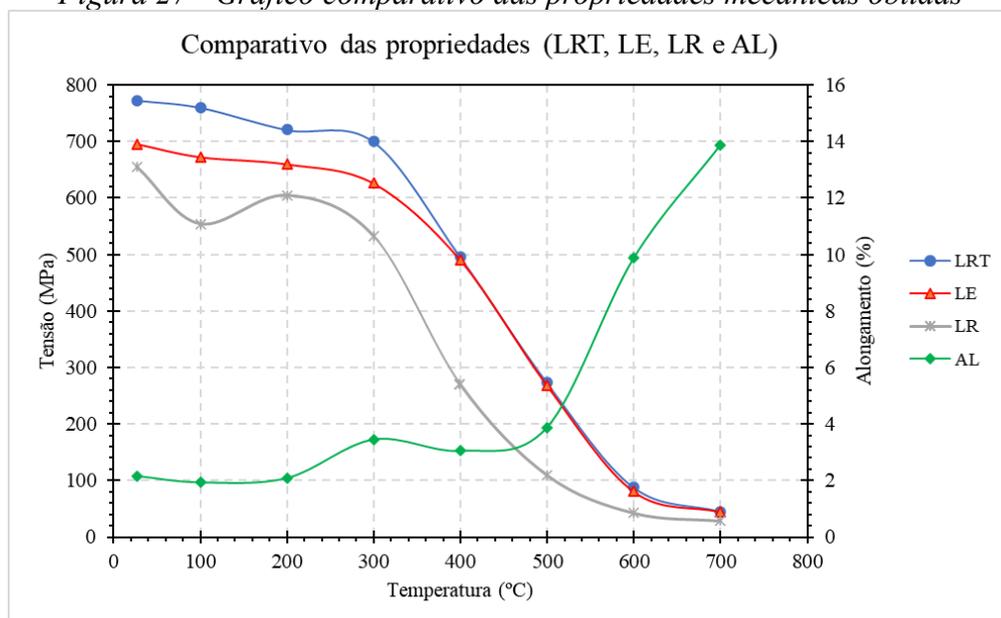
Nessas temperaturas, verifica-se a diminuição do LE, LRT e LR que se torna bastante evidente com o aumento da temperatura. Verifica-se que há um aumento no AL em 300°C e 500°C, entretanto há uma diminuição no AL na temperatura de 400°C quando comparado a temperatura anterior. Isso pode ter ocorrido devido ao crescimento dos grãos levarem a uma maior propensão ao início da falha, resultando em uma menor deformação plástica antes da ruptura. Grãos maiores podem atuar como locais de concentração de tensão, promovendo um comportamento mais frágil.

Nas temperaturas de 600°C e 700°C, o material sofre significativa redução do LE, LRT e LR. Isso se deve ao amolecimento causado pela temperatura elevada, o que leva a uma diminuição acentuada na tensão máxima que o material pode suportar antes da ruptura. Ou seja, a deformação plástica é mais pronunciada, o material torna-se mais dúctil e a ruptura ocorre com menos tensão devido à maior mobilidade atômica proporcionada pela temperatura elevada.

As curvas Tensão-Deformação nessas temperaturas se assemelham ao comportamento de recuperação dinâmica, apresentando um patamar de “estágio estacionário” na região de deformação plástica onde temos uma estabilização da tensão à medida que o material é deformado devido a quantidade de defeitos permanecer constante. Ademais, é perceptível o aumento grande aumento do AL devido a esse fenômeno.

A figura 27 apresenta um gráfico comparativo dos valores médios de LE, LRT, LR e AL para cada uma das temperaturas.

Figura 27 - Gráfico comparativo das propriedades mecânicas obtidas



Fonte: Elaboração Própria

Através dessa figura é possível identificar as tendências gerais das propriedades mecânicas em relação à temperatura. Em síntese, as propriedades LRT, LE, LR diminuem com o aumento da temperatura enquanto o AL aumenta.

5.3 Ensaios de Microdureza

A tabela 7 apresenta os valores médios obtidos no ensaio de microdureza Vickers obtidos das amostras após resfriamento, no estado lixado e polido.

Tabela 7 - Resultados de Microdureza

Resultados Microdureza (HV)					
Temperatura (°C)	Microdureza (HV)			Média (HV)	Desvio Padrão
	CP1	CP2	CP3		
27	254	257	259	257	2,51
100	255	254	256	255	1,00
200	248	250	249	249	1,00
300	231	233	237	234	3,06
400	211	213	218	214	3,60
500	189	185	180	186	4,51
600	154	158	150	153	4,00
700	149	150	145	148	2,64

Fonte: Elaboração Própria

Devido ao crescimento dos grãos, verifica-se uma redução do valor de microdureza refletindo as mudanças microestruturais. O decréscimo de 57,5%, comparando a dureza a 27 °C e após ensaio de tração a 700°C, é bastante expressivo.

