

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DIEGO MAIA NICOLAU**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE AMOSTRAS DE VERGALHÕES CA-50**  
**SUBMETIDOS AO TESTE DE TRAÇÃO PARA VERIFICAÇÃO DE SUAS**  
**ESPECIFICAÇÕES**

**Varginha**  
**2020**

**DIEGO MAIA NICOLAU**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE AMOSTRAS DE VERGALHÕES CA-50  
SUBMETIDOS AO TESTE DE TRAÇÃO PARA VERIFICAÇÃO DE SUAS  
ESPECIFICAÇÕES**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Me. Fabiano Farias de Oliveira.

**Varginha**

**2020**

**DIEGO MAIA NICOLAU**

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE AMOSTRAS DE VERGALHÕES CA-50  
SUBMETIDOS AO TESTE DE TRAÇÃO PARA VERIFICAÇÃO DE SUAS  
ESPECIFICAÇÕES**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em     /     /

---

Prof.

---

Prof.

---

Prof.

OBS.:

Dedico este trabalho aos meus pais Elzio e Marildes e meus irmãos Douglas e Elane por todo o incentivo e suporte durante os anos de faculdade. À minha namorada Amanda pela compreensão e apoio em todos os fins de semana dedicados aos estudos e também aos meus amigos da faculdade, que permitiram que essa caminhada fosse mais alegre.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus, que em sua infinita sabedoria colocou força em meu coração para vencer essa etapa de minha vida. À todos os professores, pelo conhecimento compartilhado ao longo desses anos, em especial ao professor Fabiano, orientador deste projeto.

"Não se pode aprender algo de uma lição sem dor, já que não se pode ganhar algo sem algum sacrifício. Mas quando essa dor é superada e a lição incorporada, o resultado é um coração infalível, de aço."

Hiromu Arakawa

## RESUMO

Desde os primórdios de sua fabricação, o aço tornou-se fundamental para o desenvolvimento da civilização. Hoje, sua ampla utilização na construção civil faz com que seu processo de fabricação seja extremamente rigoroso, com o intuito de obter o máximo de suas propriedades. Com o grande crescimento da siderurgia no Brasil, decorrente do desenvolvimento da construção civil, a demanda e a oferta deste produto estão crescendo cada vez mais, e por isso se faz necessário um produto de qualidade. Nesta perspectiva, este trabalho se propôs a investigar as características físicas e mecânicas de amostras de vergalhão CA-50 de três fabricantes distintas, X, Y e Z, com o propósito de averiguar qual o comportamento destes produtos mediante o ensaio de tração simples. Para isso, foram escolhidos vergalhões de 8 milímetros de diâmetro (5/16”), e com os resultados obtidos durante os ensaios foi possível elaborar tabelas e gráficos que auxiliaram na comparação das propriedades de cada marca. Com a realização dos ensaios, pôde-se observar que uma marca se sobressaiu às outras em relação a algumas propriedades mecânicas extremamente importantes para um vergalhão, ainda que todas as marcas tenham atendido os requisitos mínimos dispostos na norma NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação, norma brasileira que garante a qualidade dos aços para a construção civil.

**Palavras-chave:** Aço. Vergalhão CA-50. Propriedades mecânicas. Ensaio de tração.

## **ABSTRACT**

*Since the beginning of its manufacture, steel has become fundamental for the development of civilization. Today, its wide use in civil construction makes its manufacturing process extremely rigorous, in order to obtain the maximum of its properties. With the great growth of the steel industry in Brazil, due to the development of civil construction, the demand and the offer of this product are growing more and more, and that is why a quality product is needed. In this perspective, this work aimed to investigate the physical and mechanical characteristics of CA-50 rebar samples from three different manufacturers, X, Y and Z, with the purpose of verifying what the behavior of these products is through the simple tensile test. For this purpose, rebar 8 mm in diameter (5/16") was chosen, and with the results obtained during the tests it was possible to elaborate tables and graphs that helped in the comparison of the properties of each brand. With the tests, it was possible to observe that one brand stood out from the others in relation to some extremely important mechanical properties for a rebar, even though all brands have met the minimum requirements set out in the NBR 7480 standard: Steel for the reinforcement of concrete structures - Specification, Brazilian standard that guarantees the quality of steels for civil construction.*

**Keywords:** *Steel. Rebar CA-50. Mechanical properties. Tensile test.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de classificação para as várias ligas ferrosas.....	17
Figura 2 - Processo de produção do aço .....	19
Figura 3 - Funcionamento do alto forno .....	20
Figura 4 - Conversor LD .....	21
Figura 5 - Forno Elétrico a Arco .....	22
Figura 6 - Lingotamento Contínuo (à esquerda) e Lingotamento Convencional (à direita) ....	24
Figura 7 - Processo de Laminação.....	25
Figura 8 - Requisitos dimensionais para vergalhão CA-50.....	31
Figura 9 - Barra submetida ao esforço de tração .....	34
Figura 10 - Diagrama Tensão x Deformação .....	35
Figura 11 - Corpo de prova de (a) seção circular e (b) seção retangular.....	38
Figura 12 - Macrografia de uma junta de aço estrutural soldada .....	39
Figura 13 - Micrografia de um aço VND após Têmpera e Recozimento. Ataque de nital 3% (400x) .....	41
Figura 14 - Amostras de vergalhão das marcas X, Y e Z.....	44
Figura 15 - Esmerilhadeira Angular de 4 ½” DeWALT .....	44
Figura 16 - Disco de corte EHT SG STEELOX PFERD .....	45
Figura 17 - Trena emborrachada Supremo 3m .....	45
Figura 18 - Balança de precisão AND HR-120.....	45
Figura 19 - Extensômetro eletrônico NCS .....	46
Figura 20 - Máquina de ensaio de tração PANTEC PANAMBRA .....	46
Figura 21 - Ensaio de tração em um dos corpos-de-prova .....	49
Figura 22 - Estricção no CP ocasionada pelo ensaio, momentos antes da ruptura .....	49
Figura 23 - Corpos-de-prova após a realização do ensaio de tração .....	50
Figura 24 - Comparativo entre os valores médios das densidades lineares das marcas X, Y e Z .....	52
Figura 25 - Comparativo entre os valores médios dos diâmetros efetivos das marcas X, Y e Z .....	53
Figura 26 - Tensão de Escoamento média das amostras .....	55
Figura 27 - Resistência máximas das amostras .....	55
Figura 28 - Alongamento total médio das amostras (%).....	56
Figura 29 - Curvas Tensão x Deformação médias das amostras .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre o processamento, microestrutura e as propriedades do aço.....	28
Tabela 2 - Características das barras .....	32
Tabela 3 - Valores mínimos de tração para barras e fios de aço destinados a armadura para concreto armado .....	33
Tabela 4 - Dados físicos obtidos e calculados para a marca X.....	50
Tabela 5 - Dados físicos obtidos e calculados para a marca Y.....	51
Tabela 6 - Dados físicos obtidos e calculados para a marca Z.....	51
Tabela 7 - Propriedades mecânicas das amostras de vergalhões da marca X .....	54
Tabela 8 - Propriedades mecânicas das amostras de vergalhões da marca Y .....	54
Tabela 9 - Propriedades mecânicas das amostras de vergalhões da marca Z.....	54

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Tensão média de tração.....	34
Equação 2 - Deformação linear média .....	34
Equação 3 - Força elástica da mola .....	36
Equação 4 - Lei de Hooke .....	36
Equação 5 - Limite de escoamento.....	37
Equação 6 - Limite de resistência.....	37
Equação 7 - Coeficiente de estricção.....	37
Equação 8 - Densidade linear de massa.....	47
Equação 9 - Densidade (massa específica).....	47
Equação 10 – Diâmetro efetivo de um cilindro.....	47
Equação 11 - Diâmetro efetivo de um vergalhão CA-50, em metros.....	48
Equação 12 - Diâmetro efetivo de um vergalhão CA-50, em milímetros .....	48

## LISTA DE SÍMBOLOS

FeO	Óxido de Ferro
Fe	Ferro
C	Carbono
Mn	Manganês
Si	Silício
S	Enxofre
P	Fósforo
N <sub>2</sub>	Gás Nitrogênio
<	Menor
>	Maior
Cr	Cromo
V	Vanádio
Mo	Molibdênio
±	Mais ou menos
L <sub>0</sub>	Comprimento inicial
σ	Tensão média de tração
Q	Força de tração
S <sub>0</sub>	Seção transversal uniforme / inicial
ε	Deformação linear
ΔL	Variação do comprimento
P	Força elástica da mola
k	Constante elástica da mola
x	Deformação da mola
E	Módulo de Young
σ <sub>e</sub>	Tensão de escoamento
Q <sub>e</sub>	Força de escoamento
σ <sub>r</sub>	Tensão de ruptura
Q <sub>r</sub>	Força de ruptura
S <sub>f</sub>	Seção final
φ	Coefficiente de estricção
SiC	Carboneto de silício
”	Polegadas

$\mu$	Densidade linear
m	Massa
$\rho$	Densidade
v	Volume
L	Comprimento
$\pi$	Constante pi
$\Phi$	Diâmetro efetivo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Ligas metálicas ferrosas .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Aço .....</b>	<b>18</b>
2.2.1 Processo de fabricação .....	18
2.2.1.1 Redução .....	19
2.2.1.2 Aciaria (Refino).....	21
2.2.1.3 Lingotamento.....	23
2.2.1.4 Laminação .....	24
<b>2.3 Classificação dos aços.....</b>	<b>25</b>
2.3.1 Classificação normativa.....	25
2.3.2 Classificação quanto à composição química .....	26
2.3.3 Classificação quanto ao processamento .....	27
2.3.4 Classificação quanto à microestrutura.....	28
2.3.5 Classificação quanto à aplicação .....	29
<b>2.4 Aços Estruturais .....</b>	<b>29</b>
2.4.1 Vergalhão para concreto.....	30
2.4.1.1 Características geométricas de barras nervuradas - Categoria CA-50 .....	31
2.4.1.2 Massa, comprimento e tolerância .....	32
2.4.1.3 Ensaio de tração das barras.....	32
<b>2.5 Ensaio de tração convencional .....</b>	<b>33</b>
2.5.1 Tensão e deformação na tração .....	34
2.5.2 Propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de tração .....	24
2.5.3 Corpo de prova .....	37
<b>2.6 Metalografia .....</b>	<b>38</b>
2.6.1 Ensaio metalográfico .....	39
2.6.1.1 Macrografia .....	39
2.6.1.1.1 Preparo de corpos-de-prova para macrografia.....	40
2.6.1.2 Micrografia .....	41
2.6.1.2.1 Microscopia Ótica .....	42
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1 Materiais e Equipamentos .....</b>	<b>44</b>
<b>3.2 Caracterização das propriedades físicas .....</b>	<b>47</b>
3.2.1 Procedimento de cálculo da densidade linear de massa ( $\mu$ ) .....	47
3.2.2 Procedimento de cálculo do diâmetro efetivo ( $\Phi$ ).....	47
<b>3.3 Caracterização das propriedades mecânicas .....</b>	<b>48</b>
3.3.1 Dados obtidos após o Ensaio de Tração .....	48
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1 Propriedades físicas.....</b>	<b>50</b>
<b>4.2 Propriedades mecânicas.....</b>	<b>53</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>58</b>

**6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ..... 59**

**REFERÊNCIAS ..... 60**

## 1 INTRODUÇÃO

A siderurgia teve um considerável avanço como consequência do desenvolvimento da construção civil nas últimas décadas no Brasil. Com a grande procura dos produtos siderúrgicos, como o aço vergalhão, e com o crescimento gradativo da concorrência na oferta de tal produto, cada vez mais é imprescindível um produto de boa qualidade que atenda as normas e exigências de mercado.

Para verificar as boas características desses vergalhões de aço, um dos ensaios mecânicos de tensão-deformação mais comuns é o ensaio de tração. Geralmente, este ensaio é realizado num corpo de prova de formas e dimensões padronizadas para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos (SOUZA, 1982).

O comportamento mecânico dos materiais é descrito por sua deformação e características de fratura sob tensão de tração, compressão, ou tensões multiaxiais. A determinação desse comportamento mecânico é influenciada por vários fatores, que incluem variáveis metalúrgicas / materiais, métodos de ensaio, bem como a natureza das tensões aplicadas.

O objetivo deste trabalho é verificar como amostras de vergalhão de fabricantes distintos se comportam diante do ensaio de tração e confirmar se atendem as especificações da NBR 7480, norma vigente no país.

Esse trabalho justifica-se pelo fato do crescimento da construção civil nas últimas décadas ter acelerado o consumo de materiais desse ramo. Com isso, muitas empresas ingressaram nesse crescente mercado, fazendo com que a grande concorrência disponibilizasse no mercado uma significativa variedade de tais produtos, como os vergalhões, porém nem todos os produtos são de qualidade.

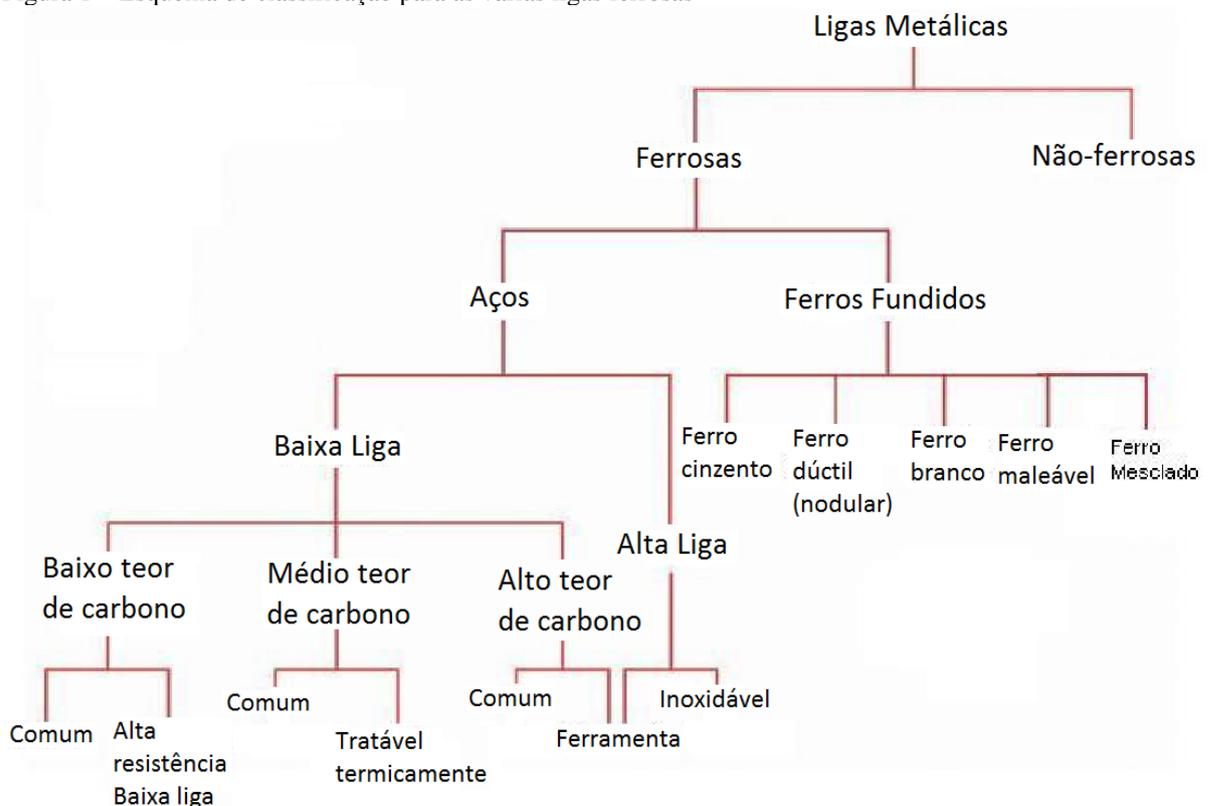
Frente a essa problemática, esse trabalho sugere uma investigação, por meio de caracterização mediante ensaio mecânico destrutivo, utilizando amostras de vergalhões CA-50 de três fabricantes distintos como corpo de prova, previamente preparados, com o intuito de confirmar se seus produtos estão dentro de uma faixa de segurança que atenda a ABNT NBR-7480/2007, norma brasileira que garante a qualidade dos aços para construção civil.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Ligas metálicas ferrosas

As ligas metálicas, em razão de sua constituição, são agrupadas constantemente em duas classes: ligas ferrosas e não ferrosas. As ligas ferrosas são aquelas nas quais o ferro é o principal constituinte, e incluem os aços e os ferros fundidos (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Figura 1 – Esquema de classificação para as várias ligas ferrosas



Fonte: (CALLISTER; RETHWISCH, 2012, p.335).

Ainda segundo Callister e Rethwisch (2012), as ligas ferrosas são produzidas em maiores quantidades que qualquer outro tipo de metal. O amplo uso destas ligas é resultado de três fatores: os compostos contendo ferro existem em quantidades abundantes na crosta terrestre; o ferro metálico e as ligas de aço podem ser produzidos usando técnicas de extração, beneficiamento, formação de ligas e fabricação relativamente econômicas; e as ligas ferrosas são extremamente versáteis, no sentido de que podem ser fabricadas com uma ampla variedade de propriedades físicas e mecânicas. Contudo, a principal desvantagem de muitas dessas ligas ferrosas é a sua vulnerabilidade à corrosão.

