



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

**DÁRIO FREIRE ARRAIS**

**INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE LAMINAÇÃO E TREFILAÇÃO NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA MICROESTRUTURA DE UM AÇO SAE 1013  
NA PRODUÇÃO DE VERGALHÃO CA 60**

**FORTALEZA**

**2019**

DÁRIO FREIRE ARRAIS

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE LAMINAÇÃO E TREFILAÇÃO NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA MICROESTRUTURA DE UM AÇO SAE 1013 NA  
PRODUÇÃO DE VERGALHÃO CA 60

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

Orientador: Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A797i Arrais, Dário Freire.

Influência da velocidade de laminação e trefilação nas propriedades mecânicas e na microestrutura de um aço SAE 1013 na produção de vergalhão CA 60 / Dário Freire Arrais. – 2019.

62 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2019.

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

1. Conformação à frio. 2. Velocidade de conformação. 3. Propriedades mecânicas. I. Título.

CDD 669

---

DÁRIO FREIRE ARRAIS

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE LAMINAÇÃO E TREFILAÇÃO NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA MICROESTRUTURA DE UM AÇO SAE 1013 NA  
PRODUÇÃO DE VERGALHÃO CA 60

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

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Mauro Andres Cerra Florez  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

Aos meus pais.

Ao meu saudoso avô, Oscar Alves e Silva.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e por toda a saúde e sabedoria que ele me proporcionou e me proporciona.

Aos meus pais, Francisco Daniel e Carmem Lúcia, por sempre me incentivarem a estudar, se esforçarem ao máximo para poder dar um estudo de qualidade aos seus filhos e por acreditarem no meu potencial quando ninguém mais acreditava, amo vocês.

Ao meu irmão, Oscar, que desde a infância foi o meu exemplo, que sempre admirei muito por suas diversas qualidades e pela pessoa amada que é.

À minha namorada e também futura Engenheira, Gil, por todo o companheirismo e paciência durante a realização do presente trabalho. Sem você, a realização do mesmo teria, com certeza, um caminho muito mais tortuoso, muito obrigado.

Aos meus avós, Margarida e Oscar, não tenho palavras para agradecer a importância que vocês tiveram na minha formação como ser humano, muito obrigado.

Aos meus tios e tias Carmencita, José Orlando, Márcia, Marlúcia, Samuel e Laura que sempre me apoiaram e comemoram minhas vitórias.

À minha vó, Telma, à minha tia Zildene, à minha madrinha Girlene e meu padrinho Eriberto, por todo o apoio que me foi dado.

Ao Prof. Dr. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu pela excelente orientação e compreensão, devido as minhas dificuldades em conciliar a realização do presente trabalho com a responsabilidade de trabalhar.

Aos componentes da banca examinadora Mauro Andres Cerra Florez e Jorge Luiz Cardoso pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao LACAM por disponibilizar seu espaço e seus equipamentos para a realização do trabalho.

Ao LPTS (antigo ENGESOLDA), pelo aprendizado profissional que me proporcionou ao ser o primeiro lugar que trabalhei.

À Metal Soluções Júnior e ao Centro Acadêmico e os amigos que fiz nessas instituições que foram de extrema importância para o meu desenvolvimento profissional.

Ao Grupo Aço Cearense, em especial aos amigos Aluísio, Hiury, Marcos Arruda, Welch, Pedro Guilherme, José Levi e Carlos André, que tornaram possível a realização do presente trabalho.

Ao Mauro Verona e Rodrigo Salum, pela amizade, compreensão e grande exemplo de profissionalismo e liderança que me proporcionam diariamente na RHI Magnesita.

Aos amigos da UFC que compartilharam todos os momentos de felicidade e luta durante a graduação, em especial, Dyego Almeida e Carlos Viana que contribuíram diretamente para que fosse possível a realização do presente trabalho, os meus mais sinceros agradecimentos.

Aos primos e amigos que levarei da infância para vida Matheus, Djaci, Michael, Ítalo, Pacelli e Camargo.

“O conhecimento serve para encantar pessoas,  
não para humilhá-las”

Mário Sérgio Cortella

## RESUMO

Os vergalhões CA 60 produzidos por processos de conformação mecânica a frio a partir do fio máquina, são os principais produtos empregados no setor da construção civil. E atualmente as indústrias estão buscando uma produtividade cada vez maior a um menor custo e, para isso, se fazem necessários estudos na área, a fim de obter um produto com uma qualidade cada vez melhor e que atenda às normas e exigências do mercado, que no caso do vergalhão CA 60 são a Portaria 73, de 17 de março de 2010 do INMETRO e a norma ABNT NBR 7480:2007. Por esse motivo, este trabalho tinha como objetivo avaliar e entender a influência da velocidade de conformação nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço SAE 1013 utilizado na produção de vergalhão CA 60. A base desse estudo será o ensaio de tração, realizado em corpos de prova de seção circular, submetidos a 2 processos de conformação, laminação e trefilação, a frio, produzidos com três velocidades diferentes de conformação cada um. Neste estudo, serão levantadas as curvas força-deslocamento, e obtidos valores de Limite de Resistência, Limite de Escoamento e Alongamento. Foram realizados 35 ensaios, onde observou-se os valores dessas propriedades, que chegaram a variar de 470 a 784 Mpa, para Resistência, e de 332 a 744 Mpa, para Escoamento, aproximadamente. Com estes dados, foram calculados o Expoente de Encruamento ( $n$ ) e o Coeficiente de Resistência ( $K$ ).

**Palavras-chave:** Conformação à frio. Velocidade de conformação. Propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

The rebar produced by processes of mechanical cold forming from the machine wire, are the main products used in the civil construction sector. And industries are currently looking for increasing productivity at a lower cost and for that, studies are needed in the area in order to obtain a product with an increasingly better quality that meets the norms and requirements of the market, which in the case of CA 60 rebar are ordinance 73, of March 17, 2010 of INMETRO and the norm ABNT NBR 7480: 2007. For this reason, this work aims to evaluate and understand the influence of the conformation velocity on the mechanical and microstructural properties of the CA 60. The base of this study was the traction test, carried out on test specimens of circular section, submitted to 2 processes of cold forming, lamination and drawing, produced with three different speeds of conformation each. In this study, the force-displacement curves will be raised, and values of Resistance Limit, Flow Limit and Stretch will be obtained. Thirty-five tests were carried out, where the values of these properties varied from 470 to 784 Mpa for Resistance and from 332 to 744 Mpa for yield strength approximately. With this data, the Coexistence of Coverage ( $n$ ) and Coefficient of Resistance ( $K$ ) were calculated.

**Keywords:** Cold forming. Conformation speed. Mechanical properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação aço SAE 1013.....	17
Figura 2 – Rolos de fio máquina.....	18
Figura 3 – Variação das propriedades mecânicas dos metais com a conformação a frio...	20
Figura 4 – Desenho esquemático do processo de laminação com três rolos dispostos a 120° um do outro.....	21
Figura 5 – Desenho esquemático do processo de trefilação.....	23
Figura 6 – Desenho esquemático dos sucessivos passes de trefilação.....	23
Figura 7 – Ilustração do vergalhão CA 60.....	24
Figura 8 – Processo produtivo (a) Desenrolador. (b) Laminador .....	24
Figura 9 – Curva Tensão-Deformação.....	26
Figura 10 – Limite de escoamento.....	27
Figura 11 – Limite de resistência à tração.....	27
Figura 12 – Fluxograma da metodologia do estudo.....	30
Figura 13 – Representação esquemática de uma máquina de ensaio de tração.....	31
Figura 14 – Fluxograma da preparação metalográfica.....	32
Figura 15 – Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados.....	33
Figura 16 – Força (N) X Deslocamento (mm) para o fio máquina.....	35
Figura 17 – Força (N) X Deslocamento (mm) para velocidade de 3,0 m/s.....	37
Figura 18 – Força (N) X Deslocamento (mm) para velocidade de 6,0 m/s.....	37
Figura 19 – Força (N) X Deslocamento (mm) para velocidade de 9,0 m/s.....	38
Figura 20 – Força (N) X Deslocamento (mm) para velocidade 1.....	42
Figura 21 – Força (N) X Deslocamento (mm) para velocidade 2.....	42
Figura 22 – Força (N) X Deslocamento (mm) para velocidade 3.....	43

Figura 23 – a) Microestrutura da seção transversal do fio máquina. b) Microestrutura da seção longitudinal do fio máquina. Ambas com aumento de 500x.....	49
Figura 24 – a) Microestrutura da seção transversal do CA 60 laminado com velocidade de 3,0m/s. b) Microestrutura da seção longitudinal do CA 60 laminado com velocidade de 3,0m/s. Ambas com aumento de 500x.....	50
Figura 25 – a) Microestrutura da seção transversal do CA 60 laminado com velocidade de 6,0m/s. b) Microestrutura da seção longitudinal do CA 60 laminado com velocidade de 6,0m/s. Ambas com aumento de 500x.....	51
Figura 26 – a) Microestrutura da seção transversal do CA 60 laminado com velocidade de 9,0m/s. b) Microestrutura da seção longitudinal do CA 60 laminado com velocidade de 9,0m/s. Ambas com aumento de 500x.....	52
Figura 27 – a) Microestrutura da seção transversal do CA 60 trefilado na velocidade 1. b) Microestrutura da seção longitudinal do CA 60 trefilado na velocidade 1. Ambas com aumento de 500x.....	53
Figura 28 – a) Microestrutura da seção transversal do CA 60 trefilado na velocidade 2. b) Microestrutura da seção longitudinal do CA 60 trefilado na velocidade 2. Ambas com aumento de 500x.....	54
Figura 29 – a) Microestrutura da seção transversal do CA 60 trefilado na velocidade 3. b) Microestrutura da seção longitudinal do CA 60 trefilado na velocidade 3. Ambas com aumento de 500x.....	55

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tolerâncias dos limites de resistência das amostras laminadas com velocidade de 3,0, 6,0 e 9,0 m/s.....	40
Gráfico 2 – Limite de Resistência X Limite de Escoamento para as diferentes velocidades de laminação.....	41
Gráfico 3 – Tolerâncias dos limites de resistência das amostras trefiladas com velocidade de 1, 2 e 3.....	45
Gráfico 4 – Limite de Resistência X Limite de Escoamento para as diferentes velocidades de trefilação.....	46
Gráfico 5 – Limite de Resistência X Limite de Escoamento para as diferentes velocidades de laminação trefilação.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química e propriedades mecânicas típicas do aço SAE 1013...	18
Tabela 2 – Composição química nominal do aço SAE 1013.....	30
Tabela 3 – Resultados dos ensaios de tração obtidos do fio máquina.....	36
Tabela 4 – Resultados médios do fio máquina.....	36
Tabela 5 – Relação média de LR/LE para o fio máquina.....	36
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de tração obtidos das amostras laminadas com velocidade de 3,0 m/s.....	38
Tabela 7 – Resultados dos ensaios de tração obtidos das amostras laminadas com velocidade de 6,0 m/s.....	39
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de tração obtidos das amostras laminadas com velocidade de 9,0 m/s.....	39
Tabela 9 – Resultados médios dos ensaios de tração obtidos das amostras laminadas com velocidade de 3,0, 6,0 e 9,0 m/s.....	39
Tabela 10 – Relação LR/LE para as 3 velocidades de laminação.....	40
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de tração obtidos das amostras trefiladas com a velocidade 1.....	43
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de tração obtidos das amostras trefiladas com a velocidade 2.....	44
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de tração obtidos das amostras trefiladas com a velocidade 3.....	44
Tabela 14 – Resultados médios dos ensaios de tração obtidos das amostras trefiladas com velocidade 1, 2 e 3.....	44
Tabela 15 – Relação LR/LE para as 3 velocidades de trefilação.....	45
Tabela 16 – Resultados médios de LR, LE e deformação dos materiais estudados.....	47

Tabela 17 – Expoente de encruamento e coeficiente de resistência de todas as amostras ensaiadas.....	48
Tabela 18 – Expoente de encruamento e coeficiente de resistência médio de cada configuração.....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AL	Alongamento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ARBL	Alta Resistência Baixa Liga
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA 60	Concreto Armado de tensão de escoamento de 60 Kgf/mm <sup>2</sup>
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
CP	Corpo de Prova
ISO	International Organization for Standardization
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LACAM	Laboratório de Caracterização de Materiais
LE	Limite de Escoamento
LR	Limite de Resistência
Mpa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
SAE	Society of Automotive Engineers
SI	Sistema Internacional
TF	Tensão de Fratura