Quanto em relação as propriedades mecânicas obtidas, nota-se que à medida que a temperatura aumenta, as propriedades LE, LRT e LR possuem tendência a diminuir. Isso é consistente com a observação de redução na microdureza (as medidas foram obtidas após o resfriamento dos CP's), haja vista com maior deformação plástica a tendência do material é apresentar valores mais baixos dessas propriedades.

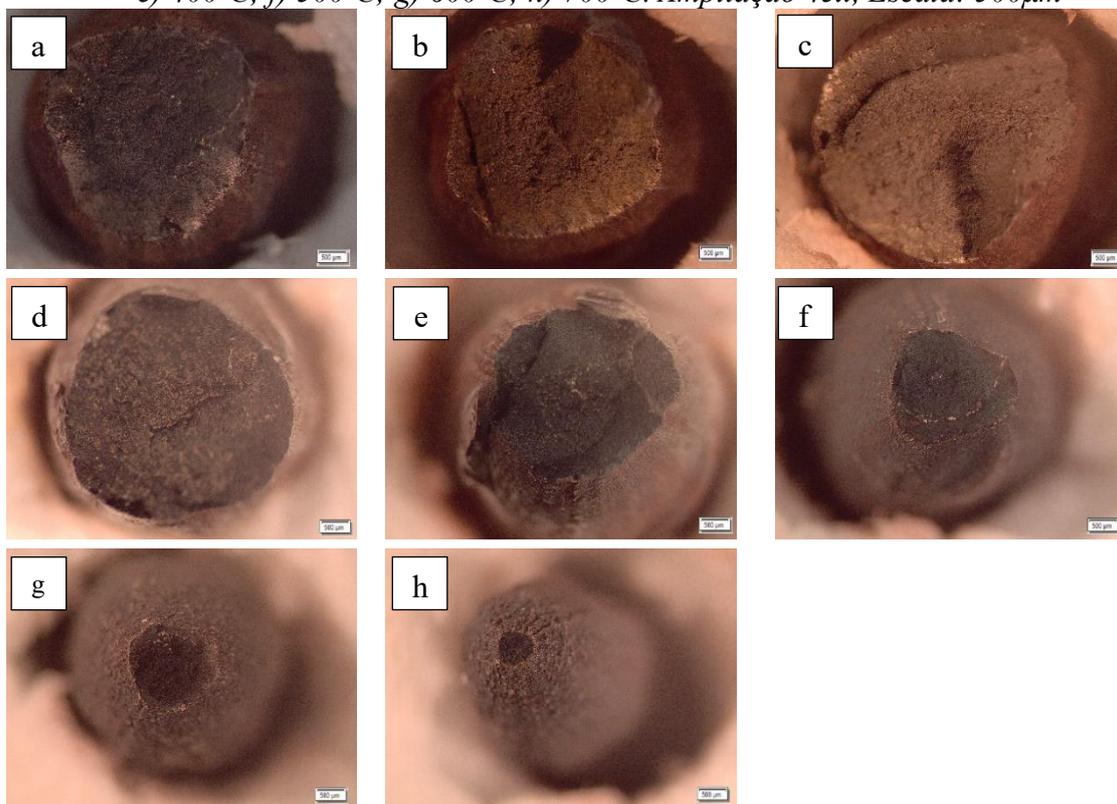
Já o aumento do AL observado é coerente com a natureza dúctil da fratura e com a redução da microdureza, haja vista que a maior capacidade de deformação plástica gera maior

deformação.

5.4 Análise Fractográfica

A imagem 21 apresenta as fractografias obtidas das espécies em análise.

Figura 28 - Fotomicrografias das amostras em estudo a) 27°C; b) 100°C; c) 200°C; d) 300°C; e) 400°C; f) 500°C; g) 600°C; h) 700°C. Ampliação 45x, Escala: 500µm



Fonte: Elaboração Própria

Inferese-se que as amostras apresentaram fratura de natureza dúctil caracterizada pela superfície rugosa, ausência de trincas propagadoras, presença de “empescoçamento” e alongamento expressivo nas amostras. A ausência de trincas propagadoras indica que a fratura ocorreu de maneira progressiva, sem o surgimento repentino de falhas.

Além disso, nota-se que o diâmetro da superfície da fratura é reduzido à medida que a temperatura aumenta. A tabela 8, mostra as medidas médias do diâmetro da superfície da fratura.