## 2.2 Aço

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, uma vez que os aços comerciais não são ligas binárias. De fato, apesar do ferro e do carbono serem os principais elementos de liga, eles sempre contêm outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação. Desse modo o “aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação.” (CHIAVERINI, 2008, p.21).

O limite inferior a 0,008% corresponde à máxima solubilidade do carbono no ferro à temperatura ambiente e o limite superior 2,11% corresponde à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro e que ocorre a 1148 ° C. Essa quantidade máxima, em contrapartida, depende da presença dos elementos residuais em teores superiores aos normais (CHIAVERINI, 2008).

Aços e ligas especiais são classificados de diferentes maneiras. São métodos usuais de classificação:

- a) classificar quanto às características do aço ou liga, como: propriedades mecânicas, composição química, entre outros;
- b) classificar quanto ao emprego do aço ou liga, como por exemplo: aços para ferramentas e para construção mecânica (MEI; SILVA, 2010).

O aço é um material que possui uma gama enorme de possibilidades de aplicação, sendo mais usualmente utilizado em automóveis, formas estruturais, tubulações, edificações, pontes, entre outros (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

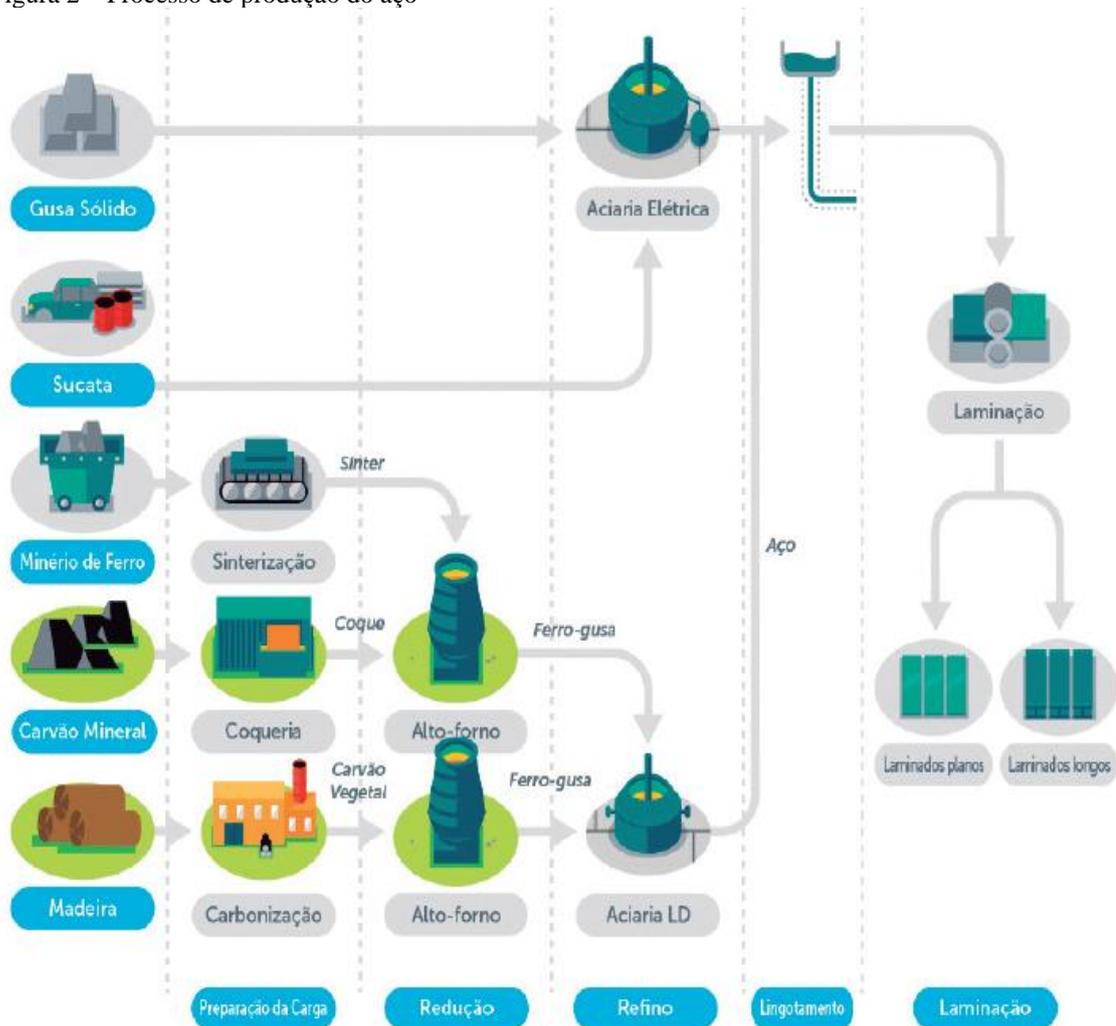
### 2.2.1 Processo de fabricação

De acordo com a Confederação Nacional da Indústria (2017), há basicamente duas rotas tecnológicas para a produção de aço, com algumas possíveis mudanças e combinações: produção de aço usando, em sua maioria, minério de ferro e uma pequena proporção de sucata metálica, nas usinas integradas; e produção de aço que utiliza basicamente a sucata, nas usinas semi-integradas.

As usinas integradas produzem aço a partir do minério de ferro, usando o carvão (mineral ou vegetal) como agente redutor nos altos fornos para obtenção do ferro metálico. Deve-se ressaltar que o carvão vegetal é usado somente em altos fornos de menor capacidade. As usinas integradas possuem as três fases básicas de produção: redução, refino e laminação.

As usinas semi-integradas não possuem a etapa de redução, pois utilizam sucata de aço e ferro gusa para alimentar as aciarias elétricas. As usinas semi-integradas operam duas fases: refino (via forno elétrico a arco – EAF) e laminação (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2017).

Figura 2 – Processo de produção do aço



Fonte: (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2017).

Ainda segundo a Confederação Nacional da Indústria (2017), o Brasil produziu 31,3 milhões de toneladas de aço bruto no ano de 2016, sendo 85,7% da produção em usinas integradas e 14,3% da produção em usinas semi-integradas.

### 2.2.1.1 Redução

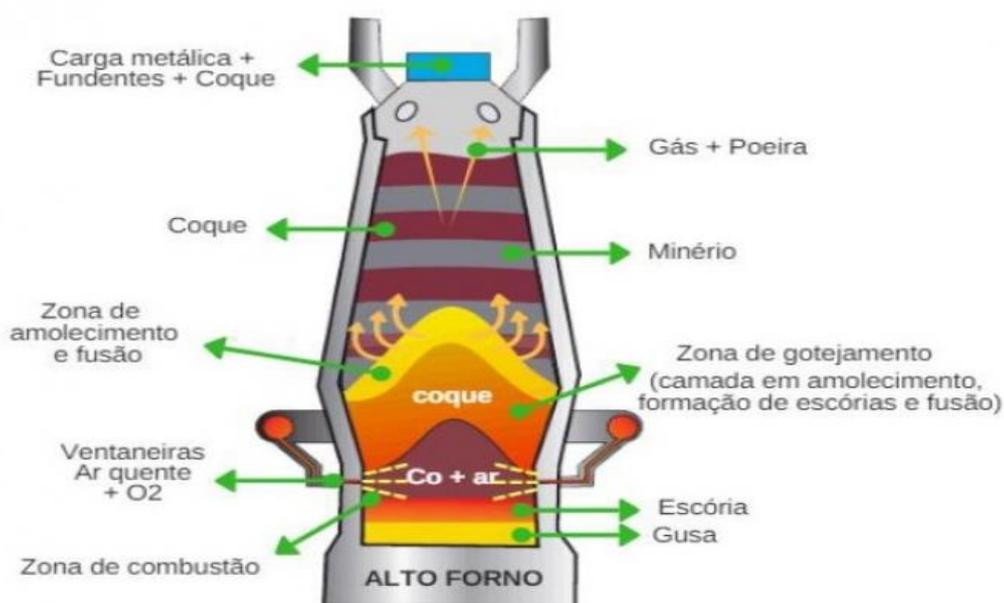
A indústria siderúrgica é a responsável por transformar o minério de ferro em aço, de modo que este possa ser utilizado comercialmente. Esse processo chama-se Redução.

O ferro é encontrado em toda crosta terrestre, fortemente ligado ao oxigênio e à sílica. O minério de ferro é um óxido de ferro ( $\text{FeO}$ ), misturado com areia fina. O carbono também é relativamente abundante na natureza e pode ser encontrado sob diversas formas. Na siderurgia, usa-se carvão mineral, e em alguns casos, o carvão vegetal (BRASIL, 2020).

O carvão exerce um papel duplo na produção do aço. Como combustível, permite alcançar altas temperaturas (cerca de  $1.500^\circ$  Celsius) necessárias à fusão do minério. Como redutor, associa-se ao oxigênio que se desprende do minério com a alta temperatura, deixando livre o ferro. O processo de remoção do oxigênio do ferro para ligar-se ao carbono (Redução) ocorre dentro de um equipamento chamado alto forno (BRASIL, 2020).

O alto forno é um reator metalúrgico, que utiliza carbono, na forma de coque ou carvão vegetal, para reduzir e fundir os óxidos de ferro presentes na sua carga (VIEIRA, 2012).

Figura 3 – Funcionamento do alto forno



Fonte: (CONVAÇO, 2018).

A fabricação do aço ocorre geralmente em duas etapas. O objetivo da primeira etapa é reduzir ao máximo o teor de oxigênio da composição  $\text{FeO}$ . A partir disso, obtém-se o denominado ferro-gusa, contendo de 3,5 a 4,0% de carbono em sua estrutura. Como consequência de uma segunda fusão, tem-se o ferro fundido, com teores de carbono entre 2 e 6,7%. Após uma análise química do ferro, para verificação dos teores de carbono, silício, fósforo, enxofre, manganês entre outros elementos, o mesmo segue para uma unidade da siderúrgica denominada aciaria, onde será transformado em aço. O aço será o resultado da descarbonatação do ferro gusa, isto é, é produzido a partir deste, controlando-se o teor de carbono para no máximo 2% (CHIAVERINI, 2008).

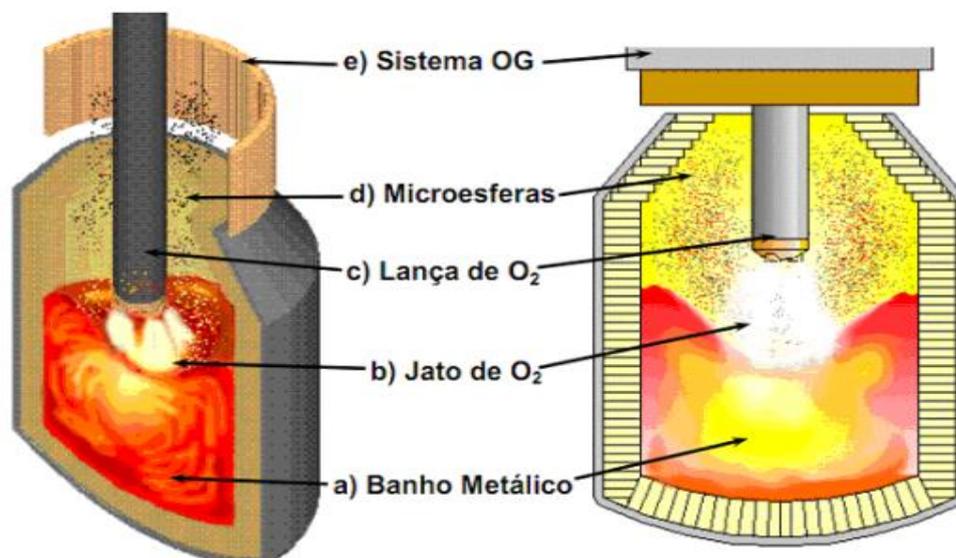
O ferro-gusa produzido tem composição básica aproximada de 94% Fe, 4,5% C, 0,5% Mn, 0,5% Si, 0,0030% S e 0,1% P. Além do ferro-gusa produzido, sai a escória (mistura das impurezas do minério de ferro, fundente, cinzas). Os dois materiais são extraídos do forno pelo furo de gusa e separados no canal principal por diferença de massa específica (gusa 7,8 t/m<sup>3</sup> e escória 2,5 t/m<sup>3</sup>) aproximadamente (PACHECO, 2017).

#### 2.2.1.2 Aciaria (Refino)

Esta parte do processo também é denominada de Refino e tem a função de produzir o aço propriamente dito. Apesar de ser dividida em usinas integradas e usinas semi-integradas, o objetivo de ambas é igual, a produção do mesmo produto, sendo que essa diferenciação depende da usina e do tipo de aço produzido pela empresa.

Nas usinas integradas, o aço é produzido a partir do ferro-gusa líquido vindo dos Altos Fornos e é encaminhado ao Conversor LD (Linz-Donawitz), que tem a função de reduzir os níveis de carbono do ferro-gusa através da injeção de oxigênio a pressão elevada, com objetivo de obter as especificações necessárias para a aplicabilidade do aço. Nesta fase também é almejada a redução dos níveis de fósforo, enxofre e outros elementos potencialmente prejudiciais ao processo/produto. Em seguida, o aço é encaminhado ao Forno Panela, onde adiciona-se os elementos de liga como cromo, nióbio, manganês, vanádio e outros necessários de acordo com a aplicação do aço. Esta é uma fase de grande importância no processo, pois definirá a qualidade do aço, pois uma vez que o aço não está nas especificações desejadas, pode haver perdas nas características físicas e mecânicas do material (CALDAS, 2011).

Figura 4 – Conversor LD



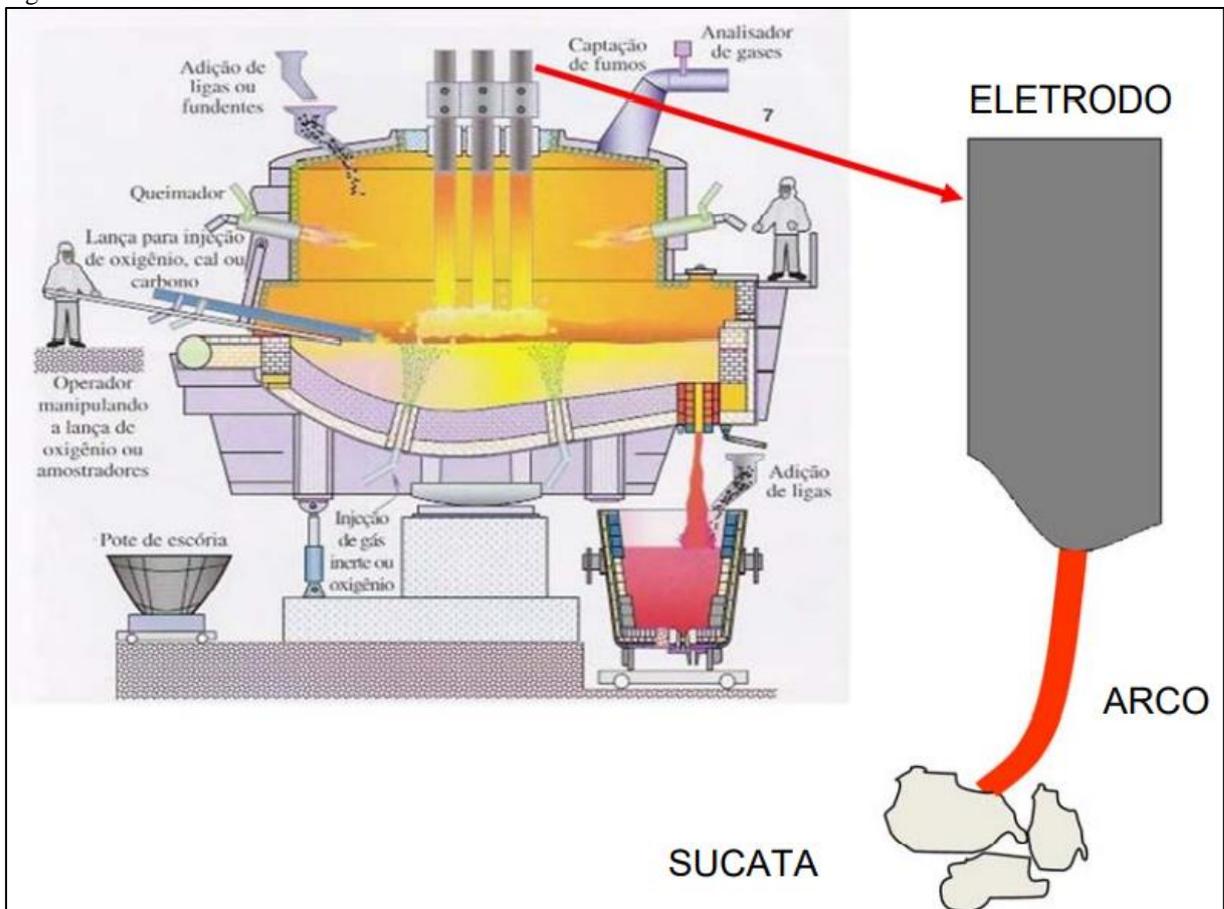
Fonte: (MENDES, 2009).