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Estrutura CCC da liga Ferro carbono (ferrita)
$\gamma$	Estrutura CFC da liga Ferro carbono (austenita)
%p	Porcentagem em Peso
$W_p$	Fração de Perlita
$W_\alpha$	Fração de $\alpha$ (ferrita)
s	Tensão de Engenharia
F	Carga Instantânea em um Ensaio de Tração
$A_0$	Área Inicial da Seção Reta do CP
e	Deformação de Engenharia
$\Delta l$	Alongamento do Comprimento Útil do CP, = $l_i - l_0$
$l_0$	Comprimento Útil Original do CP
$l_i$	Comprimento Instantâneo do CP
$F_{m\acute{a}x}$	Carga Máxima em um Ensaio de Tração
$l_f$	Comprimento do CP no Momento da Fratura
$\sigma$	Tensão Verdadeira
$\epsilon$	Deformação Verdadeira
n	Expoente de Encruamento
K	Coefficiente de Resistência
C	Constante de Resistência
m	Sensibilidade à Taxa de Deformação da Tensão de Escoamento
v	Velocidade do Travessão Móvel de uma Máquina de Tração
$\dot{\epsilon}$	Taxa de Deformação Expressa em Termos da Deformação Linear Convencional
$\epsilon'$	Taxa de Deformação Verdadeira

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	15
<b>2.1</b>	<b>Geral</b> .....	15
<b>2.2</b>	<b>Específicos</b> .....	15
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
<b>3.1</b>	<b>Aços Estruturais</b> .....	16
<b>3.1.1</b>	<i>Generalidades</i> .....	16
<b>3.1.2</b>	<i>Aços baixo carbono</i> .....	16
<b>3.2</b>	<b>Aço SAE 1013</b> .....	16
<b>3.2.1</b>	<i>Classificação</i> .....	16
<b>3.2.1</b>	<i>Composição química e propriedades mecânicas</i> .....	18
<b>3.3</b>	<b>Fio Máquina</b> .....	18
<b>3.3.1</b>	<i>Características</i> .....	18
<b>3.4</b>	<b>Conformação mecânica</b> .....	19
<b>3.4.1</b>	<i>Classificação</i> .....	19
<b>3.4.2</b>	<i>Trabalho a frio</i> .....	21
<b>3.4.3</b>	<i>Encruamento</i> .....	21
<b>3.4.4</b>	<i>Laminação</i> .....	21
<b>3.4.4.1</b>	<i>Laminação à frio</i> .....	22
<b>3.4.5</b>	<i>Trefilação</i> .....	22
<b>3.4.5.1</b>	<i>Trefilação à frio</i> .....	23
<b>3.5</b>	<b>CA 60</b> .....	23
<b>3.5.1</b>	<i>Características</i> .....	23
<b>3.5.2</b>	<i>Processo Produtivo do CA 60</i> .....	24
<b>3.6</b>	<b>Propriedades mecânicas</b> .....	25
<b>3.6.1</b>	<i>Ensaio de tração</i> .....	25
<b>3.6.2</b>	<i>Comportamento Tensão – Deformação</i> .....	25
<b>3.6.3</b>	<i>Limite de escoamento</i> .....	26
<b>3.6.3</b>	<i>Limite de resistência à tração</i> .....	27
<b>3.6.4</b>	<i>Tensão verdadeira e deformação verdadeira</i> .....	27
<b>3.6.4.1</b>	<i>Coefficiente de resistência e expoente de encruamento</i> .....	28

<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>30</b>
<b>4.2</b>	<b>Amostras</b> .....	<b>30</b>
<b>4.3</b>	<b>Ensaio de tração</b> .....	<b>31</b>
<b>4.4</b>	<b>Preparação metalográfica</b> .....	<b>32</b>
<b>4.4.1</b>	<i>Corte</i> .....	<b>32</b>
<b>4.4.2</b>	<i>Embutimento</i> .....	<b>32</b>
<b>4.4.3</b>	<i>Lixamento</i> .....	<b>33</b>
<b>4.4.4</b>	<i>Polimento</i> .....	<b>33</b>
<b>4.4.5</b>	<i>Ataque químico</i> .....	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>35</b>
<b>5.1</b>	<b>Ensaio de tração</b> .....	<b>35</b>
<b>5.1.1</b>	<i>Fio máquina</i> .....	<b>35</b>
<b>5.1.2</b>	<i>Laminação</i> .....	<b>36</b>
<b>5.1.3</b>	<i>Trefilação</i> .....	<b>41</b>
<b>5.1.4</b>	<i>Resultados médios</i> .....	<b>46</b>
<b>5.1.5</b>	<i>Coefficiente de resistência e expoente de encruamento</i> .....	<b>47</b>
<b>5.2</b>	<b>Micrografia</b> .....	<b>49</b>
<b>5.2.1</b>	<i>Fio máquina</i> .....	<b>49</b>
<b>5.2.2</b>	<i>Laminação</i> .....	<b>50</b>
<b>5.2.3</b>	<i>Trefilação</i> .....	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das principais razões da importância atribuída aos metais na tecnologia moderna é a sua capacidade de serem deformados, atingindo as formas desejadas. No entanto, a deformação dos metais, e em particular dos aços, conduz a significativas alterações em suas propriedades. A conformação mecânica tem, portanto, dois efeitos principais, dar forma e alterar propriedades mecânicas ou características do material. (COSTA & MEI, 2010)

Os processos de conformação plástica dos metais permitem a fabricação de peças, no estado sólido, com características controladas. De uma forma resumida, os objetivos desses processos são a obtenção de produtos finais com especificação de: dimensão, forma, propriedades mecânicas e condições superficiais. (BRESCIANI, 2011)

Os processos de conformação plástica podem ser classificados de acordo com vários critérios. Quanto ao tipo de esforço predominante, a laminação e a trefilação podem ser classificados, respectivamente, como: Processo de conformação por compressão direta e indireta. E ambos os processos podem ser usados para a produção de vergalhões.

O vergalhão CA 60 é um dos principais produtos finais empregados no setor da construção civil, ele é produzido, a partir da matéria prima Fio Máquina, pelos processos de laminação e trefilação, que visam uma melhoria da resistência mecânica, controle dimensional e melhores características superficiais. Utilizam-se, normalmente, aços baixo carbono que combinam custos relativamente baixos a possibilidade de obtenção de uma resistência mecânica maior a partir do encruamento do material.

O estudo do parâmetro de velocidade nos processos de laminação e trefilação se faz necessário, por conta do grande potencial de mercado do vergalhão CA 60, visto que o setor da construção civil é um dos maiores consumidores de aço no Brasil e as indústrias procuram produções cada vez mais elevadas a um menor custo possível, mantendo todas as especificações técnicas necessárias para o controle de qualidade do produto.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Geral**

Analisar a influência da velocidade de laminação e de trefilação, nas propriedades mecânicas e na microestrutura do aço SAE 1013, utilizado para produzir vergalhão CA 60.

### **2.2 Específicos**

Analisar Limite de Resistência, Limite de Escoamento, Relação LR/LE, Alongamento, além de obter os valores de Coeficiente de Resistência e Expoente de Encruamento e avaliar a microestrutura do aço SAE 1013 como recebido.

Analisar Limite de Resistência, Limite de Escoamento, Relação LR/LE, Alongamento, além de obter os valores de Coeficiente de Resistência e Expoente de Encruamento e avaliar a microestrutura do aço SAE 1013 laminado na velocidade de 3,0 m/s.

Analisar Limite de Resistência, Limite de Escoamento, Relação LR/LE, Alongamento, além de obter os valores de Coeficiente de Resistência e Expoente de Encruamento e avaliar a microestrutura do aço SAE 1013 laminado na velocidade de 6,0 m/s.

Analisar Limite de Resistência, Limite de Escoamento, Relação LR/LE, Alongamento, além de obter os valores de Coeficiente de Resistência e Expoente de Encruamento e avaliar a microestrutura do aço SAE 1013 laminado na velocidade de 9,0 m/s.

Analisar Limite de Resistência, Limite de Escoamento, Relação LR/LE, Alongamento, além de obter os valores de Coeficiente de Resistência e Expoente de Encruamento e avaliar a microestrutura do aço SAE 1013 trefilado na velocidade de 1,5 m/s.

Analisar Limite de Resistência, Limite de Escoamento, Relação LR/LE, Alongamento, além de obter os valores de Coeficiente de Resistência e Expoente de Encruamento e avaliar a microestrutura do aço SAE 1013 trefilado na velocidade de 3,0 m/s.

Analisar Limite de Resistência, Limite de Escoamento, Relação LR/LE, Alongamento, além de obter os valores de Coeficiente de Resistência e Expoente de Encruamento e avaliar a microestrutura do aço SAE 1013 trefilado na velocidade de 4,5 m/s.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 Aço Estruturais**

#### **3.1.1 Generalidades**

O aço é o material que apresenta a melhor combinação dos requisitos fundamentais da construção civil, sendo eles: Resistência à tração, limite de escoamento, facilidade de fabricação, disponibilidade, soldabilidade e baixo custo.

Os aços estruturais constituem talvez o grupo mais importante dos materiais metálicos para construção, tendo em vista o seu emprego, em quantidades elevadas nas indústrias de construção civil e de transportes. (CHIAVERINI)

O vergalhão CA 60 é um dos principais produtos finais empregados no setor da construção civil. É produzido, a partir da matéria prima Fio Máquina, pelos processos de laminação e trefilação, que visam uma melhoria da resistência mecânica, controle dimensional e melhores características superficiais. Utilizam-se, normalmente, aços baixo carbono que possuem custos relativamente baixos e possibilidade de obtenção de uma resistência mecânica maior, a partir do encruamento do material.

#### **3.1.2 Aços baixo carbono**

São aqueles em que estão presentes o carbono e os elementos residuais manganês, silício, fósforo e enxofre. Dentre todos os tipos diferentes de aços, aqueles produzidos em maior quantidade e menores custos de produção se enquadram dentro da classificação de baixo teor de carbono. Esses aços contêm geralmente menos que 0,25% de carbono (C) e não respondem a tratamentos térmicos objetivados a formar martensita. Desta forma, um aumento da resistência mecânica é obtido através de trabalho a frio. A microestrutura consiste nos microconstituintes ferrita e perlita. (CHIAVERINI)

### **3.2 Aço SAE 1013**

#### **3.2.1 Classificação**

O sistema de classificação de aços empregado pela ABNT é basicamente o mesmo usado pela AISI e pela SAE. Nesses sistemas os aços são divididos em grupos principais e,

dentro desses grupos, em famílias de características semelhantes como pode ser observado nos Quadros 1-2.

Quadro 1 – Principais grupos de aços nas classificações dos sistemas normativos mais comuns.

- Aço Carbono
- Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL)
- Aços para construção mecânica
- Aços para ferramentas
- Aços inoxidáveis

Fonte: COSTA & MEI (2010).

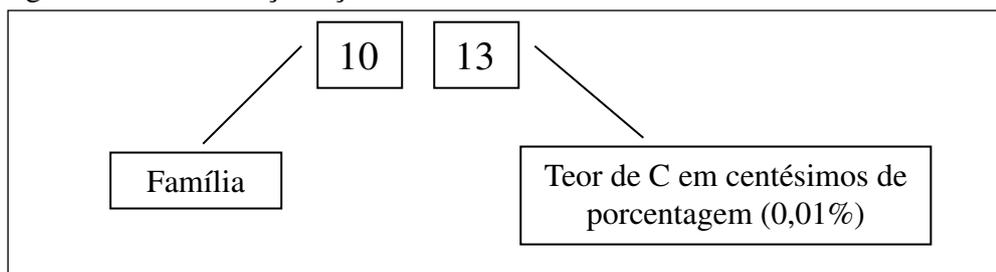
Quadro 2 – Classificação ABNT, somente para aços carbono.

- Aços Carbonos
- 10xx – Aço carbono
  - 11xx – Aço carbono resulfurado (corte fácil)
  - 12xx – Aço carbono resulfurado e refosforado (corte fácil)

Fonte: COSTA & MEI (2010).

Essas famílias são designadas por conjuntos de algarismos, em geral quatro, como pode ser observado na Figura 1:

Figura 1 – Classificação aço SAE 1013.



Fonte: Próprio autor.

Logo, o aço 1013, é um aço da família 10 (Aço carbono) e tem 13 centésimos de porcentagem de C, isto é, 0,13% C.

### 3.2.2 Composição química e Propriedades mecânicas

A composição química típica do SAE 1013, classificado com aço baixo carbono, é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química e propriedades mecânicas típicas do aço SAE 1013.

	Composição Química				Propriedades Mecânicas	
	C	Mn	P	S	Tensão Ruptura (Mpa)	Alongamento (%)
Mínimo	0,11	0,50	-	-	320	17
Máximo	0,16	0,80	0,040	0,050	520	-

Fonte: ASM HANDBOOK.