Tabela 8 - Medidas médias do diâmetro da superfície da fratura

Resultados Diâmetro da Fratura (mm)					
Temperatura (°C)	Diâmetro da Fratura (mm)			Média (mm)	Desvio Padrão
	CP1	CP2	CP3		
27	3,00	4,00	3,50	3,50	0,50
100	3,11	3,59	3,68	3,46	0,31
200	3,05	3,37	3,68	3,37	0,32
300	3,17	3,27	3,28	3,24	0,06
400	2,98	3,06	3,09	3,04	0,05
500	1,93	1,92	2,19	2,01	0,15
600	1,45	1,29	1,36	1,37	0,08
700	0,89	0,55	0,45	0,63	0,23

Fonte: Elaboração Própria

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos através dos ensaios performados, podemos concluir sobre o comportamento do material em diferentes temperaturas:

1. Observa-se uma tendência clara de redução dos parâmetros LE, LRT e LR à medida que a temperatura aumenta, acompanhada por um aumento na deformação plástica dos vergalhões. Esse comportamento indica uma maior capacidade de deformação do material em temperaturas mais elevadas que gera um aumento no AL.
2. O material mantém suas propriedades praticamente inalteradas até $T = 300^{\circ}\text{C}$.
3. A análise da microestrutura revela que o aumento na granulação contribui diretamente para a diminuição da resistência mecânica do material, tornando os vergalhões mais macios.
4. Os resultados do ensaio de microdureza Vickers revelam que a diminuição gradual na medida de dureza devido ao aumento da temperatura corrobora as observações anteriores. A redução na microdureza está diretamente ligada às mudanças microestruturais, em particular ao crescimento dos grãos.
5. Os resultados da análise fractográfica indicam que os vergalhões estudados sofrem fratura dúctil. A presença de uma superfície de fratura rugosa, a ausência de trincas propagadoras, a ocorrência de "empescoçamento" e um alongamento expressivo nas amostras são características desse tipo de fratura.

Em síntese, os resultados consolidados indicam que a aplicação de tensão em diferentes temperaturas desencadeia alterações nas propriedades mecânicas do material.

Essa compreensão profunda das relações entre temperatura, microestrutura e propriedades mecânicas é crucial para a avaliação e o projeto eficaz de materiais em condições específicas de operação.

7 TRABALHOS FUTUROS

Pode-se realizar um estudo em diferentes produtos, como em placas e barras, ou em diferentes materiais.

É possível realizar ensaios para outras temperaturas, variar a velocidade do ensaio e os diâmetros dos vergalhões.

Efetuar o emprego softwares de modelagem computacional do comportamento mecânico.

É possível realizar uma avaliação de resistência a corrosão dos vergalhões em diferentes temperaturas.

Aprofundar-se no estudo de métodos de tratamentos térmicos para melhoria das propriedades mecânicas desse material, bem como avaliar a viabilidade econômica do tratamento térmico.

Realizar o experimento em vergalhões de aço médio carbono e comparar as propriedades obtidas.

Aprofundar-se no estudo de discordâncias, difusão e outros fenômenos que são influenciados pela temperatura.

Obter padrão de difração, mapa de tensão residuais, mapa de dureza e fractografias com maior magnificação para melhor análise dos resultados.

REFERÊNCIAS

AÇO VERDE DO BRASIL. **AVB | Fio Máquina**. Disponível em: <<https://avb.com.br/fio-maquina/>>. Acesso em: 29 ago. 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Standart E 562-11: Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count**. West Conshohocken, EUA: ASTM International, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E384: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. West Conshohocken, EUA: ASTM International, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480: Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-1: Ensaio de Tração - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-2: Materiais metálicos — Ensaio de tração Parte 2: Método de ensaio à temperatura elevada**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013b.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 9^a. ed. New York: Wiley-Blackwell, 2014.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas**. 2^a. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986a. v. 1

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento**. 2^a. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986b. v. 2

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7^a. ed. Sao Paulo: ABM, 2005.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4^a. ed. São Paulo: Blücher, 2008.

COSTA E SILVA, A. L.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 3^a. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

DAROIT, M. **Estudo de aço microligado ao vanádio para produção de barra nervurada para concreto armado com característica de soldabilidade segundo a norma ABNT NBR 8965:1985**. Tese de Mestrado—Universidade Federal do Rio Grande do Sul: [s.n.].

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2^a. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

FIGUEIREDO, A. Aço para Componentes de Concreto. In: **Manual Técnico de Drenagem e Esgoto Sanitário**. São Paulo: ABTC, 2008. p. 178.

HERNADEZ, M. et al. Microstructure and mechanical properties correlation for the steel: A comparative methodology of educational research for physics and mechanical engineering trainings. **International Journal of Physical Sciences**, v. 12, n. 23, p. 322–328, 16 dez. 2017.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestrutrua e propriedades**. São Paulo (Sp): Hemus, 2000.

SOUZA, S. A. DE. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5^a. ed. São Paulo: Bluncher, 1982.

TSCIPTSCHIN, A. P. et al. **Textura e Relações de Orientação: deformação plástica, recristalização, crescimento de grão**. 1. ed. São Paulo: Editora EPUSP-IPEN IPT, 2003.