Nas usinas semi-integradas o aço é produzido a partir da sucata, podendo haver gusa líquido ou ferro esponja provido de um forno de redução direta. Estes são encaminhados a um outro equipamento denominado Forno Elétrico a Arco (FEA), onde a maior parte da carga é sucata (60% a 80%). Neste caso o ferro-gusa entra com o objetivo de aumentar a produtividade e reduzir o consumo de energia elétrica (CALDAS, 2011).

A estrutura do FEA consiste essencialmente em uma carcaça metálica revestida por material refratário na metade inferior e por painéis refrigerados na metade superior. Esta carcaça é recoberta pela abóboda, onde descem os eletrodos de grafita, responsáveis por conduzir a eletricidade e formar o arco elétrico, além da transferência da energia elétrica para a sucata com intuito de promover sua fusão (ARAUJO, 2009).

Na parte inferior da carcaça é engatado o sistema de basculamento, por qual tem a possibilidade de inclinar o FEA para auxílio das operações de retirada de escória e vazamento. Além disso, é possível que a carcaça tenha *plugs* porosos, por onde é injetado um gás inerte (em geral N<sub>2</sub>), com intuito de homogeneizar a temperatura e a composição química do banho (ARAUJO, 2009).

Figura 5 – Forno Elétrico a Arco



Fonte: (ALMADA et al, 2016).

Em comparação com o método tradicional de produção de aço a partir de minério de ferro, cada tonelada de aço produzido a partir de sucata economiza 1.400kg de minério de ferro, 740kg de carvão mineral e 120kg de cal. Além disso, com relação ao efeito estufa, cada tonelada de aço reciclado deixa de emitir 1,5t de CO<sub>2</sub> (CARBONI, 2019).

### 2.2.1.3 Lingotamento

O lingotamento é uma etapa de grande importância, pelo fato de ser a fase onde o aço é solidificado. Uma solidificação imperfeita pode ocasionar defeitos no material e como efeito, a perda do produto. A solidificação do aço poderá ser feita de duas maneiras: lingotamento convencional e lingotamento contínuo.

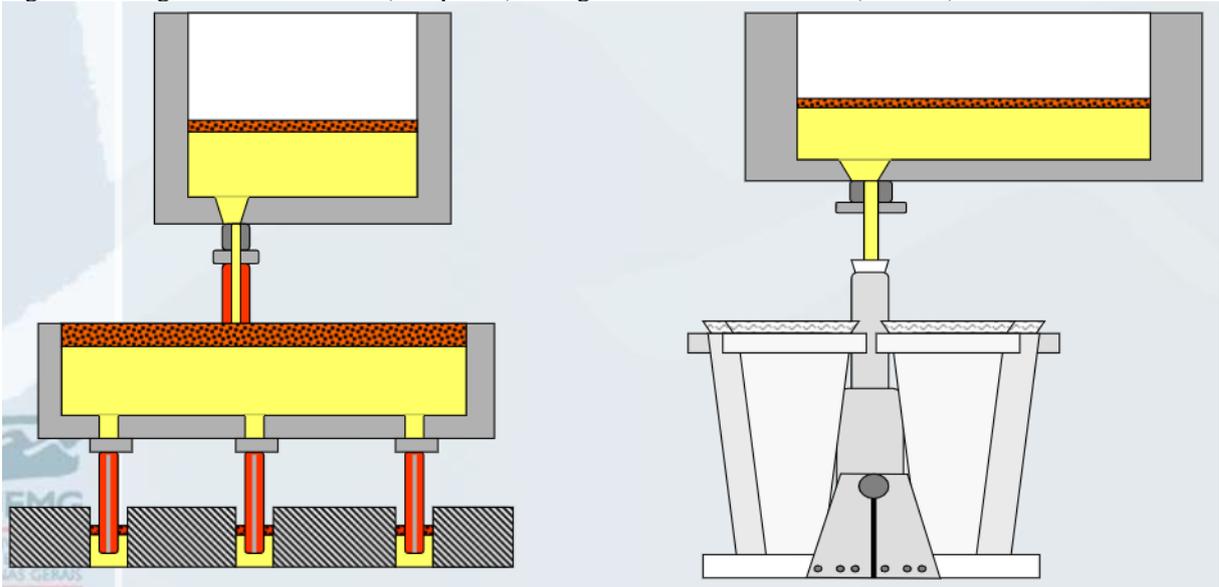
O lingotamento convencional consiste na solidificação do aço em moldes individuais na forma de lingotes, que adiante devem ser desmoldados antes de servirem de matéria-prima para os próximos processos. Este método, nos dias de hoje, é empregado principalmente na produção de blocos de grandes dimensões e na fabricação de alguns aços especiais (ROSSI, 2014).

Segundo Nascimento (2007), o processo de lingotamento contínuo consiste basicamente em três sistemas metalúrgicos: a panela, o distribuidor e o molde.

A panela tem a função inicial de receber o aço líquido do convertedor e transportá-lo até a estação de lingotamento contínuo, servindo como reservatório para o aço líquido. O distribuidor é um reservatório intermediário entre a panela e o molde, que serve como alimentador de aço para o molde. Sua principal função além de distribuir o aço, é servir como um reservatório pulmão durante a troca de panelas, alimentando assim a continuidade do lingotamento contínuo. Também é utilizado para realizar ajustes na composição química e remover inclusões. O molde é o responsável por iniciar a solidificação do aço, compreendendo a formação da pele sólida.

A solidificação do metal vertido ocorre dentro do molde, dando origem a uma casca que deve ser suficientemente espessa para que obtenha resistência mecânica a fim de suportar a pressão do metal líquido e as tensões provenientes do arraste do lingote (GARCIA, 2007).

Figura 6 – Lingotamento Contínuo (à esquerda) e Lingotamento Convencional (à direita)



Fonte: (UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS, 2016).

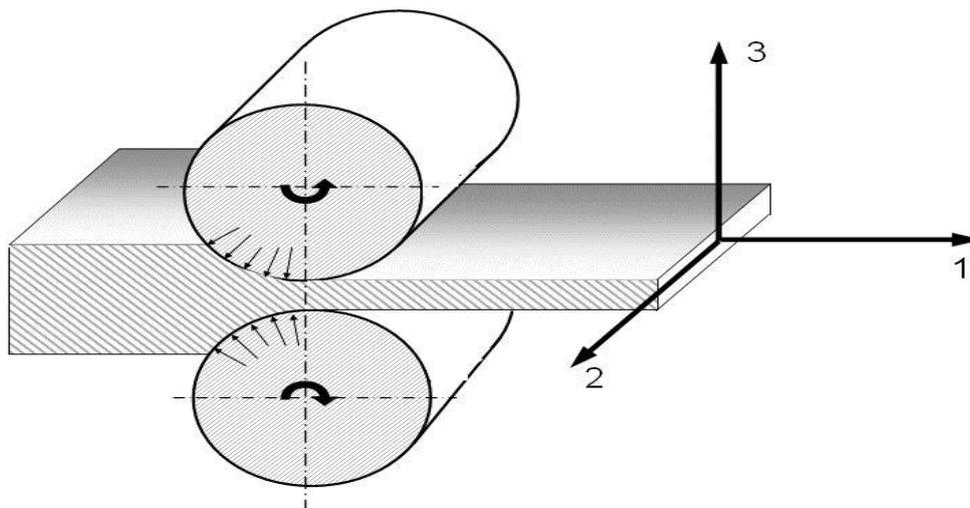
De acordo com John (2009), o lingotamento contínuo apresenta essas principais vantagens sobre o convencional:

- a) Redução do tempo e das etapas;
- b) Redução do número de equipamentos e mão de obra, facilitando o processo;
- c) Obtenção de aços de qualidade estrutural superior e menor variabilidade;
- d) Acabamento superficial melhor e mais regular;
- e) Altíssimo rendimento, com aproveitamento de quase 100% do aço, devido à continuidade do processo.

#### 2.2.1.4 Laminação

A laminação é um processo de conformação mecânica que permite a transformação de placas em chapas grossas e bobinas laminadas a quente (no caso de aços planos) e de blocos e tarugos em barras, perfis, vergalhões e fio-máquina (no caso de aços longos). Geralmente, as propriedades dos metais são melhoradas pela conformação mecânica, sendo o efeito mais relevante o encruamento (endurecimento por deformação plástica), frequentemente utilizado a fim de aumentar a resistência mecânica (BRASIL, 2010).

Figura 7 – Processo de Laminação



Fonte: (MAGNABOSCO; SANTOS, 2008).

O processo de laminação pode ser realizado a quente ou a frio. A laminação a quente é usada para operações de desbaste, sendo que neste processo, as empresas ganham em economia de energia, redução de estoques e produtividade mais elevada. A laminação a frio é utilizada em operações de acabamento, apresentando um excelente acabamento superficial e controle dimensional do produto final bem rigoroso (BRASIL, 2010).

### 2.3 Classificação dos aços

A quantidade de tipos de aço para construção mecânica existentes no mercado é enorme. Cada tipo de aço é adequado para um certo tipo de aplicação. Dada a grande diversidade de tipos de aços, foram criados sistemas para sua classificação, que são periodicamente submetidos a revisões. Os aços podem ser classificados em grupos, de acordo com propriedades comuns, como: composição, processo de acabamento e forma do produto acabado.

Do mesmo modo, há subdivisões desses grupos, como aços-carbono de baixo, médio e alto teor de carbono, além dos aços-liga, os quais são usualmente classificados de acordo com o principal ou principais elementos (CHIAVERINI, 2008).

#### 2.3.1 Classificação normativa

O critério de classificação de um aço adotado no Brasil é o que considera a composição química dos aços, assim como utilizado pela *American Iron and Steel Institute (AISI)* e pela *Society*

of *Automotive Engineers* (SAE). Nesse sistema, as letras XX correspondem às cifras que indicam o teor de carbono. Por exemplo, nas designações AISI-SAE, a classe 1045 corresponde ao aço carbono com 0,45% de carbono em média. Em contrapartida, os dois primeiros algarismos diferenciam os vários tipos de aços entre si, pela presença única do carbono como elemento de liga, ou de outros elementos de liga, tais como níquel, cromo, etc., além do carbono (CHIAVERINI, 2008).

Os aços de alto teor em liga, como os inoxidáveis, refratários, para ferramentas, entre outros, são classificados de acordo com a norma alemã DIN (*Deutsches Institut für Normung*). A norma DIN 17100 classifica os aços para construção em geral em função de seu limite de resistência à tração. Assim a designação St 42 corresponde a um aço com limite de resistência à tração 42 e 50 kgf/mm<sup>2</sup> (410 a 490 MPa). Já a norma DIN 17200, classifica os aços de acordo com a composição química, como por exemplo: C 35 significa aço-carbono com carbono médio de 0,35%. (CHIAVERINI, 2008).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o Brasil adotou como Norma Brasileira a norma MERCOSUL NM 87 para classificação de aços-carbono e ligados para construção mecânica, que tem como base os critérios adotados pela SAE e pela *Comisión Panamericana de Normas Técnicas* (COPANT).

Conforme a NBR NM 87 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000, p. 2) a designação dos aços de acordo com sua composição química é feita para os aços carbono e ligados, com a palavra "COPANT" seguida de um número de 4 dígitos e para alguns aços ligados, de um número de 5 dígitos. Os dois primeiros dígitos indicam o tipo de aço. Os dois últimos, para o número de 4 dígitos e os três últimos para o número de 5 dígitos, indicam o valor médio aproximado dos limites do teor de carbono, expresso em centésimos por cento. As letras B, L ou S intercaladas após os dois primeiros dígitos indicam o teor de boro, chumbo ou enxofre respectivamente.

### 2.3.2 Classificação quanto à composição química

Segundo Chiaverini (2008), considerando a composição química dos aços como base de classificação, eles se dividem em aço-carbono e aço-liga de alto, baixo e médio teor de liga:

a) Aços-carbono: é o tipo de aço mais produzido e geralmente são agrupados em aços de alto carbono  $C > 0,5\%$ ; médio carbono  $0,2\% < C < 0,49\%$  e baixo carbono com teores entre 0,05% e 0,19%. Essas ligas de ferro carbono contém menos que 1,65% Mn, 0,6% Si e o teor total dos outros elementos não excedem 2% (TSCHIPTSCHIN, 2019).

b) Os aços de baixa-liga são aqueles que recebem elementos de liga na composição química para melhorar suas propriedades. Além de conter elementos de liga em sua composição química, esses aços recebem um processamento feito a partir de técnicas especiais que garantem uma maior limpeza no produto final. Esses aços contêm, além do carbono, elementos de liga tais como Cr, Ni, Mn, V, Mo, entre outros, em teores totais menores que 5%. O carbono agrega aos aços resistência e dureza: quanto maior o teor de carbono maior a resistência mecânica. Porém, a adição de outros elementos de liga possibilita ao aço ser tratado termicamente para obter ainda mais resistência mecânica (TSCHIPTSCHIN, 2019).

c) Os aços-liga de alto teor em liga possuem um teor de elementos de liga maior que 5%. Na sua composição são utilizados cerca de 20 elementos de liga, além do carbono, para melhorar suas propriedades. Alguns deles são: manganês, silício, alumínio, níquel, cromo, cobalto, molibdênio, vanádio, tungstênio, nióbio, titânio, chumbo, entre outros. São aços inoxidáveis, aços resistentes ao calor, aços ferramenta e outros utilizados para finalidades específicas (TSCHIPTSCHIN, 2019).

d) Aços-liga de médio teor em liga, que podem ser considerados como um grupo intermediário entre os dois anteriores. São aplicados em situações onde é requerido elevada resistência mecânica em temperaturas elevadas (500°C), como por exemplos aços para trabalho a quente (matrizes). (CHIAVERINI, 2008).

### 2.3.3 Classificação quanto ao processamento

A classificação por processamento baseia-se no tipo de operação executada sobre o aço para impor uma forma e/ou estrutura.

Os processamentos que visam imprimir uma forma são a conformação mecânica (a frio ou a quente, como laminação, extrusão, entre outros), a fundição e a consolidação por sinterização (metalurgia do pó). Assim existem aços trabalhados (a quente ou a frio), fundidos ou sinterizados.

Os processamentos que visam alterar a estrutura são os tratamentos térmicos, como recozimento, recristalização, normalização, revenimento e têmpera (BECK; BOEIRA, 2007).

Tabela 1 – Relação entre o processamento, microestrutura e as propriedades do aço

PROCESSAMENTO	MICROESTRUTURA	PROPRIEDADES
Trabalhado a frio	Encruada (alta densidade de discordâncias) Grãos alongados (orientados)	Elevada Resistência Baixa ductilidade Grande anisotropia
Trabalhado a quente	Grãos refinados e equiaxiais Ausência de tensões residuais	Moderada resistência Elevada ductilidade Moderada anisotropia
Fundido	Estrutura dendrítica Grãos colunares e equiaxiais Baixa densidade de discordâncias Presença de segregação Presença de tensões residuais Presença de porosidade (em muitos casos)	Moderada ductilidade Baixa resistência Moderada anisotropia
Sinterizado	Heterogeneidade química Recristalizada (baixa densidade de discordâncias) Presença de poros Recristalizada (baixa densidade de discordâncias)	Baixa ductilidade Moderada anisotropia Baixa resistência

Fonte: (Adaptado de BECK; BOEIRA, 2007)

O processamento altera a microestrutura do aço e conseqüentemente as propriedades, como pode ser observado na tabela anterior.

#### 2.3.4 Classificação quanto à microestrutura

Segundo Bezerra et al (2019) a classificação segundo a microestrutura é típica da área metalúrgica. Os aços são classificados em: aços encruados, aços ferríticos-perlíticos, aços martensíticos, aços bainíticos, aços austeníticos e aços duplex ou bifásicos. As características desses aços estão presentes a seguir:

- a) Aços encruados: Estes aços geralmente apresentam microestrutura predominantemente ferrítica, com um pouco de perlita, sendo resultantes de processos de deformação a frio. Em sua maioria são aços de baixo teor de carbono (inferior a 0,4% C) e com baixa quantidade de elementos de liga.
- b) Aços ferríticos-perlíticos: Os aços ferríticos-perlíticos possuem teor de carbono abaixo de 0,8% (hipoeutetóides), e são provenientes de processos em que houve resfriamento lento, tais como material trabalhado a quente, recozido ou normalizado.
- c) Aços martensíticos: Os aços constituídos de martensita revenida geralmente são aplicados em situações que exigem resistência elevada ao longo de toda a seção transversal, como por exemplo, eixos e punções.

d) Aços bainíticos: Em determinadas combinações de resistência e dureza a estrutura bainítica propicia maior tenacidade que a martensítica, tornando tais aços preferíveis em situações que se necessite resistência associada à tenacidade.

e) Aços austeníticos: Uma vez que a austenita não é um constituinte estável em temperatura ambiente, sua estabilização depende da presença de elementos de liga, tais como o cromo e o manganês. A austenita, por ser não magnética, encontra aplicação em situações em que se deseja minimizar efeitos de campos magnéticos induzidos, tais como em suportes de bússolas.

f) Aços dúplex ou bifásicos: Costuma-se denominar duas categorias distintas de estruturas. Na primeira, do tipo austenítico-ferrítica (delta), encontram-se certos aços inoxidáveis, cuja resistência mecânica e à corrosão é superior àquela obtida nos inox austeníticos. A segunda categoria consiste de microestrutura ferrítico-martensítica, resultante de têmpera a partir de temperatura de dentro da zona crítica. Os aços de baixo carbono com esta estrutura apresentam combinação de resistência e ductilidade mais elevadas que os equivalentes ferríticos-perlíticos.