## 3.3 Fio máquina

### 3.3.1 Características

O fio máquina é um fio de aço, como pode ser observado na Figura 2, produzido a partir da laminação a quente, sendo sua matéria prima o tarugo. É utilizado no Brasil e em outros países do mundo como matéria prima para: Arames, molas, produtos agropecuários e vergalhões para construção civil que é o caso desse estudo. O fio máquina está disponível em aços alto, médio e baixo carbono e aços ligados, porém os mais comuns são os baixo carbono.

O diâmetro do fio máquina pode variar bastante, além de poder ser de seção esférica ou sextavado, em caso de fio máquina sextavado a principal utilização é fabricação de porcas e parafusos sextavados.

Figura 2 – Rolos de fio máquina.



Fonte: dhabi-steel.com.br.

### **3.4 Conformação mecânica**

#### **3.4.1 Classificação**

Uma das principais razões da importância atribuída aos metais na tecnologia moderna é a sua capacidade de serem deformados, atingindo as formas desejadas. No entanto, a deformação dos metais, e em particular dos aços, conduz a significantes alterações em suas propriedades. A conformação mecânica tem, portanto, dois efeitos principais: dar forma e alterar propriedades mecânicas ou características do material. (COSTA & MEI, 2010)

Os processos de conformação plástica dos metais permitem a fabricação de peças, no estado sólido, com características controladas. De uma forma resumida, os objetivos desses processos são a obtenção de produtos finais com especificação de: Dimensão, forma, propriedades mecânicas e condições superficiais. (BRESCIANI, 2011)

Existem centenas de processos para deformar e conformar metais, entretanto, segundo, DIETER, 1981, eles podem ser divididos em poucos grupos, de acordo com os tipos de forças aplicadas durante a conformação, sendo eles:

- Processo de compressão direta;
- Processo de compressão indireta;
- Processos de tensão;
- Processos de dobramento;
- Processos de cisalhamento.

No processos de compressão direta, como a laminação e o forjamento, a força é aplicada na superfície da peça e o alongamento se dá na direção perpendicular ao sentido da força, já nos processos de compressão indireta, como a trefilação e a extrusão, a força direta é frequentemente trativa, mas as tensões compressivas desenvolvidas atingem valores elevados.

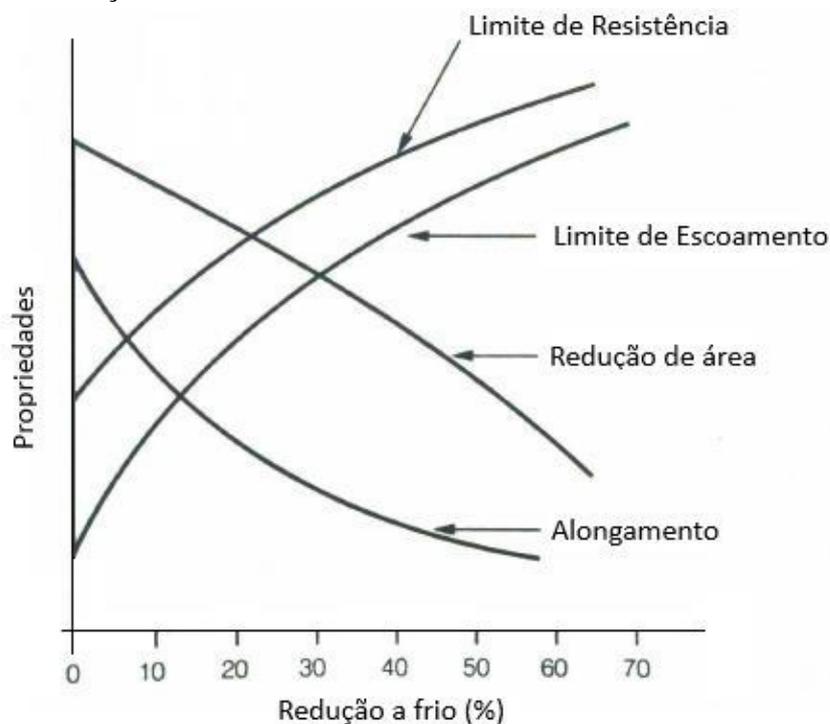
No entanto, a variável que permite uma classificação mais coerente dos processos de conformação dos metais – no que diz respeito as características do produto – é a temperatura que o processo se passa. (COSTA & MEI, 2010)

Em casos onde a deformação se passa em temperatura e taxa de deformação que permitem a recuperação e recristalização rápida, são classificados como trabalho a quente, e onde não se permitem a recuperação e recristalização rápida, são classificados como trabalho a frio, que é o caso do presente trabalho.

### 3.4.2 Trabalho a frio

No trabalho a frio, o mecanismo de aumento de resistência se dá pelo encruamento, que ocorre à proporção que o metal é conformado, aumentando a resistência e diminuindo a ductilidade. O mecanismo de encruamento envolve a densidade de discordâncias e mobilidade. Na Figura 3, podemos observar a variação das propriedades mecânicas dos metais com a conformação a frio.

Figura 3 – Variação das propriedades mecânicas dos metais com a conformação a frio.



Fonte: COSTA & MEI, 2010

Podemos observar que o limite de resistência e o limite de escoamento crescem com o aumento da redução a frio, no entanto, o alongamento diminui.

### 3.4.3 Encruamento

O encruamento é o fenômeno que ocorre com a deformação plástica, onde um metal dúctil se torna mais duro e mais resistente à medida que é deformado. Durante a deformação do material as discordâncias interagem entre si, com outras imperfeições do metal, ou indiretamente com o campo de tensões internas que funcionam como obstáculos. A

maioria dos metais encrua à temperatura ambiente. O encruamento é com frequência utilizado comercialmente, para melhorar as propriedades mecânicas dos metais durante os procedimentos de fabricação. Os efeitos podem ser removidos mediante um tratamento térmico por recozimento.

A porcentagem de trabalho a frio é definida como:

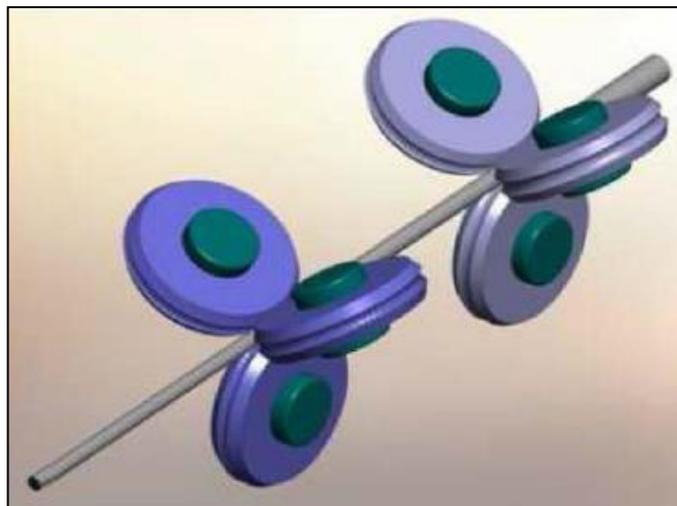
$$\%TF = \left( \frac{A_o - A_d}{A_o} \right) \times 100 \quad (1)$$

### 3.4.4 Laminação

A laminação é um processo de conformação que essencialmente consiste na passagem de um corpo sólido (peça) entre dois cilindros ou três (ferramentas) que giram à mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários (Figura 4). Dessa forma, tendo o corpo da peça inicial uma espessura maior do que a distância entre as superfícies laterais dos cilindros, ele sofre uma deformação plástica na passagem entre os cilindros que resulta na redução de sua seção transversal e no aumento do seu comprimento e largura.

Para se obter uma determinada dimensão (espessura) de uma peça, deve-se submeter a mesma a sucessivos passes através dos cilindros, com as distâncias entre si decrescentes. (BRESCIANI, 2011)

Figura 4 – Desenho esquemático do processo de laminação com três rolos dispostos a 120° um do outro.



Fonte: ROCHA, 2012

#### *3.4.4.1 Laminação à frio*

A peça inicial para o processamento é um produto semiacabado previamente laminado a quente, neste caso o fio máquina. Como a temperatura de trabalho situa-se abaixo da temperatura de recristalização, o material da peça apresenta uma maior resistência à deformação e um aumento da sua resistência com a deformação, como dito anteriormente, não permitindo, dessa forma, intensidades elevadas de redução de seção transversal.

A laminação a frio é aplicada, portanto, para as operações finais (de acabamento), quando as especificações do produto indicam a necessidade de acabamento superficial superior (obtido com cilindros mais lisos e na ausência de aquecimento, o que evita a formação de cascas de óxidos) e de estrutura do metal encruada com ou sem recozimento final. (BRESCIANI, 2011)

Segundo (COSTA & MEI, 2010) As seguintes vantagens são obtidas na laminação a frio:

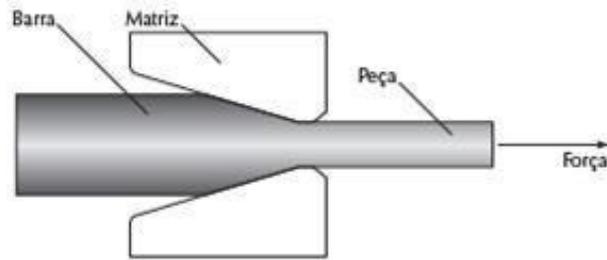
- Propriedades mecânicas aumentadas;
- Excelente precisão dimensional;
- Excelente qualidade superficial;
- Produção econômica de produtos de pequenas espessuras.

#### *3.4.5 Trefilação*

A trefilação é um processo de conformação plástica que se realiza pela operação de conduzir um fio (ou barra ou tubo) através de uma ferramenta (fieira), que contém um furo em seu centro, por onde passa o fio. Esse furo tem o diâmetro decrescente, e apresenta um perfil na forma de funil curvo ou cônico. (BRESCIANI, 2011)

A Figura 5, mostra um desenho esquemático do processo de trefilação do fio máquina.

Figura 5 – Desenho esquemático do processo de trefilação.

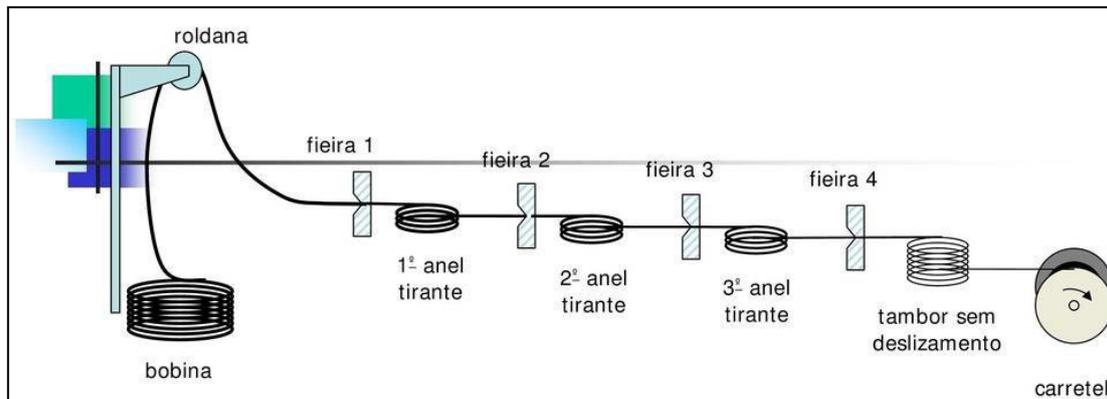


Fonte: Kiminami/ Castro / Oliveira (2015)

### 3.4.5.1 Trefilação à frio

A operação é comumente realizada a frio, onde o mecanismo de aumento de resistência atuante é o encruamento e assim como na laminação a frio para se obter uma determinada dimensão (espessura) do corpo, deve-se submeter a peça a sucessivos passes através de fieiras de furos cada vez menores, como podemos observar na Figura 6.

Figura 6 – Desenho esquemático dos sucessivos passes de trefilação.



Fonte: [https://docplayer.com.br/docs-images/42/7879862/images/page\\_12.jpg](https://docplayer.com.br/docs-images/42/7879862/images/page_12.jpg)

## 3.5 CA 60

### 3.5.1 Características

Os vergalhões para concreto armado, ilustrados na Figura 7, são especificados segundo a norma NBR 7480, sendo designados CA xx, onde os dois algarismos indicados por xx representam o limite de escoamento mínimo em kgf/mm<sup>2</sup>, nesse caso 60 kgf/mm<sup>2</sup>.

Figura 7 – Ilustração do vergalhão CA 60.

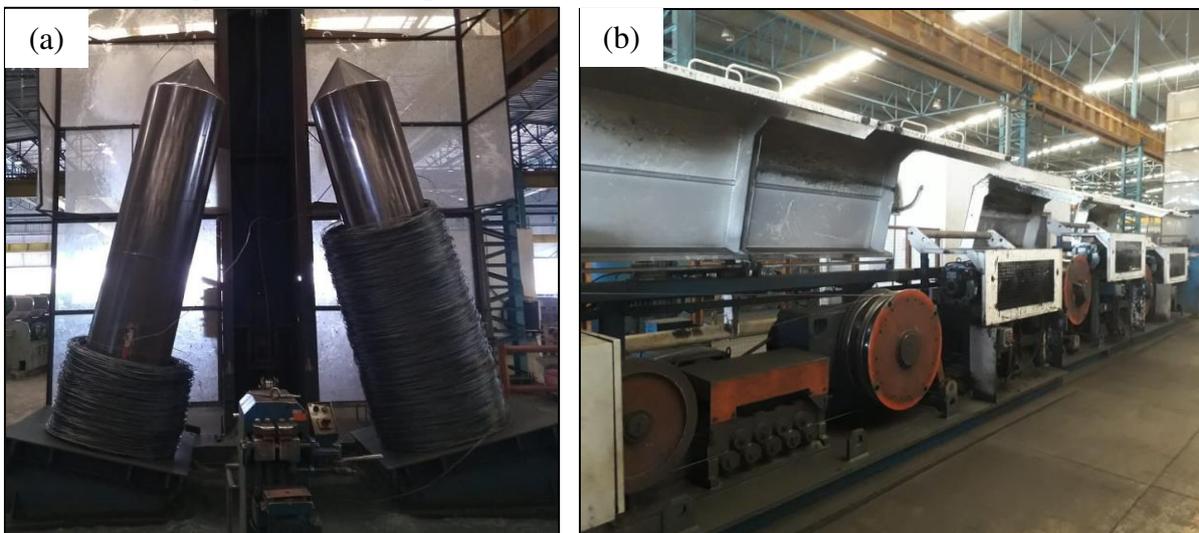


Fonte: <http://www.grupoacocearense.com.br>

### 3.5.2 Processo produtivo do CA 60

Para a fabricação do CA 60 o processo utilizado pode ser o de trefilação ou de laminação à frio. A matéria prima utilizada é o fio-máquina em rolo obtido por laminação a quente. O rolo de fio-máquina é colocado em um desenrolador, Figura 8 (a), e puxado por uma de suas pontas onde sofrerá redução de diâmetro através da passagem por fieira, para o caso de trefilação, ou através de roletes, para o caso de laminação a frio, Figura 8 (b). A redução que se deseja poderá ser feita através da passagem por um, dois, três ou mais passes de fieiras ou roletes, finalizando com o passe do recartilhador onde obtém-se as marcações superficiais, conforme exigido por norma.

Figura 8 – Processo produtivo (a) Desenrolador. (b) Laminador.



Fonte: Grupo Aço Cearense

## 3.6 Propriedades mecânicas

### 3.6.1 Ensaio de tração

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

### 3.6.2 Comportamento Tensão - Deformação

A curva tensão-deformação é feita através de medições simultâneas de força por deslocamento sofrido pela amostra durante a realização do ensaio de tração.

A tensão é calculada dividindo a força  $F$  pela área inicial da parte útil do corpo de prova,  $S_0$ .

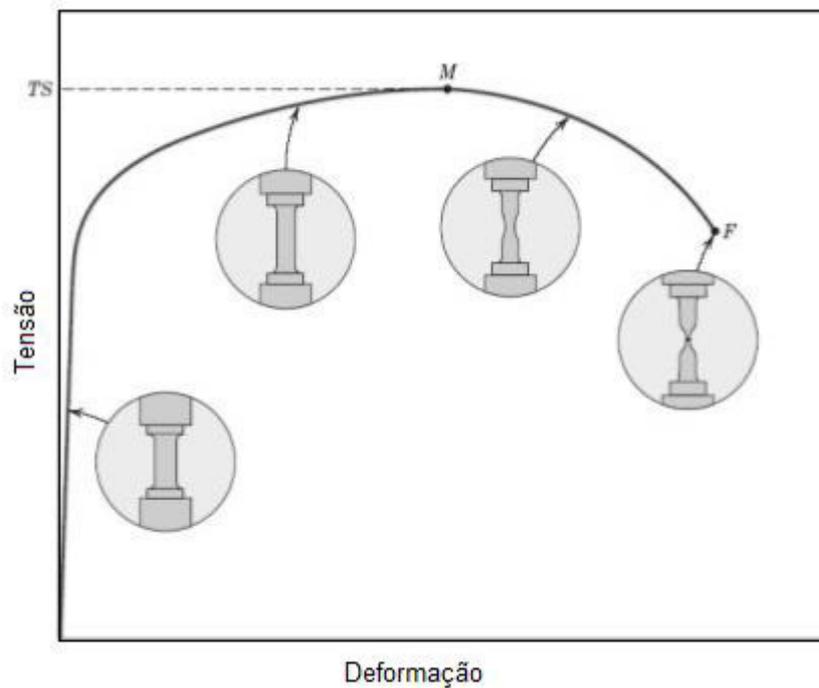
$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (2)$$

Deformação ou alongamento é a variação de comprimento entre dois pontos do corpo de prova. A deformação  $\epsilon$ , normalmente expressa em porcentagem, é determinada dividindo a variação de comprimento inicial e final medido entre dois pontos, pelo próprio comprimento inicial  $L_0$ .

$$\epsilon = \frac{\Delta \ell}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (3)$$

Dividindo o valor  $F$  por  $S_0$ , e o valor do alongamento  $\Delta t$  por  $L_0$ , que é o comprimento inicial da parte útil, tem-se a curva tensão/deformação, como pode se observar na Figura 9.

Figura 9 – Curva Tensão-Deformação.

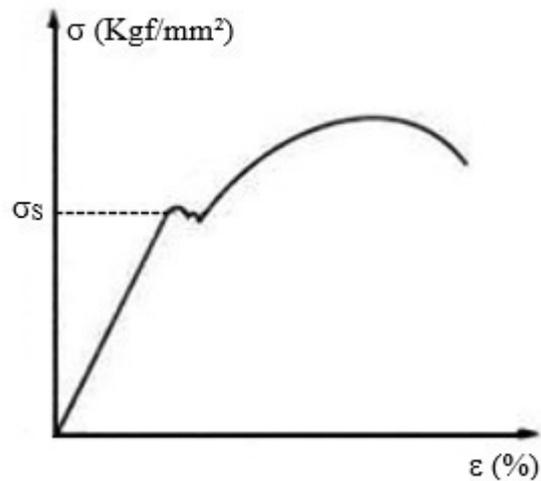


Fonte: CALLISTER, 2002

### 3.6.3 Limite de escoamento

A maioria das estruturas é projetada para assegurar que ocorrerá apenas deformação elástica quando uma tensão for aplicada. Quando um componente se deforma plasticamente ou sofre uma mudança permanente, esse componente pode não ser capaz de funcionar como o programado. Por isso a extrema importância em conhecer o nível de tensão onde a deformação plástica se inicia, Figura 10, que é onde ocorre e o fenômeno do escoamento.

Figura 10 – Limite de escoamento.

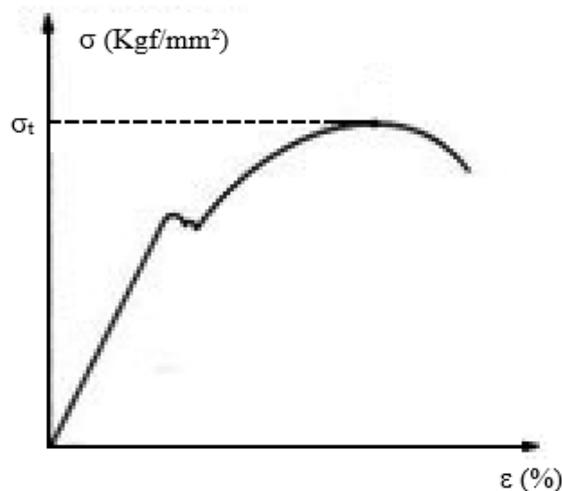


Fonte: DALCIN, 2007

### 3.6.4 Limite de resistência à tração

Após o escoamento, a tensão necessária para continuar a deformação plástica nos metais aumenta até um valor máximo, Figura 11, e então diminui até a eventual fratura do material. O limite de resistência à tração é a tensão do ponto máximo da curva tensão-deformação de engenharia. Este ponto corresponde a tensão máxima que pode ser suportada por uma estrutura sob tração. Logo, se essa tensão for aplicada e mantida, ocorrerá a fratura.

Figura 11 – Limite de resistência à tração.



Fonte: DALCIN, 2007

### 3.6.5 Tensão verdadeira e deformação verdadeira

A curva tensão-deformação de engenharia não dá uma indicação verdadeira das características de deformação de um metal porque ela é inteiramente baseada nas dimensões originais do CP, e essas dimensões mudam continuamente durante o ensaio. Também um metal dúctil que é tracionado se torna instável e forma um pescoço no decorrer do teste. Como a área da seção reta transversal do CP está diminuindo rapidamente nesse estágio do ensaio, a carga necessária para continuar a deformação também diminui. Do mesmo modo, a tensão média baseada na área original decresce, e isso produz a queda na curva tensão-deformação após o ponto de carga máxima. Na realidade, o metal continua a encruar até a fratura, de maneira que a tensão necessária para produzir deformações adicionais deveria crescer mesmo depois da formação do pescoço. Se a Tensão Verdadeira, baseada na área real da seção reta transversal da amostra, é utilizada, verifica-se que a curva tensão-deformação aumenta continuamente até a fratura. Se o cálculo da deformação é baseado em medidas instantâneas, a curva que é obtida é conhecida como Curva Tensão Verdadeira - Deformação Verdadeira. Ela também é conhecida como Curva de Escoamento, uma vez que representa as características básicas do escoamento plástico do material. Qualquer ponto da curva de escoamento pode ser considerado como tensão de escoamento para um metal deformado em tração pela quantidade mostrada na curva. Assim, se a carga fosse removida nesse ponto e então reaplicada, o material iria se comportar elasticamente até atingir a tensão de escoamento. (DIETER, 1961)

A tensão verdadeira,  $\sigma$ , é expressa em termos de tensão de engenharia,  $s$ , por:

$$\sigma = s (e + 1) \quad (4)$$

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

A deformação verdadeira,  $\varepsilon$  pode ser calculada a partir da deformação de engenharia ou convencional,  $e$ , por:

$$\varepsilon = \ln (e + 1) \quad (5)$$

### 3.6.5.1 Coeficiente de resistência e Expoente de encruamento

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

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

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

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Material

A Tabela 2, apresenta a composição química nominal do material estudado:

Tabela 2 – Composição química nominal do aço SAE 1013.

<i>Composição Química (% de massa)</i>				
	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
Nominal	0,150	0,530	0,015	0,018

Fonte: Certificado de qualidade emitido pela Gerdau.

Para evitar o efeito de composição química nas propriedades mecânicas, a bobina de fio máquina utilizada foi do mesmo lote e do mesmo fornecedor.

### 4.2 Amostras

Para a realização dos testes comparativos de velocidade de conformação do aço SAE 1013 foi utilizado o fio-máquina com diâmetro de 5,50 mm no qual parte desse fio-máquina foi destinado para o processo de laminação, sendo laminado para o diâmetro de 4,20 mm em 3 velocidades diferentes (3,0 m/s, 6,0 m/s e 9,0 m/s), e a outra parte destinado ao processo de trefilação, sendo trefilado também para o diâmetro de 4,20 mm em 3 velocidades diferentes (1,5 m/s, 3,0 m/s e 4,5 m/s) nomeadas de 1, 2 e 3, respectivamente. Pode-se observar o fluxo do processamento do fio máquina na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma da metodologia do estudo.



Fonte: Próprio autor.

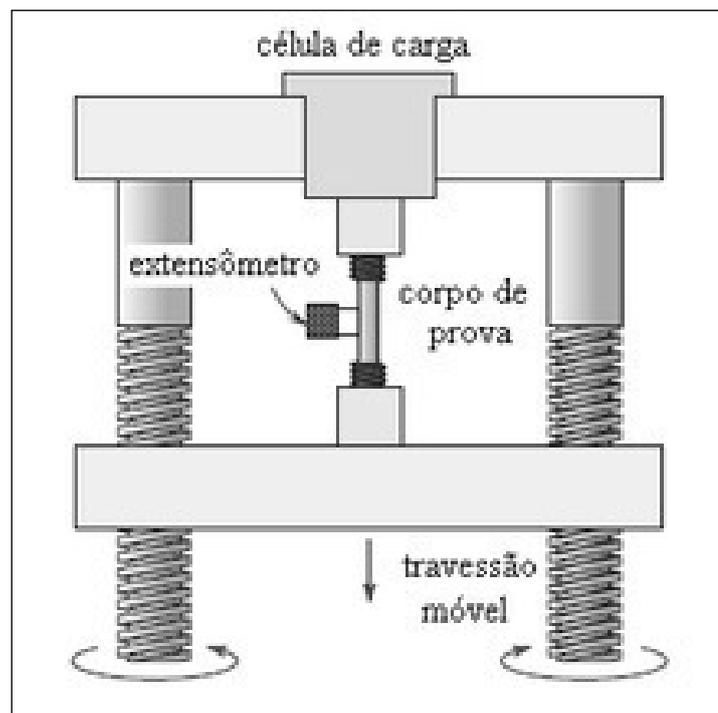
Em seguida, para cada velocidade de cada processo, foram retiradas 6 amostras, totalizando 42 amostras retiradas, contando com o fio máquina. E das 6 amostras retiradas de cada configuração 5 passaram por ensaios de tração a frio e 1 foi destinada a análise metalográfica tradicional.