### 2.3.5 Classificação quanto à aplicação

Essa classificação é muito comum para os tipos de aço e se refere à aplicação para a qual ele se destina. As classificações mais comuns são: aços estruturais, aços para molas, aços para fundição, aços para construção mecânica, aços para cementação, aços para nitretação, aços resistentes à corrosão, aços para fins elétricos, aços para fins magnéticos (GRUPO AÇO CEARENSE, 2017).

Para este trabalho e seus fins, nos limitaremos à explicação dos aços estruturais.

## 2.4 Aços Estruturais

Por aços estruturais entende-se, basicamente, vergalhões para reforço de concreto, barras (para aplicações estáticas) e chapas e perfis para aplicações estruturais. Nesta classe está o consumo maciço de aços e a relação resistência/preço é, geralmente, fator decisivo na seleção (MEI; SILVA, 2010).

Aços estruturais são, geralmente, produtos laminados, em função das grandes quantidades produzidas. Também podem ser obtidos sob a forma de forjados e fundidos, aproveitando as vantagens da produção de formas próximas à da peça acabada (*near net shape*) (COLPAERT, 2008).

Para Mei e Silva (2010) e Colpaert (2008), os principais requisitos para aços destinados às aplicações estruturais são:

- a) Tensão de escoamento elevada: a maioria dos códigos de projeto modernos vem reconhecendo a tensão de escoamento como a propriedade a ser considerada no projeto mecânico. A concepção de que uma relação elástica (limite de escoamento/limite de ruptura) baixa seria necessária para prevenir instabilidade plástica vem sendo substituído pelo uso criterioso do limite de escoamento como propriedade a ser considerada para evitar deformação plástica generalizada.
- b) Elevada tenacidade: Desde a Segunda Guerra Mundial, no mínimo, a prevenção da fratura rápida ou catastrófica de estruturas de aço tem recebido atenção especial. O controle da tenacidade é fundamental na prevenção da fratura rápida (“frágil”).
- c) Boa soldabilidade: A alteração das características do material na junta soldada deve ser a menor possível, além de exigir o mínimo de cuidados operacionais. Esta característica é fundamental para propiciar montagens simples, rápidas e confiáveis, bem como o corte por chama.
- d) Boa formabilidade: Em diversos casos é necessário a utilização de conformação mecânica (dobramento, calandragem, entre outros) para fabricar a estrutura desejada.
- e) Custo mínimo.

#### 2.4.1 Vergalhão para concreto

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a norma NBR 7480 estabelece os requisitos exigidos para encomenda, fabricação e fornecimento de barras e fios de aço destinados a armaduras para estruturas de concreto armado, com ou sem revestimento superficial.

De acordo com esta norma, classificam-se como barras os produtos de diâmetro nominal 6,3 mm ou superior, obtidos exclusivamente por laminação a quente sem processo posterior de deformação mecânica. Classificam-se como fios aqueles de diâmetro nominal 10,0 mm ou inferior, obtidos a partir de fio-máquina por trefilação ou laminação a frio.

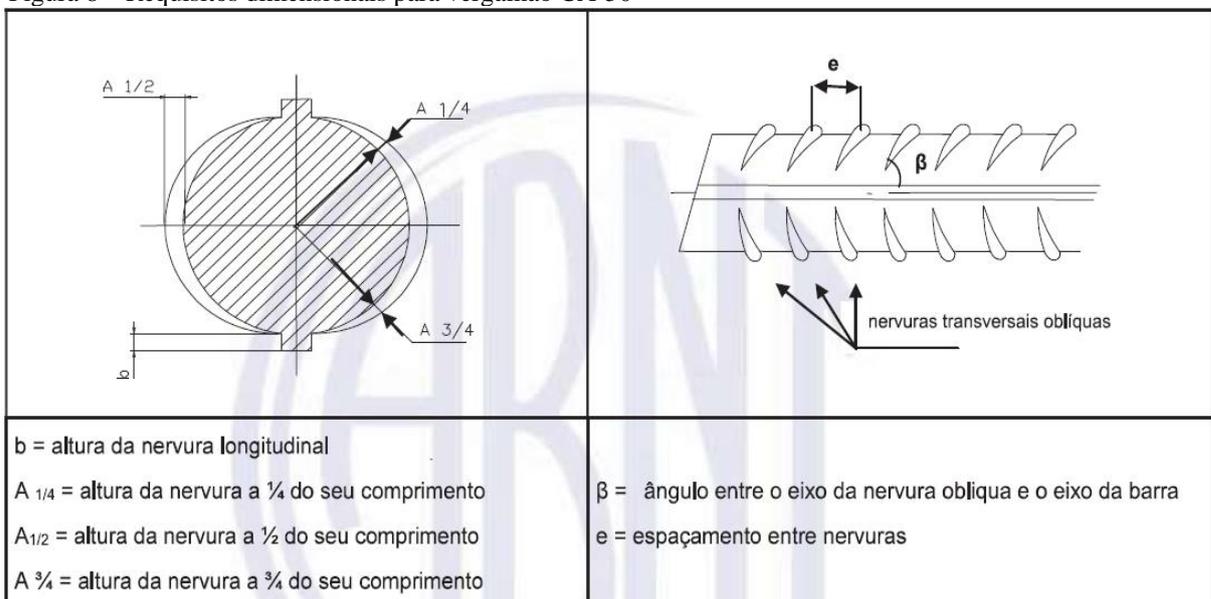
Além disso, as barras são classificadas nas categorias CA-25 e CA-50 e os fios de aço na categoria CA-60, de acordo com o valor característico da resistência de escoamento.

#### 2.4.1.1 Características geométricas de barras nervuradas – Categoria CA-50

Ainda segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007), as barras de aço destinadas a armadura para concreto armado devem apresentar homogeneidade quanto às suas características geométricas, a seguir, algumas delas:

- As barras da categoria CA-50 são obrigatoriamente providas de nervuras transversais oblíquas;
- Os eixos das nervuras transversais oblíquas devem formar um ângulo entre  $45^\circ$  e  $75^\circ$  com a direção do eixo da barra;

Figura 8 – Requisitos dimensionais para vergalhão CA-50



Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007).

- As barras devem ter no mínimo duas nervuras longitudinais contínuas e diametralmente opostas, para impedir o giro da barra dentro do concreto, exceto no caso que as nervuras oblíquas já façam esse papel;
- Para diâmetros nominais maiores ou iguais a 10,0 mm, a altura das nervuras deve ser igual ou superior a 4% do diâmetro nominal; no caso de diâmetros menores que 10,0 mm, a altura deve ser igual ou maior a 2% do diâmetro nominal;
- O espaçamento médio das nervuras transversais oblíquas deve estar entre 50% e 80% da seção transversal da barra;
- A projeção das nervuras transversais oblíquas na seção transversal deve abranger no mínimo 85% do perímetro nominal da seção transversal.

#### 2.4.1.2 Massa, comprimento e tolerância

A massa real das barras deve ser igual à sua massa linear nominal, com as tolerâncias indicadas na tabela 2:

Tabela 2 – Características das barras

Diâmetro Nominal mm	Massa e tolerância por unidade de comprimento		Valores nominais	
	Massa nominal kg/m	Máxima variação permitida para massa nominal	Área da Seção mm <sup>2</sup>	Perímetro mm
6,3	0,245	± 7%	31,2	19,8
8	0,395	± 7%	50,3	25,1
10	0,617	± 6%	78,5	31,4
12,5	0,963	± 6%	122,7	39,3
16	1,578	± 5%	201,1	50,3
20	2,466	± 5%	314,2	62,8
22	2,984	± 4%	380,1	69,1
25	3,853	± 4%	490,9	78,5
32	6,313	± 4%	804,2	100,5
40	9,865	± 4%	1256,6	125,7

Fonte: (Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007).

Deve-se observar que para efeito de cálculo, a massa linear nominal da barra (em kg/m) é obtida pelo produto da área da seção nominal em m<sup>2</sup> por 7.850 kg/m<sup>3</sup>.

Com relação ao comprimento da barra, este deve ser de 12 metros e tolerância de ± 1%.

#### 2.4.1.3 Ensaio de tração das barras

O ensaio de tração das barras deve ser realizado de acordo com as normas ABNT NBR ISO 6892 e ISO 15630-1. O comprimento inicial  $L_0$  é igual a 10 diâmetros nominais e não é permitido o uso de corpos de prova usinado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007).

A resistência de escoamento de barras de aço pode ser caracterizada por um patamar no diagrama tensão-deformação ou calculada pelo valor da tensão sob carga correspondente à deformação permanente de 0,2%. Esta também pode ser calculada pelo valor da tensão sob carga correspondente à deformação de 0,5%, sendo que em casos de divergência, prevalece o valor obtido no método anterior (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007).

Tabela 3 – Valores mínimos de tração para barras e fios de aço destinados a armadura para concreto armado

<b>VALORES MÍNIMOS DE TRAÇÃO</b>				
<b>Categoria</b>	<b>Resistência característica de escoamento <math>f_{yk}</math> Mpa</b>	<b>Limite de resistência <math>f_{st}</math> Mpa</b>	<b>Alongamento após ruptura em 10 <math>\phi</math> A %</b>	<b>Alongamento total na força máxima <math>A_{gt}</math> %</b>
CA-25	250	1,20 $f_y$	18	-
CA-50	500	1,08 $f_y$	8	5
CA-60	600	1,05 $f_y$	5	-

Fonte: (Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007)

## 2.5 Ensaio de tração convencional

O ensaio de tração consiste na aplicação de uma força, que, ao atuar sobre uma superfície de um corpo sólido provoca uma deformação na direção do esforço produzindo uma pressão (ZOLIN, 2011).

Entre os diferentes tipos de ensaios existentes para a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais, o mais utilizado é o Ensaio de Tração. Essa aplicabilidade deve-se ao fato de ser um ensaio relativamente simples, realização rápida e fácil reprodução. Além disso, fornece importantes e primordiais informações para o projeto e fabricação de peças/componentes. Este ensaio utiliza corpos de prova preparados de acordo com as normas técnicas convencionais (no país a norma técnica utilizada para materiais metálicos à temperatura ambiente é a NBR ISO 6892) (GARCIA et al, 2012).

Este corpo de prova é fixado em uma máquina de ensaio que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo que as deformações são medidas por intermédio de um aparelho especial, sendo o mais comum o extensômetro. Os esforços ou cargas são medidos na própria máquina de ensaio e o corpo de prova é solicitado até a sua ruptura (SOUZA, 1982).

Com esse tipo de ensaio, pode-se assegurar que as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas pelo seu corpo, ao menos até que se atinja uma carga máxima próxima do final do ensaio e, pelo fato de ser possível fazer com que a carga cresça numa velocidade razoavelmente lenta durante todo o teste, o ensaio de tração permite mensurar de maneira satisfatória a resistência do material (SOUZA, 1982).

### 2.5.1 Tensão e deformação na tração

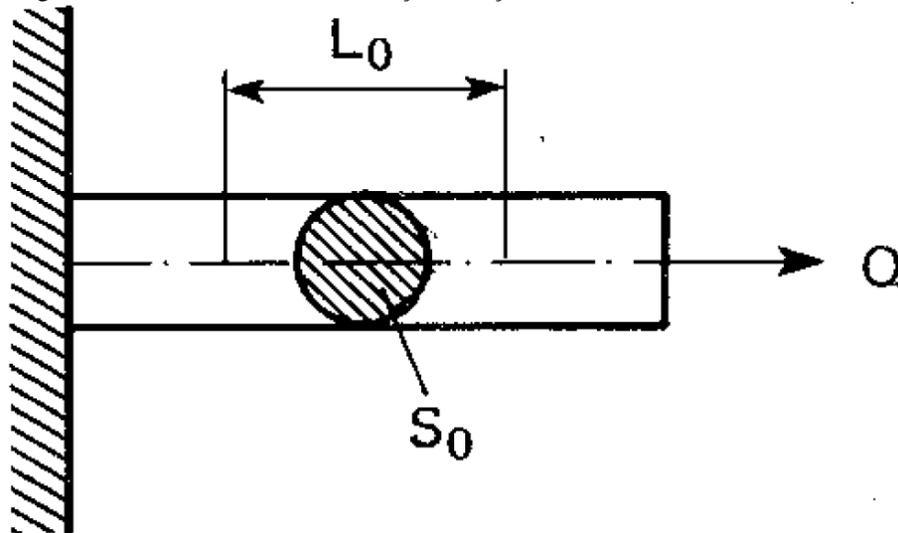
Tensão é definida, de modo geral, como a resistência interna de um corpo a uma força externa aplicada sobre ele, por unidade de área. Deformação é definida como a variação de uma dimensão qualquer desse corpo, por unidade da mesma dimensão, quando esse corpo é submetido a um esforço qualquer (SOUZA, 1982).

Ao considerar uma barra metálica cilíndrica de seção transversal uniforme  $S_0$ , onde é marcada uma distância  $L_0$  ao longo de seu comprimento, e submetê-la a uma única força de tração  $Q$ , ou seja, uma força normal à seção transversal da barra e coincidente com seu eixo longitudinal, a tensão média de tração ( $\sigma$ ) produzida na barra é dada por:

$$\sigma = Q / S_0$$

(1)

Figura 9 – Barra submetida ao esforço de tração



Fonte: (SOUZA, 1982)

O termo “tensão média” provém do fato de a tensão não ser completamente uniforme sobre a área,  $S_0$ , do corpo de prova, isto é, cada elemento longitudinal na barra não sofre a mesma deformação. A anisotropia inerente aos grãos de um metal policristalino impede uma completa uniformidade da tensão num corpo de tamanho macroscópico. Contudo, como a variação é extremamente pequena, pode-se excluir, daqui para frente, o termo “tensão média”, chamando-se apenas de tensão.

Ao aplicar uma tensão,  $\sigma$ , a barra sofre uma deformação,  $\varepsilon$ . A força  $Q$  produz um aumento da distância  $L_0$  de um valor,  $\Delta L$ . A deformação linear média é dada então por:

$$\varepsilon = \Delta L / L_0$$

(2)

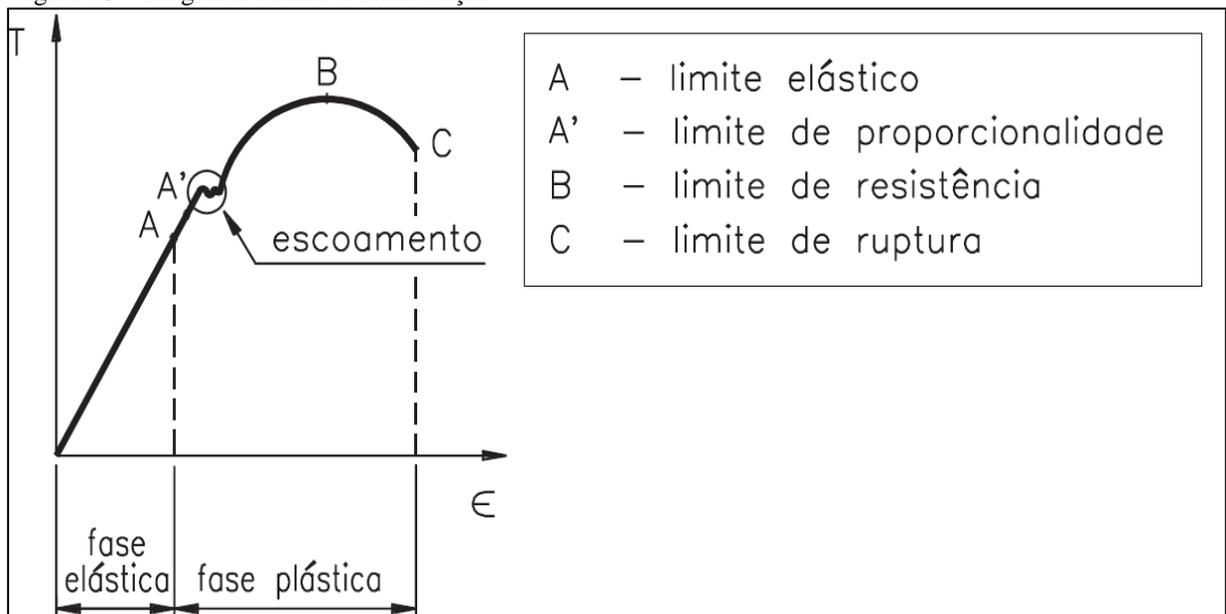
Pode-se constatar que a tensão tem a dimensão de força por unidade de área e a deformação é uma grandeza adimensional (SOUZA, 1982).

### 2.5.2 Propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de tração

Quando um corpo de prova é submetido a um ensaio de tração, a máquina de ensaio fornece um gráfico que demonstra as relações entre a força aplicada e as deformações ocorridas durante o ensaio (TELECURSO 2000, 1995).

Ao submeter um corpo de prova metálico a um ensaio de tração, pode-se construir um gráfico tensão-deformação, pelas medidas diretas da carga (ou tensão) e da deformação que aumenta continuamente até quase o fim do ensaio (SOUZA, 1982).