### 4.3 Ensaio de tração

Foram utilizadas cinco amostras de cada velocidade e de cada processo (de comprimento médio de 200 mm) para os ensaios de tração, realizados segundo a norma NBR ISO 6892-1, sendo o comprimento útil do corpo de prova igual a 100 mm. Foram descartadas, em cada velocidade, os resultados das amostras de maiores e menores resistências e feito uma média entre as três amostras com resistências medianas, a Figura 13 é um desenho esquemático de uma máquina de tração e seus componentes.

As amostras testadas foram submetidas a uma carga de 120 Kgf com velocidade de ensaio de 15mm/min. Foram testadas, 5 amostras de fio máquina e 15 amostras de cada processo em três velocidades diferentes, totalizando 35 amostras ensaiadas.

Figura 13 – Representação esquemática de uma máquina de ensaio de tração.

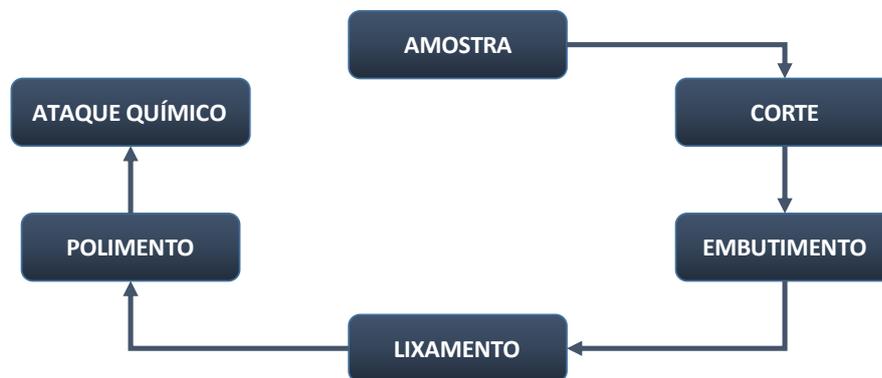


Fonte: CALLISTER, 2002

#### 4.4 Preparação metalográfica

Um corpo de prova de cada velocidade e processo foi destinado à análise metalográfica na qual o mesmo foi dividido em duas análises: análise longitudinal e análise transversal. A preparação das amostras seguiu o esquema representado na Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma da preparação metalográfica.



Fonte: Próprio autor.

##### 4.4.1 Corte

Operações mecânicas como torneamento, aplainamentos e outras, impõem severas alterações microestruturais devido ao trabalho mecânico a frio. O corte abrasivo oferece a melhor solução para este seccionamento, pois elimina por completo o trabalho mecânico a frio, resultando em superfícies planas com baixa rugosidade, de modo rápido e seguro.

O corte das amostras saindo das máquinas de laminação e trefilação foi feito com um alicate de corte para vergalhão e o corte das amostras para análise metalográfica foi feito manualmente com uma serra de corte.

##### 4.3.2 Embutimento

As amostras em questão passaram pelo processo de embutimento, a qual tem o objetivo de facilitar o manuseio e preservar os acessórios de metalografia. Existem dois tipos de embutimento: a quente e a frio. O utilizado foi o embutimento a quente onde a amostra a

ser analisada é colocada em uma prensa de embutimento com uma resina, que no caso foi utilizado o baquelite.

Em cada embutimento foi colocado duas amostras ao mesmo tempo, porém em posições diferentes sendo uma na posição longitudinal e uma na posição transversal.

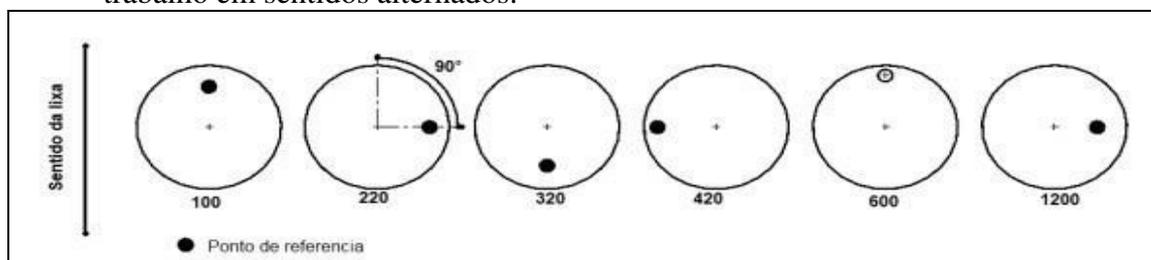
#### 4.3.3 Lixamento

O processo subsequente ao do embutimento foi o lixamento. Essa operação tem por objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície dando um acabamento a amostra, preparando-a para o polimento e ataque químico. O mesmo acontece devido ao grau de perfeição requerida no acabamento de uma amostra metalográfica idealmente prepara e é um dos processos mais demorados da preparação.

Foi utilizado o lixamento manual, que consiste em lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor. Para cada mudança de granulometria da lixa, necessita-se alterar a angulação da amostra em  $90^\circ$ , como observado na Figura 15, até desaparecerem os traços da lixa anterior.

Para cada amostra embutida haviam duas amostras de vergalhão, sendo uma na seção transversal e a outra na seção longitudinal. Para que a amostra longitudinal pudesse ser analisada internamente, fez-se necessário lixar a amostra até o ponto em que retirasse toda a parte superior do vergalhão e em seguida deu-se continuidade a sequência das lixas até que não houvesse mais traços da lixa anterior. As lixas utilizadas, foram na sequência: 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh.

Figura 15 – Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados.



Fonte: urisan.tche.br

#### 4.3.4 Polimento

O polimento se trata de uma operação pós lixamento que tem como objetivo um acabamento superficial isento de marcas. Para este fim, é utilizado abrasivos como pasta de diamante ou alumina.

Existem cinco processos de polimento: processo mecânico, processo semiautomático em sequência, processo eletrolítico, processo mecânico-eletrolítico, polimento químico. O processo utilizado foi o processo mecânico, realizado através de uma politriz trabalhando manualmente no disco de polimento. O agente polidor utilizado foi a pasta de diamante que é um ótimo abrasivo, em 6, 3 e 1 microns.

#### ***4.3.5 Ataque químico***

O objetivo dessa etapa do procedimento é, após o polimento, permitir a visualização dos contornos de grãos dos contornos de grãos e as diferentes fases da microestrutura. O ataque utilizado nas amostras foi por imersão, Nital 2%, com um tempo de 15 segundos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

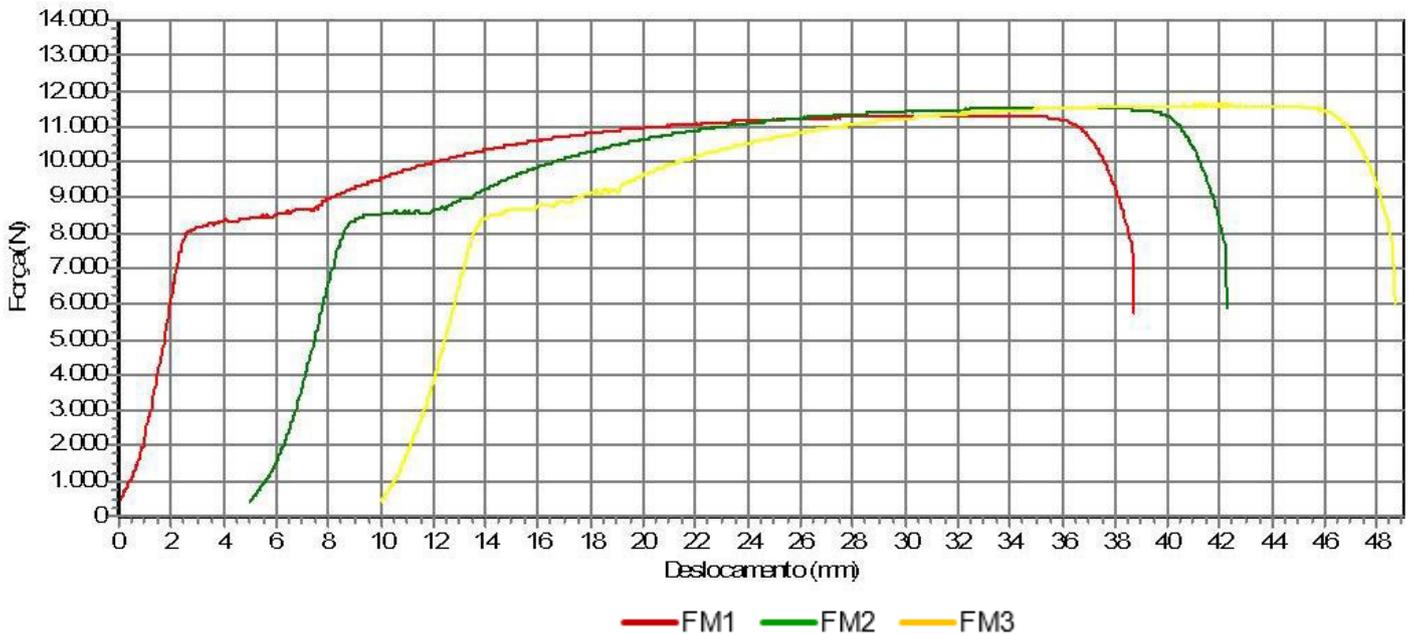
A seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de tração das amostras de fio máquina, CA 60 laminado e CA 60 trefilado a frio em variadas velocidades. Os gráficos dos ensaios de tração foram obtidos por meio do software da PANAMBRA, modelo Versat 10000. As micrografias foram obtidas através de um microscópio Axio Imager 2 do fabricante ZEISS e o software utilizado foi o Image Pro-Plus.

### 5.1 Ensaios de tração

#### 5.1.1 Fio máquina

A Figura 16 apresenta a relação Força (N) X Deslocamento (mm) para as 3 amostras do fio máquina de 5,50mm de diâmetro.

Figura 16 – Força (N) X Deslocamento (mm) para o fio máquina.



Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observado na Figura 16, nota-se que a força máxima obtida foi de aproximadamente 11,5kN, enquanto que o deslocamento foi de aproximadamente 38,5 mm.

Na Tabela 3, podem ser observados resultados dos ensaios de tração para as 3 amostras medianas do fio máquina.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de tração obtidos do fio máquina.

VELOCIDADE	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	DEFORMAÇÃO LINEAR	LIMITE DE ESCOAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE
m/s	N	MPa	mm	MPa	MPa
<b>FM1</b>	11.307	466,71	38,764	329,14	8.669
<b>FM2</b>	11.525	471,30	37,284	334,22	6.339
<b>FM3</b>	11.605	472,85	38,696	335,30	6.101
<b>Desvio Padrão</b>	126	2,61	0,682	2,69	1.158
<b>Média</b>	<b>11.479</b>	<b>470,29</b>	<b>38,248</b>	<b>332,89</b>	<b>7.036</b>

Fonte: Próprio autor.

Nota-se, portanto, que todas as amostras apresentaram valores de limite de resistência (LR) dentro das tolerâncias para um SAE 1013 e foi obtida a média de 470,29 MPa de LR, 332,89 MPa de LE e 69,54% de Alongamento. Na Tabela 4, observamos os valores médios de LR, LE e Alongamento e suas respectivas tolerâncias devido o desvio padrão e na Tabela 5, observa-se a relação média de LR/LE obtida.

Tabela 4 – Resultados médios do fio máquina.

TOLERÂNCIA	LR MPa	LE MPa	AL (%)
Mínimo	467,68	330,20	38,76%
<b>Média</b>	<b>470,29</b>	<b>332,89</b>	<b>37,28%</b>
Máximo	472,89	335,57	38,70%

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 – Relação LR/LE para o fio máquina.

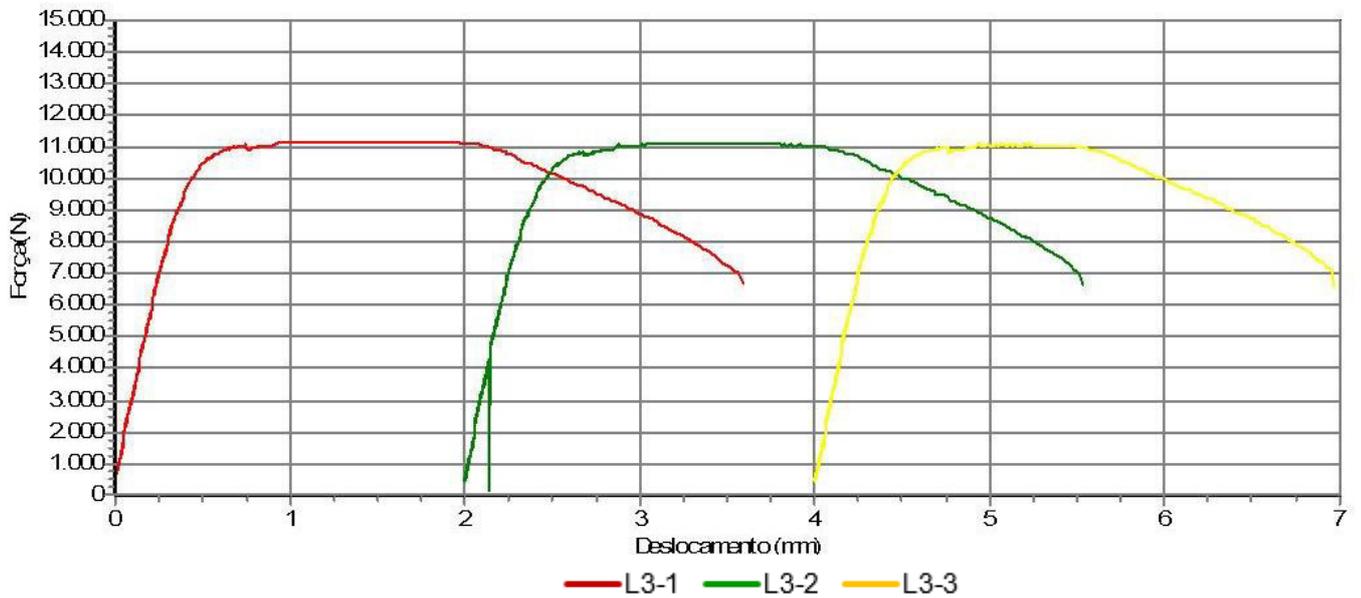
AMOSTRA	LR/LE
FM-1	1,418
FM-2	1,410
FM-3	1,410

Fonte: Próprio autor.

### 5.1.2 Laminação

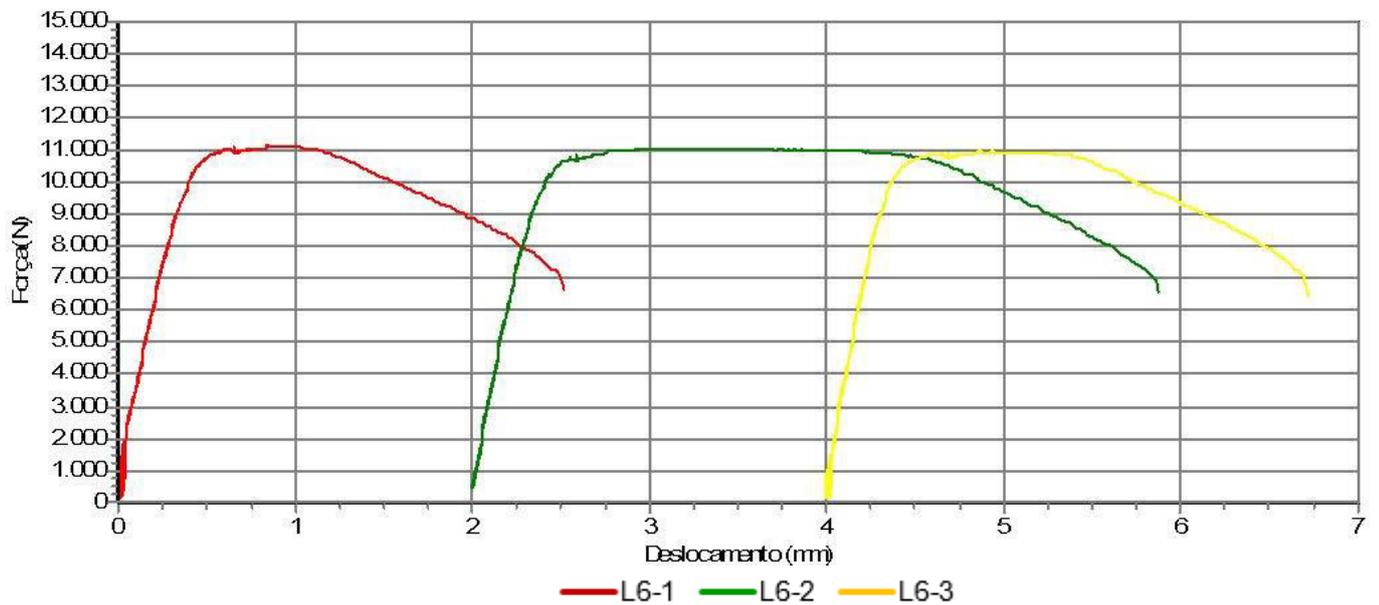
As Figuras de 17-19 apresentam a relação Força (N) X Deslocamento (mm) para as 3 amostras com resistências medianas em cada uma das velocidades de 3,0, 6,0 e 9,0 m/s, respectivamente.

Figura 17 – Força (N) X Deslocamento (mm) para velocidade de 3,0 m/s.



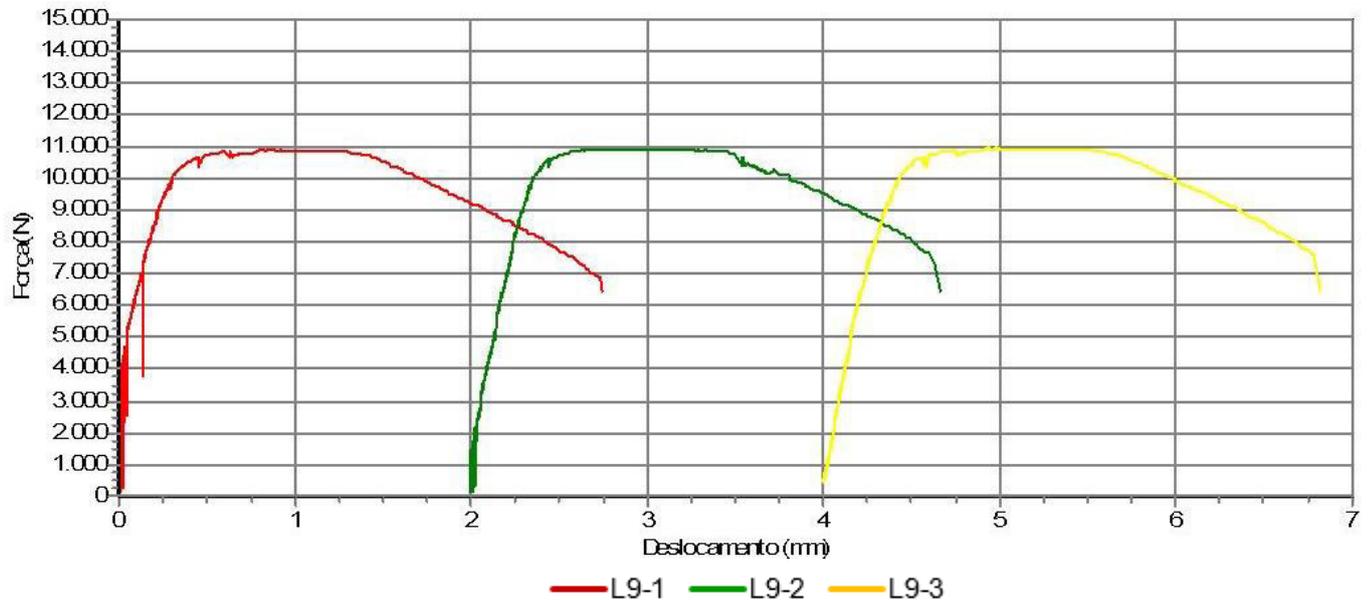
Fonte: Próprio autor.

Figura 18 – Força (N) X Deslocamento (mm) para velocidade de 6,0 m/s.



Fonte: Próprio autor.

Figura 19 – Força (N) X Deslocamento (mm) para velocidade de 9,0 m/s.



Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observado nas figuras, nota-se que a força máxima obtida foi de aproximadamente 11kN, enquanto que o deslocamento foi de aproximadamente 3,80 mm, no entanto, todas as curvas Força (N) X Deslocamento (mm) convencionais apresentaram uma força máxima similar, porém os maiores resultados médios obtidos foram na velocidade de 3,0 m/s. Nas Tabelas 6-9, podem ser observados resultados dos ensaios de tração para as 3 amostras medianas das 3 velocidades de laminação.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de tração obtidos das amostras laminadas com velocidade de 3,0 m/s.

VELOCIDADE	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	DEFORMAÇÃO LINEAR	LIMITE DE ESCOAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE
m/s	N	MPa	mm	MPa	MPa
<b>L3-1</b>	13.543	689,73	5,084	663,67	77.968
<b>L3-2</b>	13.418	691,65	4,629	664,46	80.896
<b>L3-3</b>	13.443	690,18	3,977	659,59	78.856
<b>Desvio Padrão</b>	54	0,82	0,454	2,13	1.226
<b>Média</b>	<b>13.468</b>	<b>690,52</b>	<b>4,563</b>	<b>662,57</b>	<b>79.240</b>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de tração obtidos das amostras laminadas com velocidade de 6,0 m/s.

VELOCIDADE	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	DEFORMAÇÃO LINEAR	LIMITE DE ESCOAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE
m/s	N	MPa	mm	MPa	MPa
<b>L6-1</b>	11.138	770,50	2,515	736,10	77.364
<b>L6-2</b>	11.045	771,30	3,874	730,00	78.105
<b>L6-3</b>	10.977	766,60	2,721	733,10	85.130
<b>Desvio Padrão</b>	66	2,05	0,598	2,49	3.499
<b>Média</b>	<b>11.053</b>	<b>769,47</b>	<b>3,037</b>	<b>733,07</b>	<b>80.200</b>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 – Resultados dos ensaios de tração obtidos das amostras laminadas com velocidade de 9,0 m/s.

VELOCIDADE	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	DEFORMAÇÃO LINEAR	LIMITE DE ESCOAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE
m/s	N	MPa	mm	MPa	MPa
<b>L9-1</b>	10.922	788,30	2,742	747,50	79.117
<b>L9-2</b>	10.928	786,00	2,660	751,60	87.465
<b>L9-3</b>	10.967	780,40	2,818	732,90	78.426
<b>Desvio Padrão</b>	20	3,32	0,065	8,03	4.108
<b>Média</b>	<b>10.939</b>	<b>784,90</b>	<b>2,740</b>	<b>744,00</b>	<b>81.669</b>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9 – Resultados médios dos ensaios de tração obtidos das amostras laminadas com velocidade de 3,0, 6,0 e 9,0 m/s

VELOCIDADE	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	DEFORMAÇÃO LINEAR	LIMITE DE ESCOAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE
m/s	N	MPa	mm	MPa	MPa
3,0	11127	766,20	3,360	705,60	73.669
6,0	11053	769,50	3,040	733,10	80.200
9,0	10939	784,60	2,740	744,00	81.670

Fonte: Próprio autor.