Figura 10 – Diagrama Tensão x Deformação



Fonte: (TELECURSO 2000, 1995)

A deformação, representada pela letra grega minúscula  $\epsilon$  (épsilon), é representada no eixo das abscissas (x) e a tensão é indicada no eixo das ordenadas (y) (TELECURSO 2000, 1995).

O gráfico tensão-deformação demonstra duas regiões que estão relacionadas ao regime de deformação elástica ou plástica (ZOLIN, 2011).

A primeira é nomeada de proporcional, pois há relação direta (linear) entre o esforço aplicado e o alongamento obtido no material. A deformação causada pela aplicação de uma carga é temporária, ao passo que, quando a força cessa o material retorna ao estado dimensional inicial. Nessa parte da deformação (regime elástico), vale a Lei de Hooke (ZOLIN, 2011).

A Lei de Hooke foi desenvolvida por sir Robert Hooke em 1678, após ele descobrir que uma mola tem sempre a deformação proporcional à tensão aplicada (TELECURSO 2000, 1995). Essa lei, descrita matematicamente pela expressão da elasticidade de uma mola, é dada por:

$$P = k.x \quad (3)$$

Onde P é a carga aplicada em N; k é a constante de proporcionalidade ou constante da mola (N/m); e x é o deslocamento (m) (GARCIA et al, 2012).

Ainda segundo Garcia et al (2012), do mesmo modo, a deformação elástica de um corpo de prova é descrita por uma relação linear entre a tensão ( $\sigma$ ) e a deformação ( $\varepsilon$ ), onde a constante de proporcionalidade é dada pelo módulo de elasticidade, ou módulo de Young (E), em homenagem ao pesquisador Thomas Young, que publicou uma explicação da Lei de Hooke em 1807, conforme a equação:

$$\sigma = E. \varepsilon \quad (4)$$

O módulo de elasticidade é a medida da rigidez do material, sendo que, quanto maior for o módulo, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão e mais rígido será o material (TELECURSO 2000, 1995).

O ponto A no gráfico é denominado limite elástico e determina o fim da linearidade do diagrama. O limite elástico é definido como a maior tensão que o metal pode aguentar, sem deixar qualquer deformação permanente quando for descarregado.

Ao atingir uma tensão em que o material não obedece mais à Lei de Hooke, isto é, a deformação não é proporcional à tensão, chega-se ao ponto A', denominado limite de proporcionalidade (SOUZA, 1982).

Na prática, considera-se que o limite de proporcionalidade e o limite de elasticidade são concomitantes (TELECURSO 2000, 1995).

A segunda parte do gráfico, onde a linearidade não é mais verificada, é a região de deformação plástica, onde não se pode aplicar mais a Lei de Hooke. Nesta fase, a deformação não é mais temporária, mas definitiva, sendo que ao cessar a força não há o retorno às dimensões iniciais. No início, a deformação é pequena e não proporcional à carga aplicada, sendo isso um sinal de que o material adentrou o regime plástico e pode vir a ocorrer a ruptura (ZOLIN, 2011).

Segundo Souza (1982), o início da plasticidade é verificado em vários metais e ligas dúcteis, principalmente no caso dos aços de baixo carbono, pelo fenômeno do escoamento. O escoamento é uma transição heterogênea e localizada, caracterizada por um grande aumento da

deformação com pouca variação da tensão durante sua maior parte. Além disso, é identificado praticamente por uma oscilação ou uma parada do ponteiro da máquina durante a duração do fenômeno. O limite de escoamento, é a tensão atingida durante o escoamento e é dado por:

$$\sigma_e = Q_e / S_0 \quad (5)$$

Onde  $Q_e$  é a força de escoamento. O limite de escoamento é dado em  $\text{kgf/mm}^2$ .

Em seguida ao escoamento ocorre o encruamento, que consiste em um endurecimento causado pela quebra dos grãos que compõem o material quando deformados a frio. O material resiste cada vez mais à tração externa, exigindo uma tensão cada vez mais elevada para se deformar. Nessa fase, a tensão volta a subir, até atingir um valor máximo num ponto chamado de limite de resistência (B) (TELECURSO 2000, 1995).

Para o cálculo do limite de resistência (LR), basta aplicar a fórmula:

$$\sigma_r = Q_r / S_0 \quad (6)$$

Onde  $Q_r$  é a carga máxima atingida durante o ensaio de tração (SOUZA, 1982).

O limite de resistência à tração é o valor de tensão máxima que o material suporta. É a relação entre a carga aplicada pela área da seção transversal do material (ZOLIN, 2011).

Após atingir a força  $Q_r$ , entra-se na fase de ruptura do material, caracterizada pelo fenômeno da estrição, que é a diminuição muitas vezes sensível da seção transversal do corpo de prova, numa certa região do mesmo. Quanto mais mole é o material, mais estrita se torna a seção nessa fase. É na região de estrição que acontece a ruptura do corpo de prova, encerrando o ensaio (SOUZA, 1982).

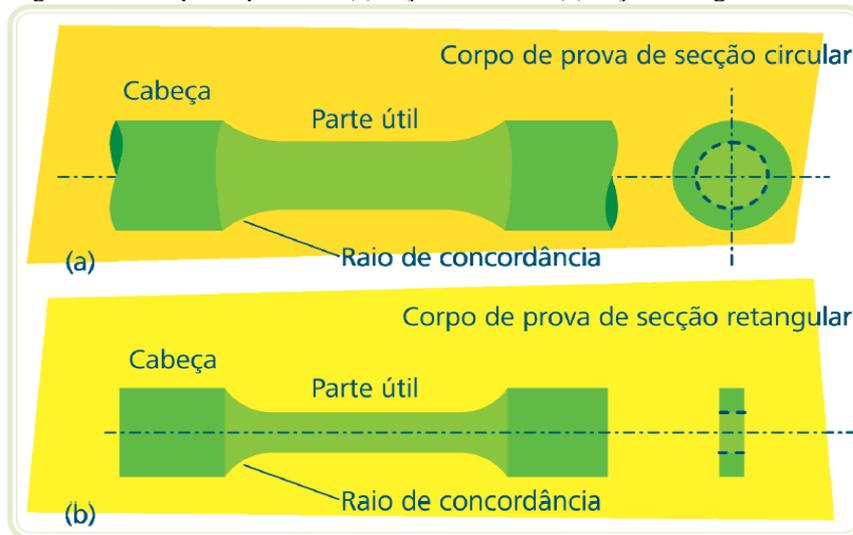
Segundo Garcia et al (2012) o coeficiente de estrição ( $\varphi$ ) é a diferença entre as seções inicial ( $S_0$ ) e final ( $S_f$ ) (após a ruptura) do corpo de prova, dada em porcentagem da seção inicial. O coeficiente é calculado através da expressão:

$$\varphi = ((S_0 - S_f) / S_0) \cdot 100\% \quad (7)$$

### 2.5.3 Corpo de prova

Os ensaios de tração podem ser realizados com uma parte do próprio material. Para esse fim, são retirados pedaços de barras redondas, quadradas ou retangulares, da peça que se deseja ensaiar. Mesmo que o ensaio possa ser realizado diretamente em um pedaço do próprio material em busca de descobrir algumas características, é necessário, para efeito de maiores certezas e comparações, um padrão. Por isso, utiliza-se o corpo-de-prova (ZOLIN, 2011).

Figura 11 – Corpo de prova de (a) seção circular e (b) seção retangular



Fonte: (ZOLIN, 2011)

O corpo de prova tem forma e dimensões especialmente indicadas para o ensaio e obedece a normas específicas. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) tem o método MB-4, o qual indica a forma e as dimensões de um corpo de prova, de acordo com o caso e o material utilizados no ensaio (ZOLIN,2011).

A seção transversal desses corpos de prova pode ser circular, quadrada ou retangular. Normalmente, a parte central do corpo de prova possui uma seção transversal menor do que as extremidades, de forma a provocar a ruptura numa seção em que as tensões não são afetadas pelas garras da máquina de ensaio (CHIAVERINI, 1986).

A parte útil do corpo de prova pode ter a forma da seção transversal circular ou retangular, segundo as dimensões do produto acabado do qual foi obtido. Os corpos de prova retirados de chapas, lâminas ou placas, mantêm a espessura da seção transversal do material original e a forma retangular. A seção transversal do corpo de prova será circular, para os materiais que originalmente são circulares, que sejam muito grandes, ou tenham formas irregulares (SOUZA, 1982).

## 2.6 Metalografia

O controle de qualidade de um produto metalúrgico pode ser estrutural e dimensional. O controle dimensional preocupa-se em controlar as dimensões físicas de um determinado produto, denominado Metrologia. O controle estrutural preocupa-se com o material que forma

a peça, sua composição, propriedade, estrutura, aplicação, entre outros. Pode ser: físico, químico, metalográfico e especial (ROHDE, 2010).

A metalografia é o ramo da metalurgia física que examina e determina a constituição e a estrutura subjacente dos constituintes em metais, ligas e materiais (*AMERICAN SOCIETY FOR METALS*, 2004).

### 2.6.1 Ensaio metalográfico

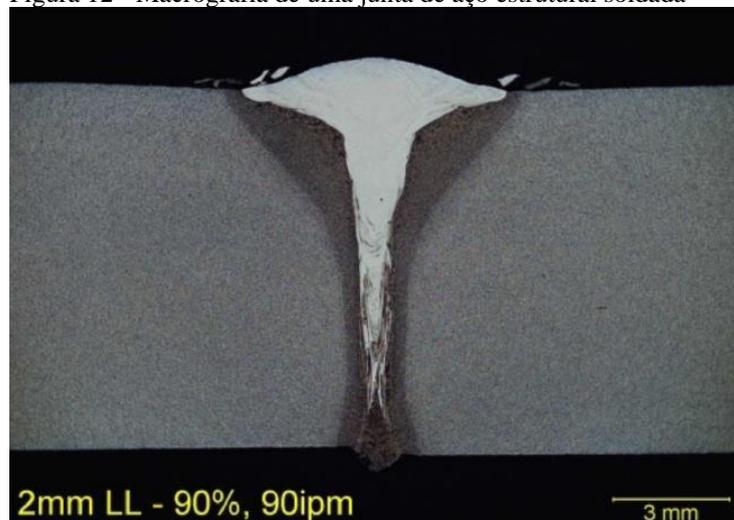
O ensaio metalográfico procura relacionar a estrutura íntima do material com as suas propriedades físicas, com o processo de fabricação, com o desempenho de suas funções, entre outros. É classificado em: Macrográfico e Micrográfico (ROHDE, 2010).

#### 2.6.1.1 Macrografia

A macrografia consiste no exame do aspecto de uma peça ou amostra metálica, de acordo com uma seção plana corretamente polida e, geralmente, atacada por um reativo adequado. O aspecto obtido é denominado macroestrutura, sendo o exame realizado à olho nu ou com auxílio de uma lupa. A palavra macrografia também é utilizada para denominar os documentos que reproduzem a macroestrutura, em tamanho natural ou com ampliação máxima de 10 vezes (COLPAERT, 2008).

Por meio da macrografia tem-se uma ideia do conjunto, referente à homogeneidade do material, a distribuição e natureza das falhas, impureza e ao processo de fabricação, qualidade de solda, profundidade de tratamentos térmicos, entre outras características (ROHDE, 2010).

Figura 12 - Macrografia de uma junta de aço estrutural soldada



Fonte: (CORRÊA et al, 2017).

De acordo com Oliveira e Sobral (2009), os exames macrográficos têm como objetivo:

- a) Verificar o processo de obtenção (forjado, fundido ou laminado);
- b) Constatar a existência de porosidades e segregações;
- c) Existência de solda;
- d) Zonas de solda, características da solda.

#### 2.6.1.1.1 Preparo de corpos-de-prova para macrografia

O preparo de um corpo-de-prova de macrografia compreende as fases de: escolha e localização da seção a ser estudada, preparação de uma superfície plana e polida no lugar escolhido e ataque dessa superfície por um reagente químico (COLPAERT, 2008).

Quando a seção a examinar não é definida por quem solicita o ensaio ou pela norma aplicável, é necessário levar em conta a forma da peça, as informações desejadas e outras considerações. As principais seções realizadas em produtos de geometria regular e semi-acabados são as seções longitudinais e transversais (COLPAERT, 2008).

O corte transversal é feito se o objetivo é verificar: se a secção é inteiramente homogênea ou não; a natureza do material (aço, ferro fundido, entre outros); a existência de vazios; a profundidade de têmpera ou cementação; determinação de um tubo é com ou sem costura; a posição, forma e dimensões das bolhas. Um corte longitudinal será preferível quando se quer verificar, por exemplo: o método de fabricação de uma peça (fundida, laminada ou forjada); se a peça foi estampada ou torneada; a solda de barras; a extensão de tratamentos térmicos superficiais (OLIVEIRA; SOBRAL, 2009).

Para obter uma superfície adequada para o exame macrográfico, são necessárias duas etapas: corte ou desbaste e polimento (COLPAERT, 2008).

O corte é realizado com uma serra ou um cortador de disco abrasivo. Esta operação deve ser feita cautelosamente para evitar não só o encruamento em locais excessivos, como o aquecimento (OLIVEIRA; SOBRAL, 2009). O objetivo principal do corte é adquirir uma superfície plana, com baixa rugosidade e com a orientação desejada (COLPAERT, 2008).

O polimento para o exame macrográfico é realizado com lixa. O polimento é iniciado em direção normal aos riscos de usinagem ou de lixa grossa já existentes, até que eles desapareçam por completo. Após isso, se passa para uma lixa mais fina, alterando em 90° a direção do polimento, repetindo o processo sucessivamente. As amostras são lixadas utilizando uma sequência de lixas que geralmente são: 100, 220, 320, 440, 600, 1200 e tem o objetivo de

diminuir gradativamente a profundidade dos riscos até que estejam em uma profundidade igual à da granulometria da última lixa da sequência (BORGES, 2009).

O ataque da superfície por um agente químico é importante para evidenciar outras heterogeneidades da estrutura, assim como a relação entre as heterogeneidades observáveis sem ataque e as outras características estruturais. Quando uma superfície polida é submetida a um reativo de maneira uniforme, quase sempre acontece o fato de regiões serem atacadas mais intensamente do que outras. Esta diferença no ataque provém geralmente de duas causas principais: diversidade de composição química ou de estrutura cristalina (COLPAERT, 2008).

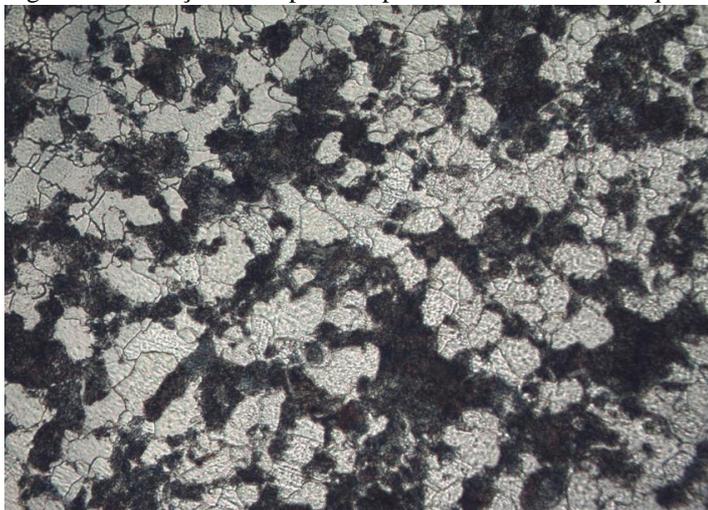
O contato do corpo-de-prova com o reativo pode ser feito de três maneiras:

- a) ataque por imersão: a superfície polida é mergulhada em um recipiente contendo o reagente, sendo esse o método mais usual;
- b) ataque por aplicação: o reativo é aplicado sobre a seção, com auxílio de um pincel ou algodão;
- c) impressão direta de Baumann: uma folha de papel fotográfico umedecido com um reagente adequado é aplicada sobre a superfície polida, adquirindo-se um decalque da maneira como os sulfetos se encontram distribuídos no aço (COLPAERT, 2008).

#### 2.6.1.2 Micrografia

A micrografia consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com auxílio de um microscópio, onde é possível observar as fases presentes e identificar a granulação do material (tamanho do grão), o teor aproximado de carbono no aço, a forma, a natureza, a quantidade, e a distribuição dos diferentes constituintes ou de certas inclusões (ROHDE, 2010).

Figura 13 – Micrografia de um aço VND após Têmpera e Recozimento. Ataque de nital 3% (400x)



Fonte: (FROGERI; NICOLAU, 2018)

As técnicas de preparação de amostras são muito semelhantes, para um grande número de técnicas que observam a microestrutura. As principais técnicas utilizadas são: Microscopia Ótica, Réplica Metalográfica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET), sendo a primeira a mais comum (COLPAERT, 2008).

#### 2.6.1.2.1 Microscopia Ótica

Dentre as variadas técnicas de observação da microestrutura dos aços e ferros fundidos, a mais comum é a microscopia óptica. Nela, emprega-se luz visível, que incide sobre a amostra e é refletida até o observador. A resolução que pode ser obtida em uma imagem depende do comprimento de onda da radiação empregada. Para a luz visível de cor verde, isto resulta em uma resolução de 220 a 250 nm, que corresponde a um aumento máximo da ordem de 1.400 vezes. Embora existam microscópios ópticos capazes de fornecer aumentos superiores a este valor, tais aumentos são chamados magnificação inútil, ou “vazios”, por não fornecerem informação adicional àquela obtida com o aumento máximo de cerca de 1400X (MANNHEIMER, 2002).