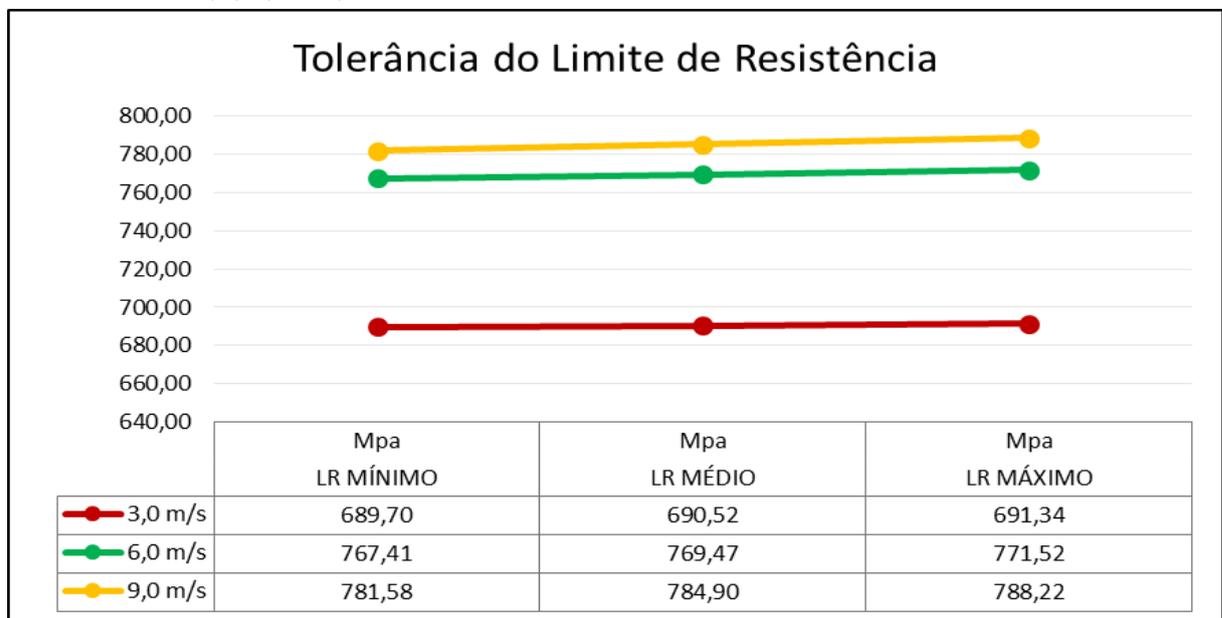
Nota-se que a velocidade de 9,0 m/s apresentou os maiores valores médios de limite de resistência(LR) e limite de escoamento(LE), 784,60 e 744,00 MPa, respectivamente, enquanto que a velocidade de 3,0 m/s apresentou os menores valores, 766,20 e 705,60 MPa, respectivamente.

As menores deformações (Linear, específica e permanente) também foram obtidas na velocidade de 9,0 m/s, chegando a apresentar diferenças bastantes significativas em relação a menor velocidade testada, que foi de 3,0 m/s.

A velocidade de 9,0 m/s apresentou o maior módulo de elasticidade que foi 81.670 MPa.

No Gráfico 1, observamos os valores médios de limite de resistência e suas respectivas tolerâncias no presente estudo, devido ao desvio padrão. A Tabela 10 apresenta a relação LR/LE.

Gráfico 1 – Tolerâncias dos limites de resistência das amostras laminadas com velocidade de 3,0, 6,0 e 9,0 m/s.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 10 – Relação LR/LE para as 3 velocidades de laminação.

VELOCIDADE (m/s)	LR/LE
3,00	1,086
6,00	1,050
9,00	1,055

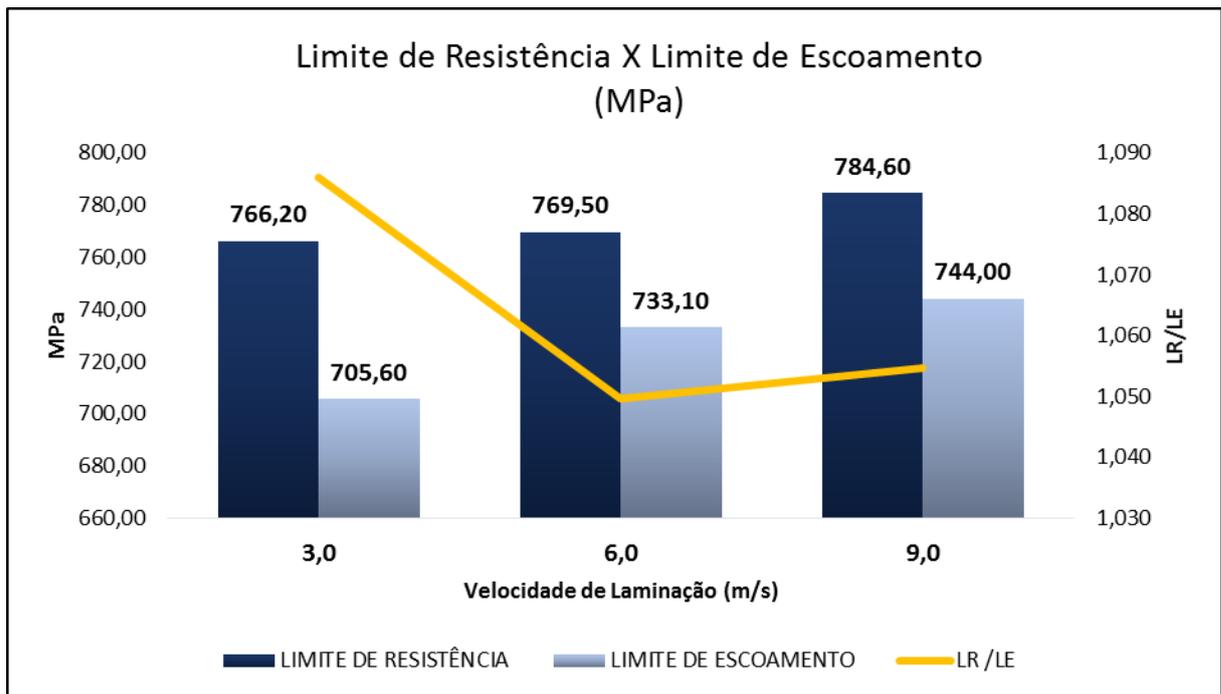
Fonte: Próprio autor.

Observa-se que até o limite de resistência mínimo das velocidades maiores são maiores que o máximo de velocidades menores, comprovando o aumento da resistência à tração a partir do aumento da velocidade de laminação.

Observa-se também que a velocidade de 3,0 m/s apresentou o maior LR/LE, no valor de 1,086, porém todas as velocidades apresentaram o valor igual ou superior ao especificado pela NBR 7480.

No Gráfico 2, nota-se que tanto o Limite de resistência como o Limite de escoamento aumentam com o aumento da velocidade de laminação.

Gráfico 2 – Limite de Resistência X Limite de Escoamento para as diferentes velocidades de laminação.

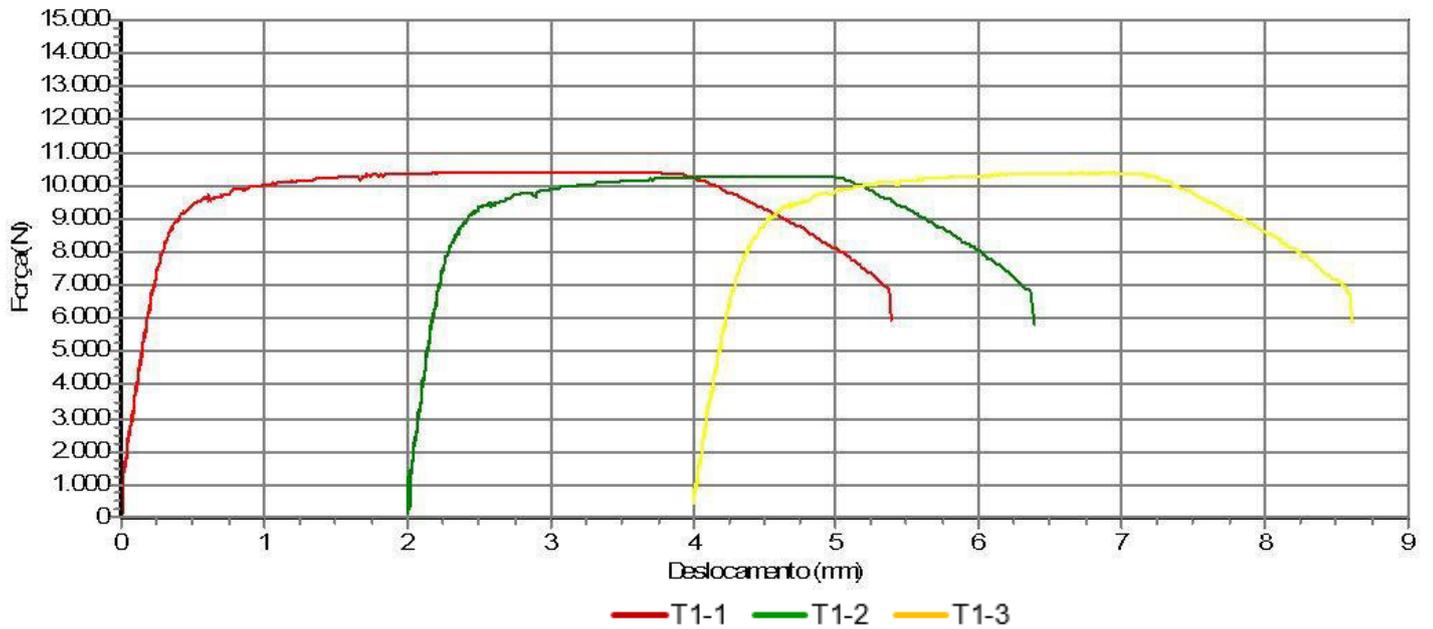


Fonte: Próprio autor.

### 5.1.3 Trefilação

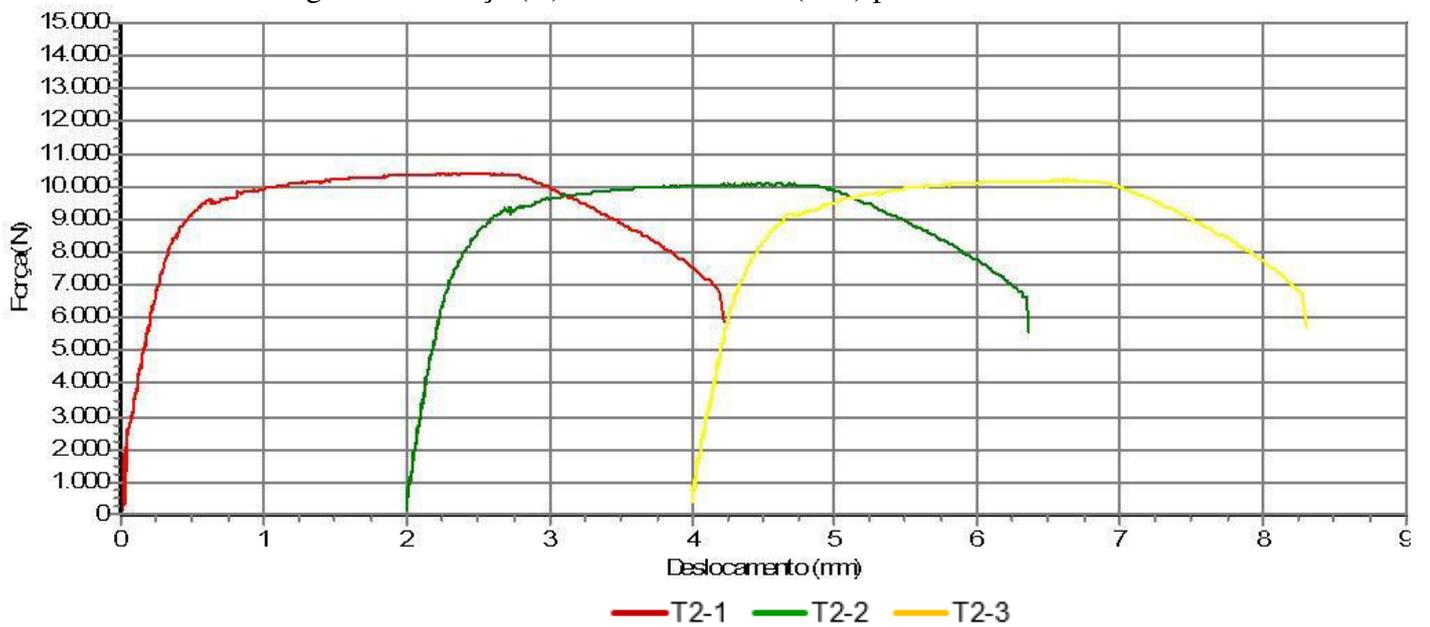
As figuras de 20-22 apresentam a relação Força (N) X Deslocamento (mm) para as 3 amostras com resistência mediana em cada uma das velocidades 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 20 – Força (N) X Deslocamento (mm) para velocidade 1.