A técnica de preparação de amostras para realizar um ensaio micrográfico em microscópio ótico pode ser dividida em: escolha e localização da seção a ser estudada, obtenção de uma superfície plana e polida no local de estudo, exame ao microscópio para observação das ocorrências visíveis sem ataque, ataque químico da superfície, exame ao microscópio para observação da microestrutura e registro (fotografia) (COLPAERT, 2008).

As dimensões dos corpos-de-prova para o exame micrográfico podem ser limitadas por variados aspectos. A dificuldade de obter uma boa preparação para o exame, o peso máximo suportado pelo porta-amostra do microscópio, do mesmo modo que as dimensões da câmara ou porta de entrada de amostras podem limitar a maior dimensão praticável para o corpo-de-prova para exame micrográfico (COLPAERT, 2008).

A preparação da superfície para o exame micrográfico precisa de alguns cuidados especiais, com relação ao exame macrográfico. A preparação superficial envolve lixadeiras motorizadas juntamente com papéis de lixa de carboneto de silício (SiC), resfriamento e lubrificação por água. Uma regra prática bastante utilizada é submeter a amostra ao dobro do tempo necessário para eliminar os riscos da lixa anterior, em cada lixa (COLPAERT, 2008).

O exame ao microscópio antes da realização de qualquer ataque tem duas funções: a primeira, permitir avaliar a qualidade do polimento realizado. A segunda função importante do exame microscópio sem ataque é avaliar características estruturais que são visíveis nesta

condição, tais como inclusões não-metálicas, grafita, trincas, porosidades, entre outras. O exame metalográfico com o corpo de prova na condição polido e sem ataque químico é muito utilizado para análise de inclusões e microporosidades causadas pela contração volumétrica, durante a mudança de estado no processo de solidificação, ou para a observação da grafita em ferros fundidos (BONAVINA et al, 2008).

A primeira fase para a realização do ataque químico é a escolha do reagente a empregar. Em seguida, é necessário observar os cuidados de segurança do trabalho e cuidados ambientais relativos ao uso e ao descarte do reagente selecionado. A duração do ataque depende da concentração do reativo e da natureza e estrutura do material a ser examinado. O tempo médio para aços comuns e ferros fundidos, utilizando-se de reativos comuns, é aproximadamente de 5 a 15 segundos. Ao fim do ataque, deve-se lavar a superfície imediatamente com álcool, e enfim submeter o corpo-de-prova a um jato de ar quente (CHIAVERINI, 1986).

### **3 METODOLOGIA**

Para cumprir o objetivo deste trabalho, foram realizados ensaios de caracterização física, cuja metodologia baseia-se na NBR 7480 – Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado, e de caracterização mecânica, cuja metodologia baseia-se na NBR ISO 6892-1 – Método de ensaio de tração de materiais metálicos à temperatura ambiente.

As amostras utilizadas neste trabalho são barras de aço (vergalhões) CA-50 destinados à construção civil, fabricadas por três siderúrgicas diferentes, as quais serão denominadas de X, Y e Z. Foram utilizadas neste trabalho dez amostras de 8 mm de diâmetro nominal de cada marca, totalizando 30 corpos-de-prova.

As barras de vergalhão foram adquiridas em construtoras e comércios de materiais de construção. Após obter as barras, os seguintes procedimentos foram realizados:

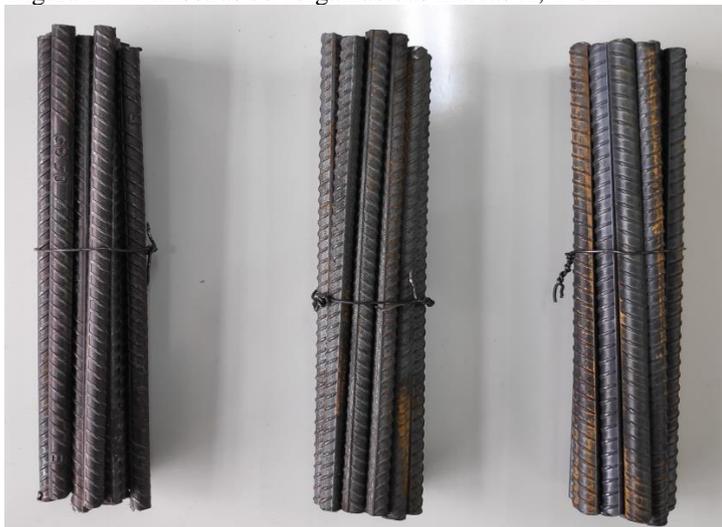
- a) Limpeza das barras para retirar sujidades;
- b) Medição do comprimento das barras com a trena e marcação do local do corte;
- c) Corte das barras com a esmerilhadeira e disco de corte;
- d) Nova limpeza das barras, com intuito de retirar as limalhas geradas no processo de corte;
- e) Separação das amostras geradas e identificação das marcas;
- f) Encaminhamento das amostras para o Laboratório de Ensaios Mecânicos do Centro Universitário do Sul de Minas;
- g) Realização dos ensaios de caracterização física e mecânica das amostras;
- g) Obtenção dos resultados.

### 3.1 Materiais e Equipamentos

Para a confecção dos corpos-de-prova e para a realização do ensaio de tração, foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- a) Vergalhão de aço CA-50 de 8 mm de diâmetro nominal, de 3 fabricantes distintos;
- b) Esmerilhadeira Angular de 4 ½" DeWALT;
- c) Disco de corte EHT SG STEELOX 115 x 1,0 x 22,23 mm PFERD;
- d) Trena emborrachada Supremo 3m;
- e) Balança de precisão AND HR-120;
- f) Extensômetro eletrônico NCS;
- g) Máquina de ensaio de tração PANTEC PANAMBRA.

Figura 14 – Amostras de vergalhão das marcas X, Y e Z



Fonte: O autor.

Figura 15 – Esmerilhadeira Angular de 4 ½" DeWALT



Fonte: O autor.

Figura 16 - Disco de corte EHT SG STEELOX PFERD



Fonte: O autor.

Figura 17 - Trena emborrachada Supremo 3m



Fonte: O autor.

Figura 18 - Balança de precisão AND HR-120



Fonte: O autor.

Figura 19 - Extensômetro eletrônico NCS



Fonte: O autor.

Figura 20 - Máquina de ensaio de tração PANTEC PANAMBRA



Fonte: O autor.

### 3.2 Caracterização das propriedades físicas

Antes de iniciar os ensaios de tração, foi necessário mensurar algumas características das amostras dos vergalhões, para verificar se estão em conformidade com a NBR 7480. As características analisadas foram a densidade linear de massa (kg/m), e o diâmetro efetivo (mm). Para determinar essas características, os corpos-de-prova, que já haviam sido previamente limpos, foram medidos com a trena e pesados na balança de precisão. Os resultados obtidos foram anotados para o posterior cálculo dessas propriedades.

#### 3.2.1 Procedimento de cálculo da densidade linear de massa ( $\mu$ )

A densidade linear de massa (expressa pela letra grega “ $\mu$ ”), de acordo com a NBR 7480, é o valor que representa a massa por unidade de comprimento do fio ou da barra de diâmetro nominal específico, expresso em quilogramas por metro. Essa relação é obtida a partir da divisão da massa ( $m$ ) em quilogramas pelo comprimento inicial da amostra ( $L_0$ ) em metros, conforme a equação:

$$\mu = m / L_0 \quad (8)$$

#### 3.2.2 Procedimento de cálculo do diâmetro efetivo ( $\Phi$ )

Segundo a NBR 7480, no item 4.4, a densidade linear de massa (kg/m) da barra ou fio é obtida pelo produto da área da seção nominal em metros quadrados por 7850 kg/m<sup>3</sup>, valor correspondente à densidade do aço, desse modo, pode-se inferir o diâmetro efetivo através da fórmula de densidade. A densidade é calculada pela equação a seguir, sendo “ $\rho$ ” a densidade (kg/m<sup>3</sup>), “ $m$ ” a massa (kg) e “ $v$ ” o volume (m<sup>3</sup>):

$$\rho = m / v \quad (9)$$

Utilizando-se de base a equação anterior e sabendo que o volume de um cilindro é calculado pelo produto da área da seção transversal e comprimento, sendo que “ $L$ ” é em metros, pode-se inferir a seguinte expressão para o cálculo do diâmetro efetivo ( $\Phi$ ), em metros, das amostras de vergalhão:

$$\rho = m/v = m/(\pi\Phi^2L/4) \therefore \Phi^2 = m/(\pi L\rho/4) \therefore \Phi = \sqrt{m/(\pi L\rho/4)} \quad (10)$$

Agora, substituindo o valor da constante  $\pi$  e o valor da densidade linear de massa por  $7850 \text{ kg/m}^3$ , obtém-se a equação do diâmetro efetivo para vergalhões CA-50, em metros:

$$\Phi = \sqrt{m/(\pi L \rho/4)} = \sqrt{m/\pi L * 7850/4} \therefore \Phi = 0,01273\sqrt{m/L} \quad (11)$$

Para calcular o diâmetro efetivo em milímetros (mm), basta utilizar a massa da amostra em gramas (g) e o comprimento em milímetros (mm), na equação a seguir:

$$\Phi = 12,73\sqrt{m/L} \quad (12)$$

### 3.3 Caracterização das propriedades mecânicas

Para realizar a caracterização das propriedades mecânicas das amostras de vergalhão, foi realizado o ensaio de tração, baseado na NBR ISO 6892-1.

A princípio, foi escolhida e separada uma marca dos vergalhões. Posteriormente, as garras do equipamento de tração foram trocadas para garras mais adequadas ao ensaio.

Em seguida, procedeu-se à montagem do corpo de prova na máquina de ensaio e a fixação do extensômetro eletrônico no corpo-de-prova. A inserção dos corpos-de-prova no equipamento foi manual, a célula de carga utilizada equivale a 100 kgf e a velocidade de operação da máquina foi definida em 9 mm/min.

Após a montagem do corpo-de-prova, a máquina foi acionada, iniciando o processo de tração. Durante os ensaios, quando o software captava todas as informações necessárias, o equipamento era pausado e o extensômetro retirado, para evitar danos nos seus componentes internos. Após a retirada do extensômetro, o ensaio era retomado.

Os dados obtidos foram armazenados no software auxiliar da máquina de tração, sendo este procedimento repetido com todos os corpos-de-prova.

#### 3.3.1 Dados obtidos após o Ensaio de Tração

Após o ensaio de tração, é possível visualizar os seguintes dados:

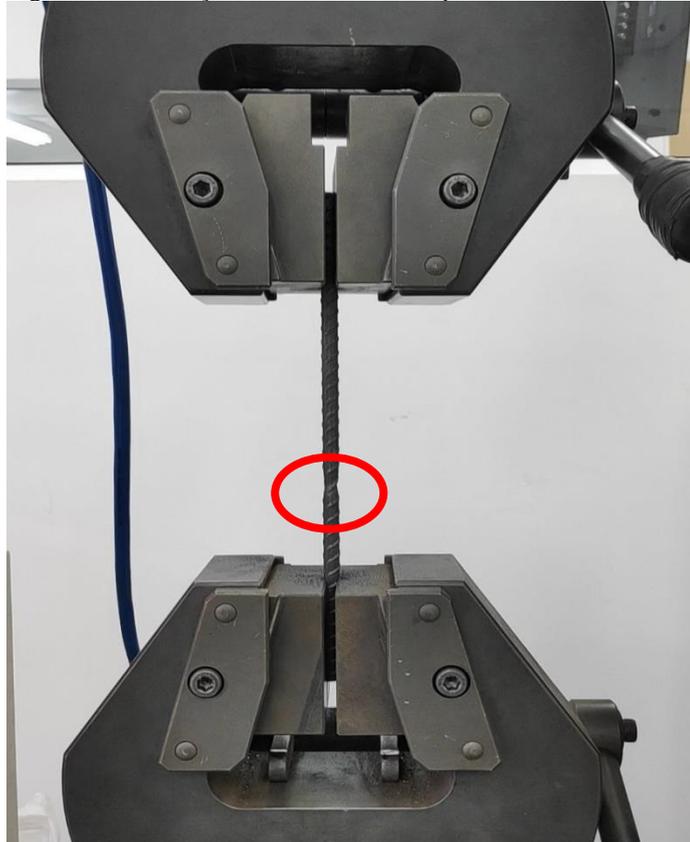
- a) a força máxima suportada pelo corpo-de-prova durante o ensaio;
- b) a tensão máxima suportada pelo corpo-de-prova;
- c) a tensão de escoamento do corpo-de-prova;
- d) a deformação elástica e a deformação plástica dos corpos-de-prova;
- e) a força de escoamento, calculada pelo produto da tensão de escoamento pela área da seção.

Figura 21 – Ensaio de tração em um dos corpos-de-prova



Fonte: O autor.

Figura 22 – Estricção no CP ocasionada pelo ensaio, momentos antes da ruptura



Fonte: O autor.

Figura 23 – Corpos-de-prova após a realização do ensaio de tração



Fonte: O autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização dos ensaios de caracterização física e mecânica foram gerados tabelas e gráficos com os dados obtidos. As análises dos resultados apresentados a seguir estão classificadas por ensaio, e organizadas de acordo com a sua ordem de execução.

### 4.1 Propriedades físicas

Os ensaios de caracterização física estão divididos em: densidade linear de massa e diâmetro efetivo. Os resultados dos ensaios para cada marca, estão apresentados nas tabelas e gráficos a seguir:

Tabela 4 – Dados físicos obtidos e calculados para a marca X

Corpo de Prova	Massa (g)	Comprimento (mm)	Marca X		
			Densidade Linear de Massa (kg/m)	Diâmetro Efetivo Calculado (mm)	Área da Seção Calculada (mm <sup>2</sup> )
X-1	83,51	219	0,381	7,861	48,533
X-2	83,13	219	0,380	7,843	48,313
X-3	82,68	218	0,379	7,840	48,271
X-4	83,44	219	0,381	7,858	48,493
X-5	82,94	219	0,379	7,834	48,202
X-6	83,72	220	0,381	7,853	48,434
X-7	82,56	218	0,379	7,834	48,201
X-8	83,14	219	0,380	7,844	48,318
X-9	83,75	220	0,381	7,854	48,452
X-10	82,63	218	0,379	7,837	48,242

Fonte: O autor.

Tabela 5 – Dados físicos obtidos e calculados para a marca Y

Corpo de Prova	Marca Y				
	Massa (g)	Comprimento (mm)	Densidade Linear de Massa (kg/m)	Diâmetro Efetivo Calculado (mm)	Área da Seção Calculada (mm <sup>2</sup> )
Y-1	84,62	220	0,385	7,895	48,955
Y-2	84,68	220	0,385	7,898	48,990
Y-3	84,89	220	0,386	7,908	49,111
Y-4	84,7	220	0,385	7,899	49,001
Y-5	84,86	220	0,386	7,906	49,094
Y-6	84,78	220	0,385	7,902	49,048
Y-7	84,04	218	0,386	7,904	49,065
Y-8	85,03	220	0,387	7,914	49,192
Y-9	85,13	221	0,385	7,901	49,027
Y-10	84,19	219	0,384	7,893	48,929

Fonte: O autor.

Tabela 6 – Dados físicos obtidos e calculados para a marca Z

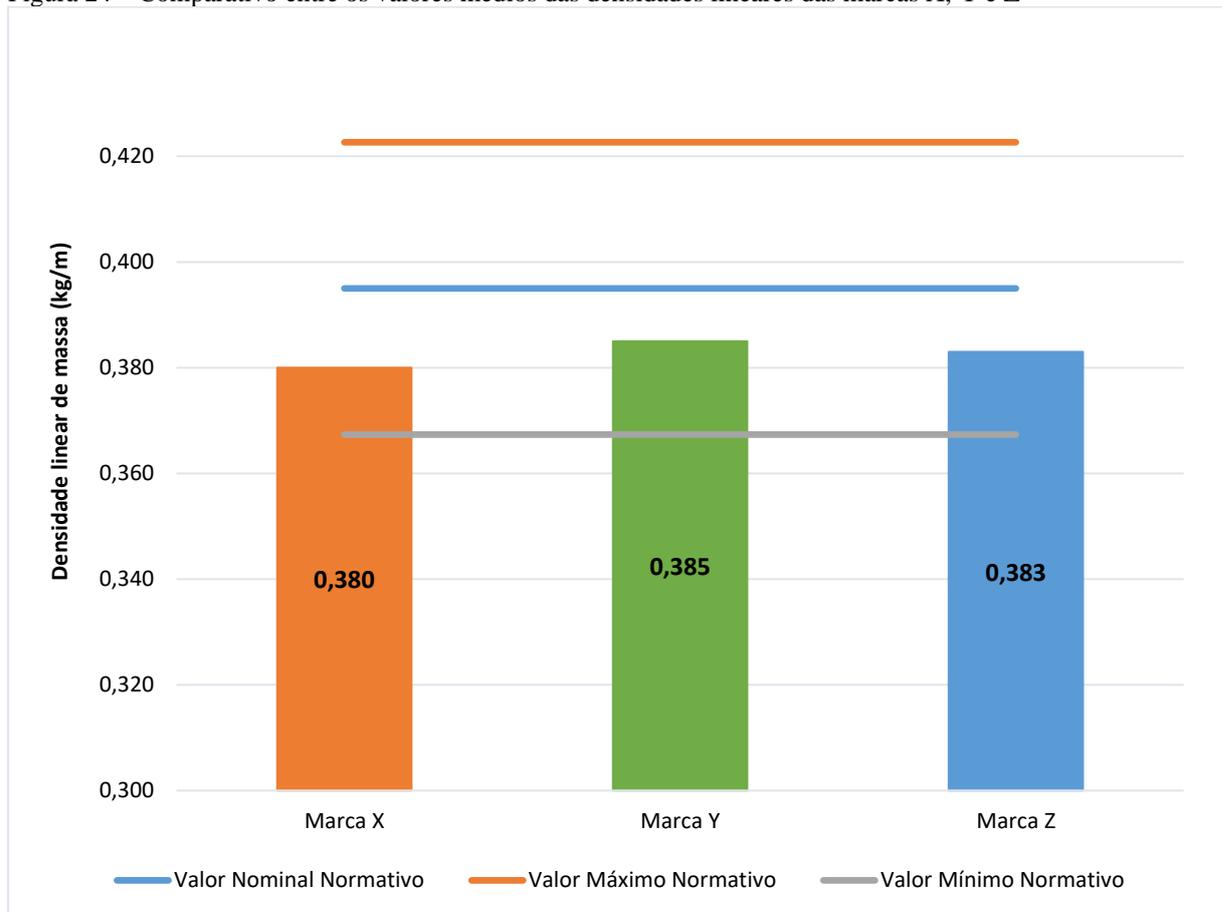
Corpo de Prova	Marca Z				
	Massa (g)	Comprimento (mm)	Densidade Linear de Massa (kg/m)	Diâmetro Efetivo Calculado (mm)	Área da Seção Calculada (mm <sup>2</sup> )
Z-1	83,2	218	0,382	7,864	48,575
Z-2	84,11	220	0,382	7,871	48,660
Z-3	84,25	219	0,385	7,896	48,963
Z-4	83,1	217	0,383	7,878	48,740
Z-5	84,6	221	0,383	7,876	48,722
Z-6	84,07	220	0,382	7,869	48,637
Z-7	83,61	219	0,382	7,866	48,592
Z-8	83,25	217	0,384	7,885	48,828
Z-9	84,3	220	0,383	7,880	48,770
Z-10	83,89	219	0,383	7,879	48,754

Fonte: O autor.

Observando as tabelas anteriores, pode-se evidenciar que as 3 marcas apresentaram diferenças quanto à densidade linear, diâmetro efetivo e conseqüentemente a área da seção transversal. De acordo com a tabela 2, adaptada da tabela B.1 da NBR 7480:2007, o diâmetro nominal deve ser 8,00 mm e a densidade linear nominal do vergalhão dessa bitola deve ser 0,395 kg/m, entretanto, a densidade linear tem uma variação permitida de  $\pm 7\%$ .

O gráfico a seguir demonstra uma comparação entre o valor médio da densidade linear das marcas X, Y e Z com os valores prescritos na norma brasileira.

Figura 24 – Comparativo entre os valores médios das densidades lineares das marcas X, Y e Z



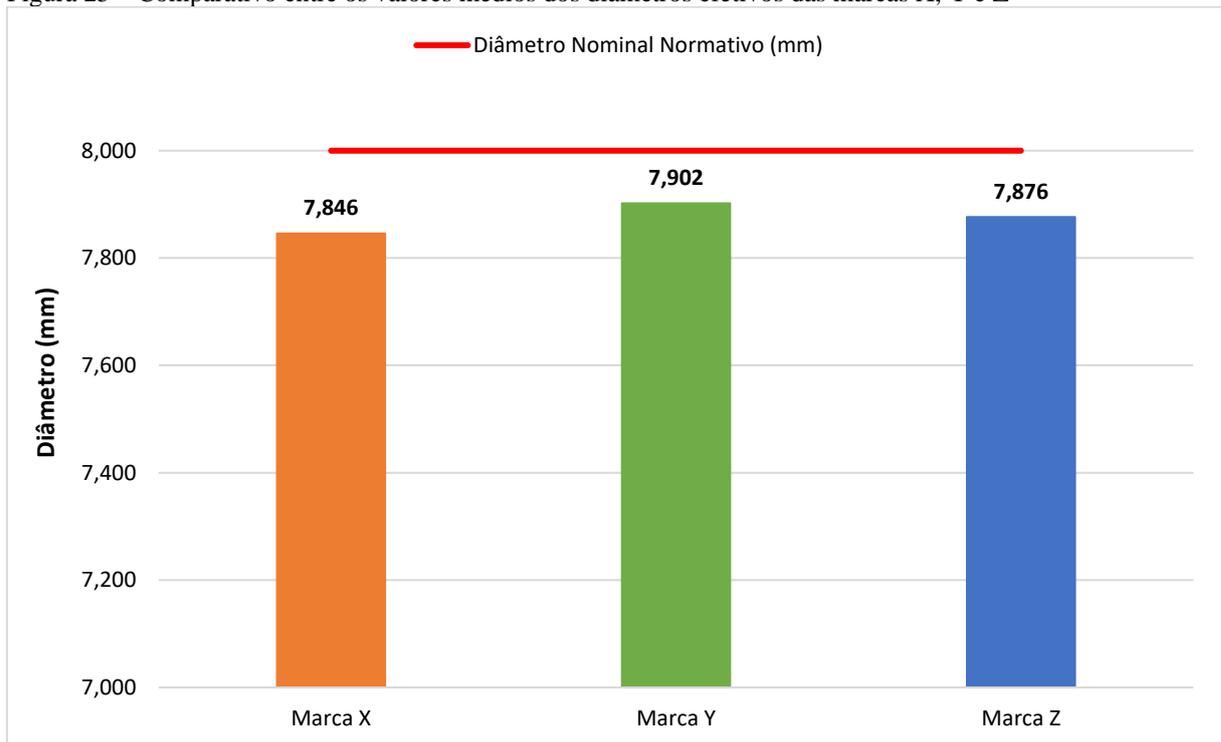
Fonte: O autor

Ao analisar o gráfico anterior, pode-se verificar que as três marcas apresentaram valores médios das densidades lineares de massa abaixo do valor referencial normativo, apesar de estarem dentro dos parâmetros da norma, que estabelece um intervalo de tolerância para o valor de  $\mu$  entre 0,367 kg/m e 0,423 kg/m.

A marca Y obteve o melhor resultado entre as três, sendo seguida pela marca Z e X, respectivamente. Isto se deve à menor variação média dos valores de densidade linear em relação ao valor nominal de referência. Enquanto as amostras da marca Y obtiveram uma média de variação de 2,53 %, as amostras Z e Y variaram, nessa ordem, 3,04 % e 3,80 %.

Com relação ao diâmetro efetivo médio das marcas, a situação se repete. A marca Y é a que apresenta o diâmetro mais próximo do referencial normativo, em seguida a marca Z e por último a marca X. Deve-se ressaltar que a NBR 7480 não estabelece uma tolerância mínima e máxima para os diâmetros nominais das barras. O próximo gráfico exhibe e compara os resultados obtidos:

Figura 25 – Comparativo entre os valores médios dos diâmetros efetivos das marcas X, Y e Z



Fonte: O autor.

A marca Y, segundo a figura 25, apresenta um diâmetro efetivo médio 1,225 % menor que o diâmetro nominal. Já a marca Z, o diâmetro médio é 1,55 % menor e na marca X esse valor é de 1,925 %. É importante observar que a ordem desse resultado já era esperada, pois, de acordo com a equação 12, o diâmetro efetivo é diretamente correlacionado com a densidade linear de massa.

## 4.2 Propriedades mecânicas

No ensaio de tração, constatou-se que os desempenhos das amostras dos três fabricantes foram diferentes, mesmo que os corpos de prova tenham sido preparados e ensaiados sob as mesmas condições.

Após o término dos ensaios, os dados obtidos pelo software foram compilados em tabelas e posteriormente em gráficos, para melhor análise das propriedades dos vergalhões. As tabelas demonstram os resultados de todos os corpos-de-prova ensaiados, enquanto os gráficos demonstram o resultado médio das características.

Os valores obtidos podem ser visualizados nas tabelas a seguir:

Tabela 7 – Propriedades mecânicas das amostras de vergalhões da marca X

Força Máxima (N)	Resistência Máxima (Mpa)	Deformação Específica (mm)	Força de Escoamento (N)	Tensão de Escoamento (Mpa)
36.041,400	744,717	17,351	31.214,681	644,983
35.857,035	740,892	17,356	30.816,642	636,746
35.112,710	725,496	17,249	29.758,948	614,877
35.726,607	738,147	18,102	30.600,430	632,235
35.924,701	742,265	19,832	30.993,301	640,374
36.054,149	744,913	20,174	31.236,487	645,376
36.057,091	745,011	18,380	31.111,522	642,826
36.174,771	747,463	19,228	31.243,573	645,572
35.932,546	742,461	19,465	31.167,485	644,003
35.822,712	740,206	18,791	30.730,267	634,981

Fonte: O autor.

Tabela 8 – Propriedades mecânicas das amostras de vergalhões da marca Y

Força Máxima (N)	Resistência Máxima (Mpa)	Deformação Específica (mm)	Força de Escoamento (N)	Tensão de Escoamento (Mpa)
34.084,973	695,390	22,560	28.177,424	574,866
34.469,394	703,235	21,056	28.489,764	581,240
34.150,678	696,762	24,487	28.089,594	573,101
34.623,358	706,373	21,919	28.571,601	582,907
34.072,225	695,095	21,404	28.414,351	579,671
34.337,004	700,489	20,394	28.107,023	573,395
34.497,833	703,823	22,465	28.460,592	580,652
33.985,926	693,330	21,202	28.025,170	571,728
34.415,458	702,156	24,303	28.450,432	580,456
34.736,135	708,629	22,039	28.635,920	584,182

Fonte: O autor.

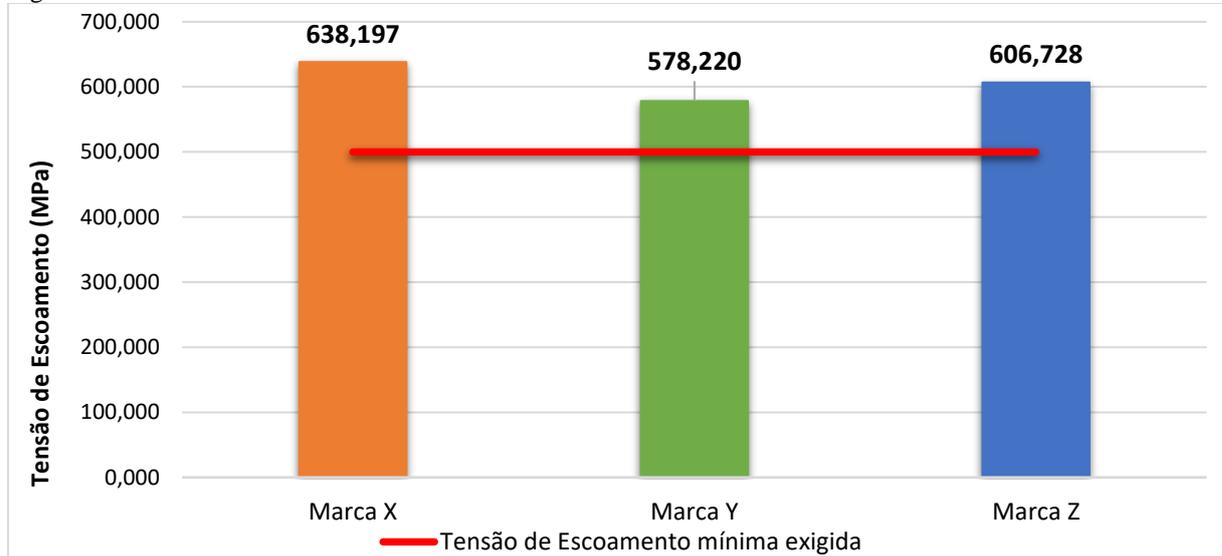
Tabela 9 – Propriedades mecânicas das amostras de vergalhões da marca Z

Força Máxima (N)	Resistência Máxima (Mpa)	Deformação Específica (mm)	Força de Escoamento (N)	Tensão de Escoamento (Mpa)
33.741,741	691,859	20,033	29.284,292	600,461
34.125,181	699,704	17,088	29.820,673	611,445
34.105,567	699,312	21,710	29.585,898	606,639
34.273,261	702,745	17,448	29.968,777	614,485
33.248,466	681,758	14,827	28.346,326	581,240
34.213,441	701,568	19,450	29.914,044	613,406
34.256,590	702,450	21,591	29.837,619	611,837
34.122,239	699,704	21,758	29.497,683	604,874
34.086,935	698,920	18,249	29.634,158	607,620
34.258,551	702,450	17,050	30.006,722	615,269

Fonte: O autor.

Com os valores obtidos nos testes, foi possível construir os gráficos com as médias dos resultados de cada marca de vergalhão. O gráfico a seguir representa a tensão de escoamento:

Figura 26 – Tensão de Escoamento média das amostras

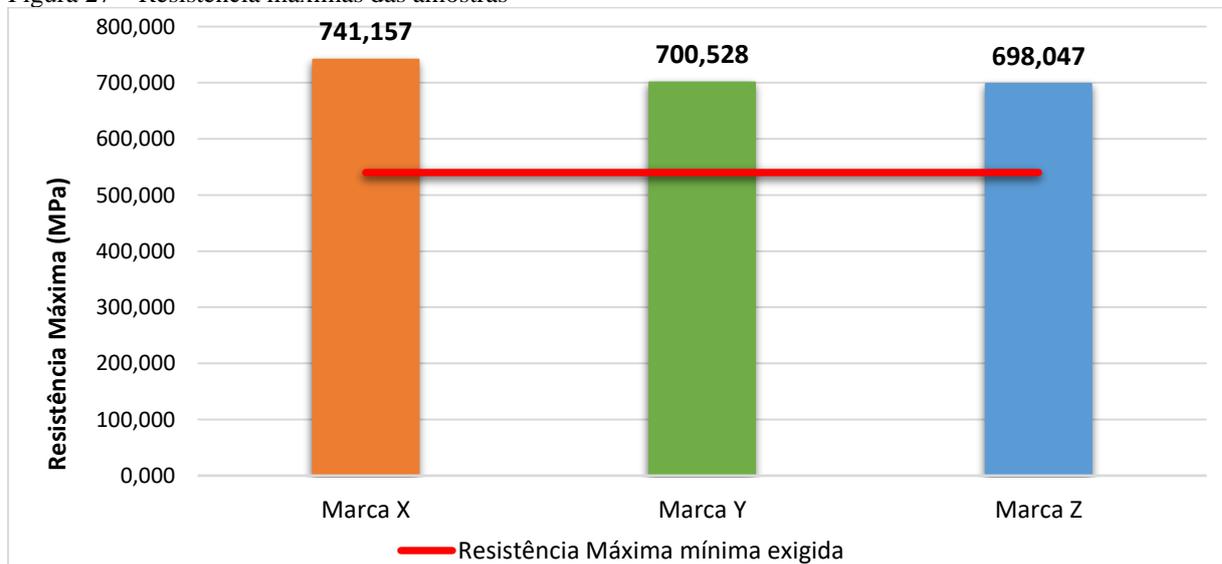


Fonte: O autor.

Ao analisar a figura 26, pode-se observar que as três marcas atendem ao valor mínimo de tensão de escoamento exigido pela NBR 7480, que corresponde à 500 MPa. Entretanto, ao contrário do observado nos gráficos de densidade linear e diâmetro efetivo (figuras 24 e 25), a marca X obteve o valor médio mais alto e a marca Y obteve o valor mais baixo. Isto demonstra que a marca X é a que resiste a uma maior tensão antes de se deformar plasticamente.

Com relação aos valores médios de resistência máxima das amostras, estes estão demonstrados no gráfico a seguir:

Figura 27 – Resistência máximas das amostras

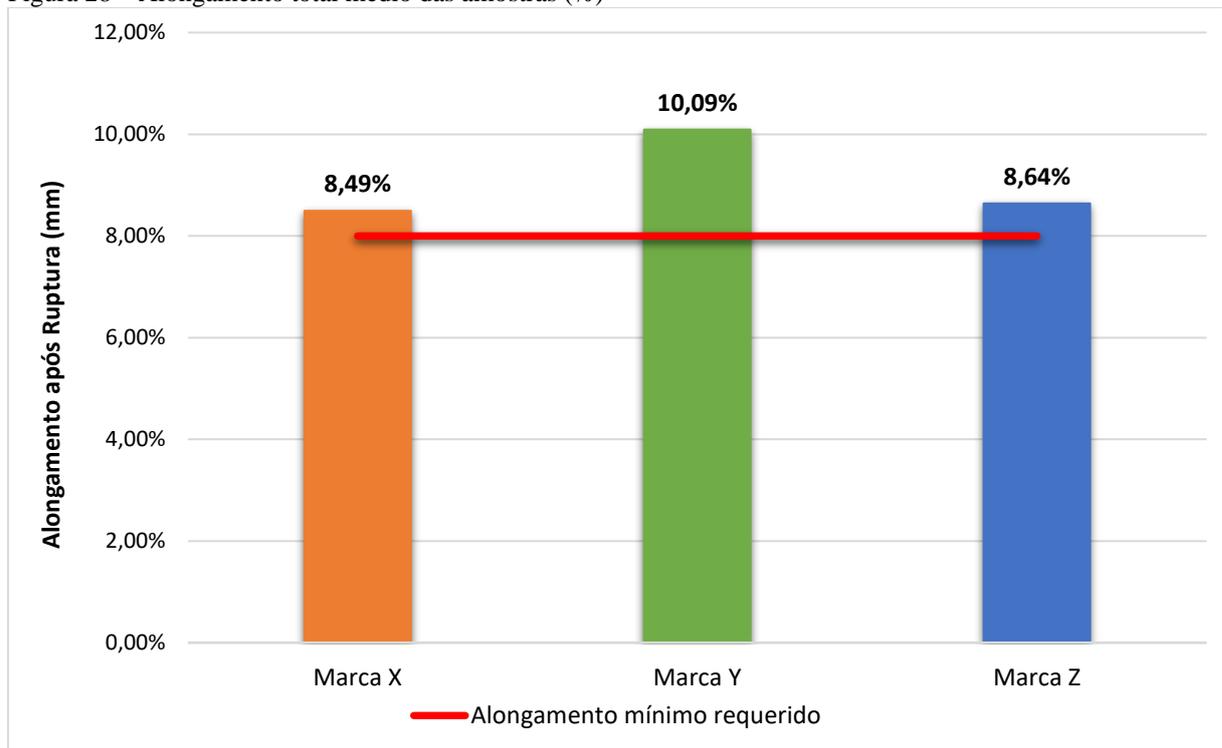


Fonte: O autor.

Do mesmo modo que a tensão de escoamento, pode-se observar que as três marcas atendem ao valor mínimo de resistência máxima exigido pela NBR 7480, que corresponde à 540 MPa. Pode-se notar que novamente a marca X apresenta o maior valor médio, todavia, nessa propriedade a marca Y superou a marca Z, mesmo que os valores entre as duas sejam muito próximos.

A respeito do alongamento total das amostras, o gráfico a seguir representa o valor médio obtido por cada marca:

Figura 28 – Alongamento total médio das amostras (%)

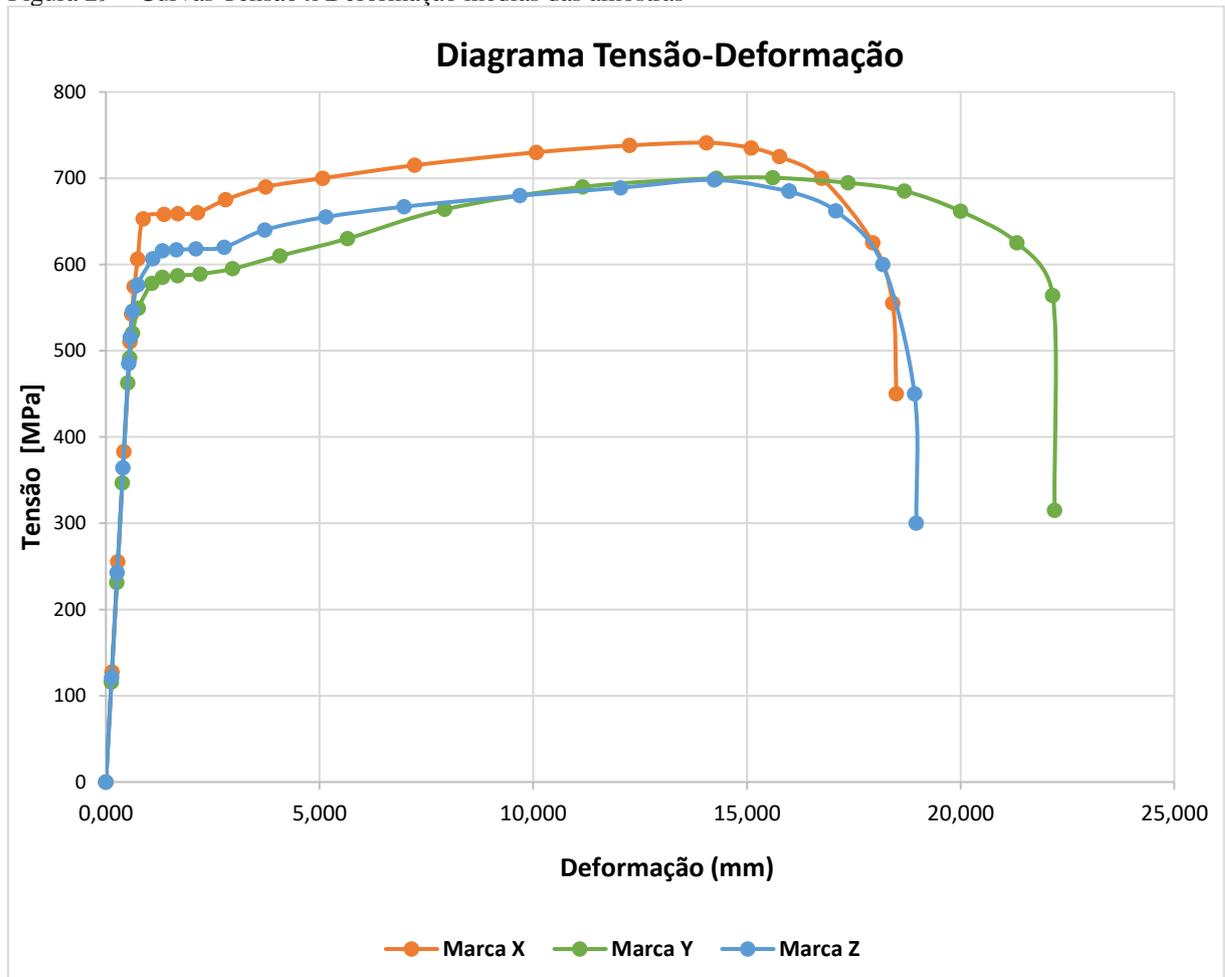


Fonte: O autor.

Pelo gráfico pode-se observar que as três marcas superaram o valor mínimo de 8 % de alongamento para os vergalhões CA-50, requerido pela NBR 7480. As amostras de vergalhões da marca Y foram as que apresentaram o maior valor médio de alongamento, sendo seguida pela marca Z e X, respectivamente. Com este resultado, é possível inferir que as barras de vergalhão da marca Y são constituídas por um material relativamente mais dúctil que as outras marcas, pois suportou uma maior deformação antes da ocorrência da ruptura. Além disso, pode-se ressaltar que as marcas X e Z apresentaram um desempenho semelhante nessa propriedade, mesmo com as consideráveis diferenças nos valores de tensões de escoamento e resistência máxima.

Com todos os dados obtidos durante os ensaios de tração, foi possível construir um gráfico das curvas de Tensão x Deformação médias das amostras de cada marca. No gráfico é possível observar o comportamento das marcas de vergalhão ao serem submetidas a uma força de tração axial, e evidenciar os resultados já demonstrados nas figuras 26, 27 e 28.

Figura 29 – Curvas Tensão x Deformação médias das amostras



Fonte: O autor

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos objetivos propostos e na investigação das propriedades físicas e mecânicas obtidas com os ensaios realizados, conclui-se que:

a) A respeito das densidades lineares de massa, as três marcas atenderam às especificações mínimas exigidas na NBR 7480, entretanto, ficaram abaixo do valor nominal normativo. A marca com melhor desempenho nessa característica foi a Y, sendo seguida pelas marcas Z e X, nessa ordem.

b) Visto que o diâmetro efetivo é diretamente relacionado ao valor da densidade linear de massa, esta característica também ficou abaixo do valor nominal normativo, entretanto não é mencionado uma faixa de tolerância para essa propriedade na norma.

c) Em relação às tensões de escoamento das amostras, todas as marcas apresentaram resultados categóricos, atingindo valores médios entre 15% e 28% maiores que o valor nominal especificado. Como a tensão é calculada pela divisão da força de tração pela área da seção transversal do vergalhão, pode aparentar que a marca X apresentou o maior valor de tensão de escoamento por ter a menor área entre as três marcas, assim como a marca Y apresentou o menor valor de tensão por ter a maior área entre as marcas analisadas; entretanto ao observar as tabelas 7, 8 e 9 é possível visualizar que as forças de escoamento realmente são superiores na marca X, sendo seguida pela marca Z e posteriormente a marca Y.

d) Em relação à resistência máxima das amostras, todas as marcas apresentaram resultados superiores ao exigido pela NBR 7480, atingindo valores médios entre 29% e 38% maiores que o valor nominal especificado.

e) No tocante ao alongamento após ruptura, as três marcas atingiram o valor mínimo de 8% exigido pela norma. Como citado anteriormente no item 4.2, a marca Y se destacou nesse teste, ultrapassando um alongamento superior a 10% do comprimento inicial. Este comportamento caracteriza um material mais dúctil que as demais marcas, por suportar uma maior deformação antes da ruptura do corpo-de-prova.

f) Levando em consideração todas as propriedades obtidas mediante os ensaios de caracterização física e tração, pode-se dizer que a marca que saiu melhor nos ensaios foi a X. Apesar de ter sido a última colocada no ensaio de caracterização física, a diferença entre ela e a marca Y (primeira colocada) é pouco influente, sendo em média 1,3 %. Todavia, no ensaio de caracterização mecânica, a marca X foi a que apresentou os maiores valores médios de tensão de escoamento e resistência máxima, propriedades extremamente importantes para um vergalhão, superando suas concorrentes em no mínimo 5,80 % do valor.

g) Os dados dos ensaios aqui evidenciados demonstram que, ainda que as amostras apresentem algumas características físicas abaixo do nominal normativo, as amostras das três marcas apresentaram de maneira geral um desempenho mecânico satisfatório, atendendo as especificações e os requisitos de segurança exigidos pela NBR ISO 6892-1 e NBR 7480.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Ficam como principais sugestões para futuros trabalhos, para um entendimento mais abrangente do comportamento dos vergalhões para construção civil, os seguintes estudos:

- a) Investigar as propriedades físicas e mecânicas de vergalhões CA-50 de outros diâmetros, para verificar se estão em conformidade com a NBR 7480.
- b) Comparar vergalhões de outras classificações, como o CA-60 por exemplo.
- c) Investigar a microestrutura dos vergalhões através de ensaios metalográficos como a Microscopia Ótica e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a fim de correlacionar sua constituição com as propriedades mecânicas apresentadas pelas amostras.
- d) Realizar estudos do comportamento de vergalhões submetidos a condições adversas, como elevada ou baixa temperatura, carregamento excêntrico, entre outros.
- e) Realizar outros testes em vergalhões como: verificação da soldabilidade de vergalhões soldáveis, que deve atender aos requisitos estabelecidos na NBR 6118; ensaio de dobramento segundo a NBR 6153; e ensaio de fadiga, de acordo NBR 7478; com intuito de verificar se estão atendendo as exigências de suas respectivas normas.

## REFERÊNCIAS

- ALMADA, M. C. et al. **Modernização do Controle dos Eletrodos da Aciaria Elétrica da CSN Aços Longos**. In: Seminário de Aciaria, 47º, 2016, Rio de Janeiro. Artigo. Rio de Janeiro: ABM Week, 2016. 590-590.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM Handbook: Metallography and Microstructures**. Vol. 9. ASM International, 2004.
- ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação**. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13284: Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892: Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente** Rio de Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 87: Aço carbono e ligados para construção mecânica e composição química**. Rio de Janeiro, 2000.
- BECK, D.; BOEIRA, A. P. **Tecnologia dos Materiais**. Curso Técnico em Mecânica Industrial. Passo Fundo, 2007.
- BEZERRA, E. C. M.; SANTOS, B. M.; SOUZA, R.A. **Utilização de Aços em Dutos na Indústria do Petróleo**. In: Congresso Brasileiro De Pesquisa E Desenvolvimento Em Petróleo E Gás, 10º, 2019, Natal. Artigo. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2019.
- BONAVINA, L. F. et al. **Análise Microestrutural de Aços Inoxidáveis Altamente Ligados: Da Amostragem à Interpretação**. 2008.
- BORGES, J. N. **Preparação de amostras para análise microestrutural**. Santa Catarina: UFSC, 2009.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Siderurgia no Brasil 2010-2025**. Brasília: Centro de Gestão e Recursos Estratégicos, 2010. 112 p.
- BRASIL. Instituto Aço Brasil. **Processo Siderúrgico**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>>. Acesso em: 25 maio 2020.
- CALDAS, J.A.C. **Análise de Duas Rotas Tecnológicas na Siderurgia Brasileira com Foco na Eficiência Energética**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011.
- CALLISTER, W. D; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

- CARBONI, M. C. **Conhecendo o Forno Elétrico a Arco**. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/conhecendo-o-forno-eletrico-a-arco>>. Acesso em: 30 maio 2020.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2008.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. 2. ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1986.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Revisão técnica André Luiz V. da Costa e Silva. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **A Indústria do Aço no Brasil**. Brasília: Instituto Aço Brasil, 2017. 64 p.
- CONVAÇO. **Reforma Alto Forno 1 e Regeneradores 1, 2 e 3 – Usiminas Ipatinga**. Disponível em: <<https://convaco.com.br/reforma-alto-forno-1-e-regeneradores-1-2-e-3-usiminas-ipatinga/>>. Acesso em: 15 maio 2020.
- CORRÊA, F. A. et al. **Propriedades Mecânicas de uma Junta de Aço C-Mn Soldada pelo Processo Híbrido Laser-GMAW**. In: Congresso Anual da ABM, 72º, 2017, São Paulo. Artigo. São Paulo: ABM Week, 2017. 2399-2399.
- FROGERI, A. S.; NICOLAU, D. M. **Tratamentos Térmicos nos Aços**. Varginha, 2018.
- GARCIA, A. **Solidificação**. Fundamentos e aplicações. 2. ed. Campinas: UNICAMP, 2007.
- GARCIA, A., SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio de materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos S. A., 2012.
- GRUPO AÇO CEARENSE. **Conheça os principais tipos de aço e suas aplicações**. Disponível em: <<http://www.grupoacocearense.com.br/blog/vender-mais/principais-tipos-de-aco/#:~:text=A%C3%A7os%20para%20constru%C3%A7%C3%A3o%20mec%C3%A2nica,uma%20ampla%20gama%20de%20produtos>>. Acesso em: 18 maio 2020.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15630-1: Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part 1: Reinforcing bars, rods and wire**. Switzerland, 2019.
- JOHN, A. L. **Melhorias no desempenho dos injetores supersônicos em operação em um forno elétrico a arco**. Dissertação de Mestrado, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2009.
- MAGNABOSCO, R.; SANTOS, D. C. **Influência do Estado de Deformações na Formação de Maternita Induzida por Deformação em Aço Inoxidável Austenítico**. In: Congresso Anual da ABM, 63º, 2008, São Paulo. Artigo. Santos, 2017.
- MANNHEIMER, W. A. **Microscopia dos Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro. Editora e-papers, 2002.
- MEI, P. R.; SILVA, A. L. V. C. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

MENDES, J. J. **Influência da adição da lama de aciaria a oxigênio nas características físicas e microestruturais de pelotas queimadas de minério de ferro.** Dissertação (Mestrado) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto: UFOP, 2009.

NASCIMENTO, Z. D. **Efeito do cálcio no desgaste das placas refratárias de válvula gaveta de distribuidor no processo de lingotamento contínuo.** Dissertação (Mestrado) – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto: UFOP, 2007.

OLIVEIRA, D. G. R.; SOBRAL, M. D. C. **Tecnologia dos Materiais.** Curso Técnico de Mecânica. Salvador, 2009.

PACHECO, R. F. R. **Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer.** Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2017.

ROHDE, R. A. **Metalografia: Preparação de Amostras – Uma abordagem prática.** Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais, URI Santo Ângelo. 2010.

ROSSI, D. **Influência da Proporção entre as Vazões de Oxigênio e Gás Natural do Sistema de Injeção na Eficiência Energética de um Forno Elétrico a Arco.** Dissertação (Mestrado) – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2014.

SOUZA, S. A. **Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos.** 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982.

TELECURSO 2000. **Ensaios de Materiais.** São Paulo: Globo, 1995.

TSCHIPTSCHIN, A. P. **Aço: Sua aplicação e relação com o carbono.** Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/aco-e-sua-aplicacao-e-relacao-com-o-carbono>>. Acesso em: 12 maio 2020.

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Lingotamento Contínuo.** Disponível em: <<https://docplayer.com.br/14430756-Lingotamento-contínuo.html>>. Acesso em: 15 maio 2020.

VIEIRA, D. H. **Avaliação de Parâmetros Operacionais que Influenciam a Taxa de Injeção de Carvão Pulverizado em Altos-Fornos a Carvão Vegetal.** Dissertação (Mestrado) – CPGEM, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

ZOLIN, Ivan. **Ensaios Mecânicos e Análises de Falhas.** 3. ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.