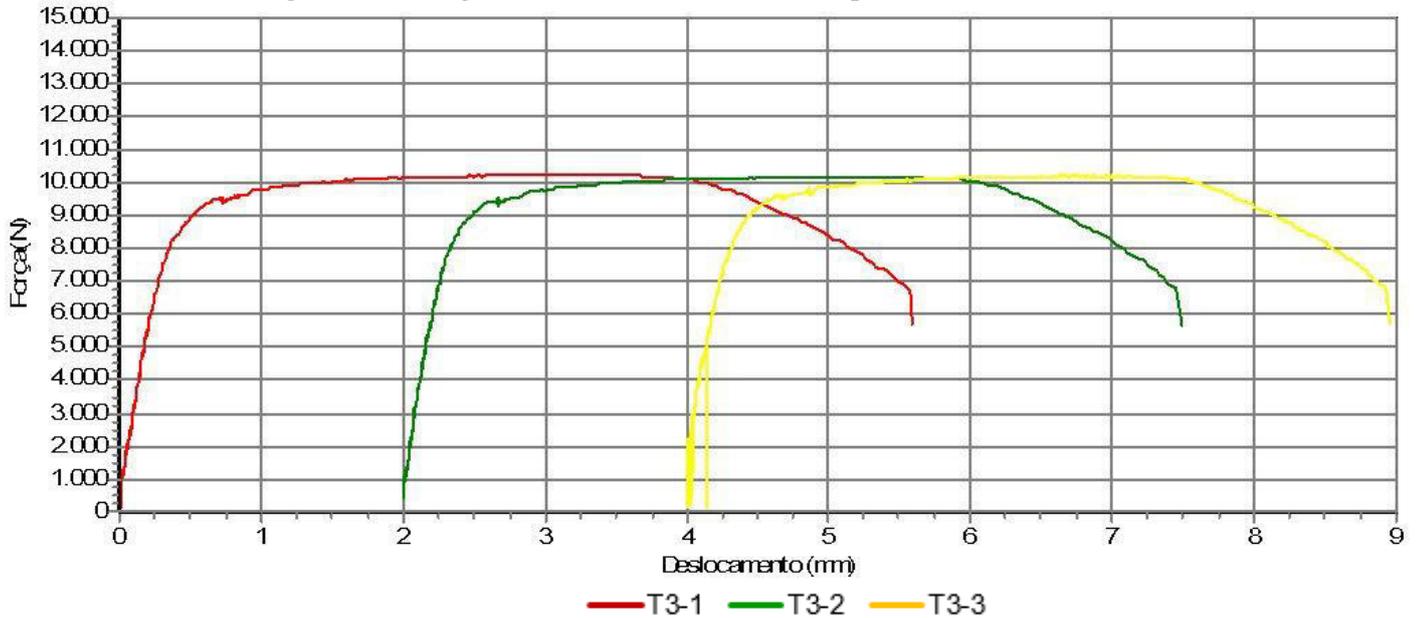
Fonte: Próprio autor.

Figura 21 – Força (N) X Deslocamento (mm) para velocidade 2.



Fonte: Próprio autor.

Figura 22 – Força (N) X Deslocamento (mm) para velocidade 3.



Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observado nas figuras, nota-se que a força máxima obtida foi de aproximadamente 10,5kN, enquanto que o maior deslocamento foi de aproximadamente 5,50 mm, no entanto, todas a curvas Força (N) X Deslocamento (mm) convencionais apresentaram uma força máxima similar, porém os maiores resultados médios obtidos foram na velocidade 1. Nas Tabelas 11-14, podem ser observados resultados dos ensaios de tração para as 3 amostras medianas das 3 velocidades de trefilação.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de tração obtidos das amostras trefiladas com a velocidade 1.

VELOCIDADE	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	DEFORMAÇÃO LINEAR	LIMITE DE ESCOAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE
m/s	N	MPa	mm	MPa	MPa
T1-1	10.434	760,40	5,380	659,00	78.182
T1-2	10.310	762,20	4,383	655,70	82.114
T1-3	10.390	760,80	4,610	641,10	58.825
Desvio Padrão	51	0,77	0,427	7,78	10.179
<b>Média</b>	<b>10.378</b>	<b>761,13</b>	<b>4,791</b>	<b>651,93</b>	<b>73.040</b>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de tração obtidos das amostras trefiladas com velocidade 2.

VELOCIDADE	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	DEFORMAÇÃO LINEAR	LIMITE DE ESCOAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE
m/s	N	MPa	mm	MPa	MPa
T2-1	10.407	758,40	4,216	655,70	63.908
T2-2	10.087	753,00	4,356	644,70	54.196
T2-3	10.199	746,80	4,300	633,00	47.051
Desvio Padrão	133	4,74	0,058	9,27	6.908
<b>Média</b>	<b>10.231</b>	<b>752,73</b>	<b>4,291</b>	<b>644,47</b>	<b>55.052</b>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de tração obtidos das amostras trefiladas com velocidade 3.

VELOCIDADE	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	DEFORMAÇÃO LINEAR	LIMITE DE ESCOAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE
m/s	N	MPa	mm	MPa	MPa
T3-1	10.228	752,50	5,595	645,90	63.082
T3-2	10.165	751,50	5,486	649,30	66.091
T3-3	10.205	750,80	4,958	659,10	62.030
Desvio Padrão	26	0,70	0,278	5,60	1.721
<b>Média</b>	<b>10.199</b>	<b>751,60</b>	<b>5,346</b>	<b>651,43</b>	<b>63.734</b>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 14 – Resultados médios dos ensaios de tração obtidos das amostras trefiladas com velocidade 1, 2 e 3.

VELOCIDADE	FORÇA MÁXIMA	LIMITE DE RESISTÊNCIA	DEFORMAÇÃO LINEAR	LIMITE DE ESCOAMENTO	MÓDULO DE ELASTICIDADE
	N	MPa	mm	MPa	MPa
1	10.378	761,10	4,790	651,90	73.040
2	10.231	752,70	4,290	644,70	56.062
3	10.200	751,60	5,350	651,40	63.734

Fonte: Próprio autor.

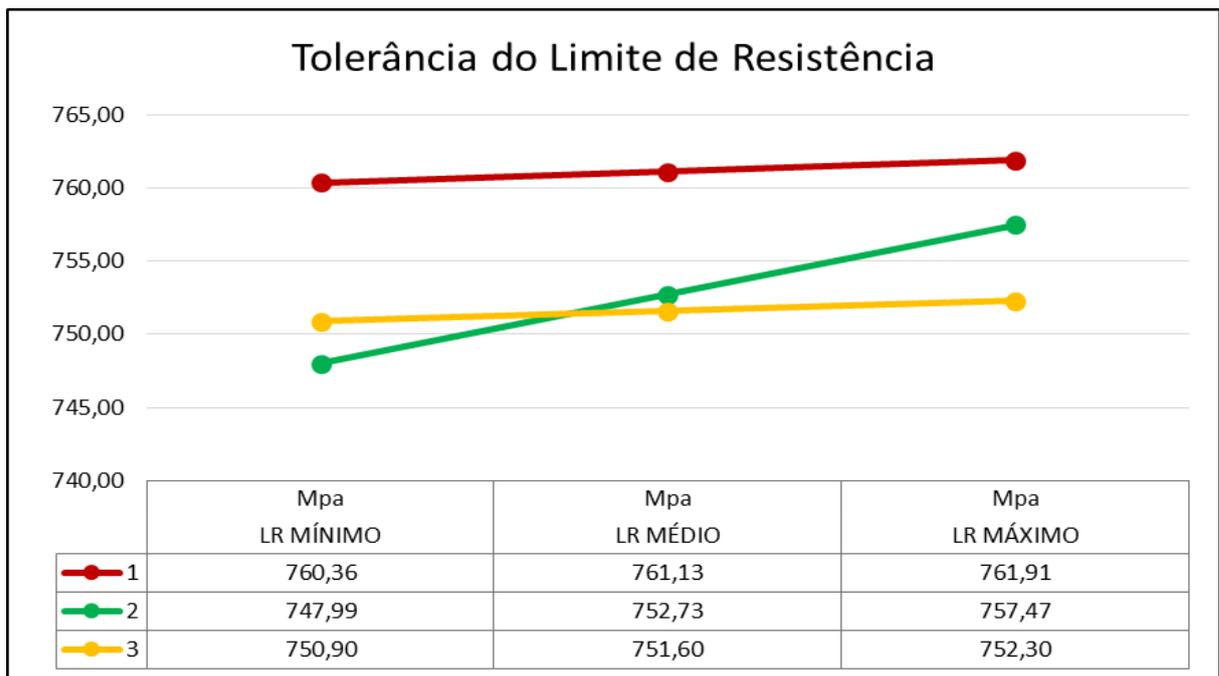
Nota-se que a velocidade 1 apresentou os maiores valores de limite de resistência e limite de escoamento, 761,10 e 651,90 MPa, respectivamente, enquanto que a velocidade 3 apresentou os menores valores, 751,60 e 651,40 MPa, respectivamente.

As menores deformações foram obtidas na velocidade de 2, chegando a apresentar diferenças bastantes significativas em relação a maior velocidade testada, 3.

A velocidade 1 apresentou o maior módulo de elasticidade que foi 73.040 MPa.

No Gráfico 3, observamos os valores médios de limite de resistência e suas respectivas tolerâncias devido o desvio padrão, já a Tabela 15 apresenta a relação LR/LE.

Gráfico 3 – Tolerâncias dos limites de resistência das amostras trefiladas com velocidade 1, 2 e 3.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 15 – Relação LR/LE para as 3 velocidades de trefilação.

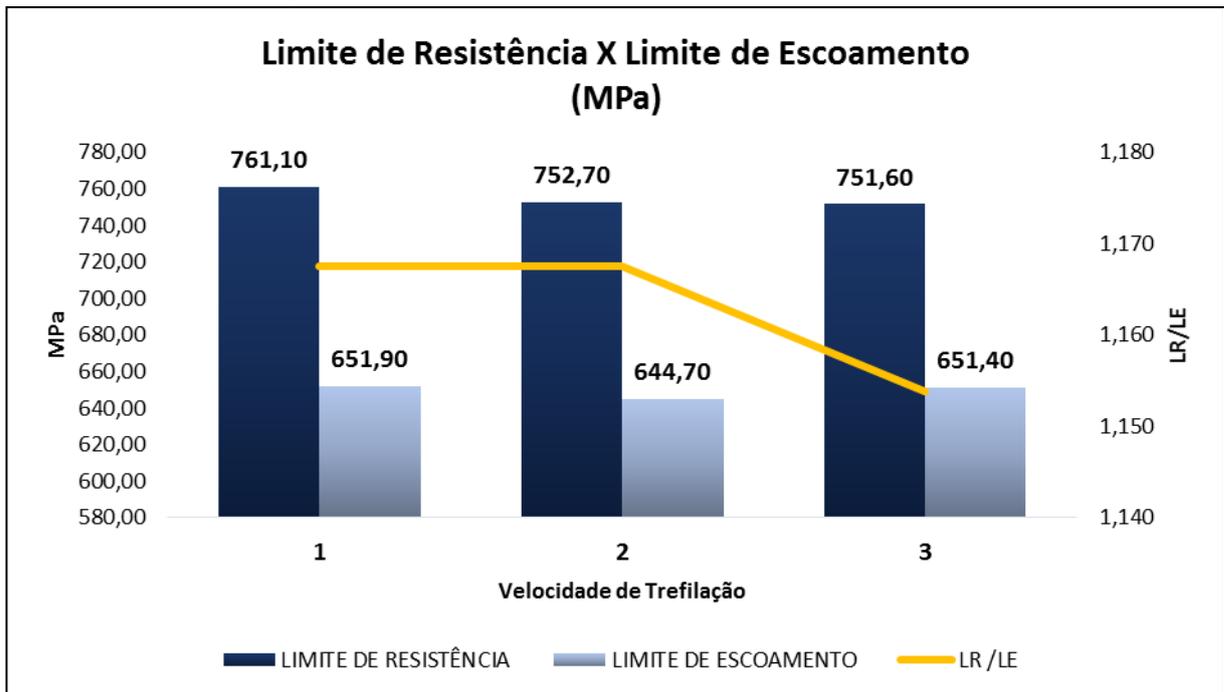
VELOCIDADE	LR/LE
1	1,168
2	1,168
3	1,154

Fonte: Próprio autor.

Observa-se que os valores de tolerâncias de limite de resistência das velocidades 2 e 3 se chocam, desse modo, não se pode concluir se houve aumento ou redução de resistência à tração com o aumento da velocidade, visto que podemos considerar esses valores similares, o que não ocorre com a velocidade 1, então podemos concluir que com a variação da velocidade 1 para velocidades maiores que a velocidade 2 a resistência à tração do material irá diminuir.

Observa-se que as velocidades de 1 e 2 apresentaram o maior LR/LE, no valor de 1,168. Porém, todas as velocidades apresentaram o valor superior ao especificado pela NBR 7480. No Gráfico 4, nota-se que o limite de resistência diminuiu com o aumento da velocidade de trefilação, porém, como falado anteriormente, essa redução não pode ser considerada uma constante, por conta da grande tolerância de limite de resistência que foi encontrada na velocidade 2, e o LE apresentou o seu menor valor na velocidade intermediária.

Gráfico 4 – Limite de Resistência X Limite de Escoamento para as diferentes velocidades de trefilação.



#### 5.1.4 Resultados médios

No Tabela 16, podem ser observados os resultados médios de limite de resistência, em ordem crescente, limite de escoamento e deformação para todos os materiais estudados nesse trabalho.

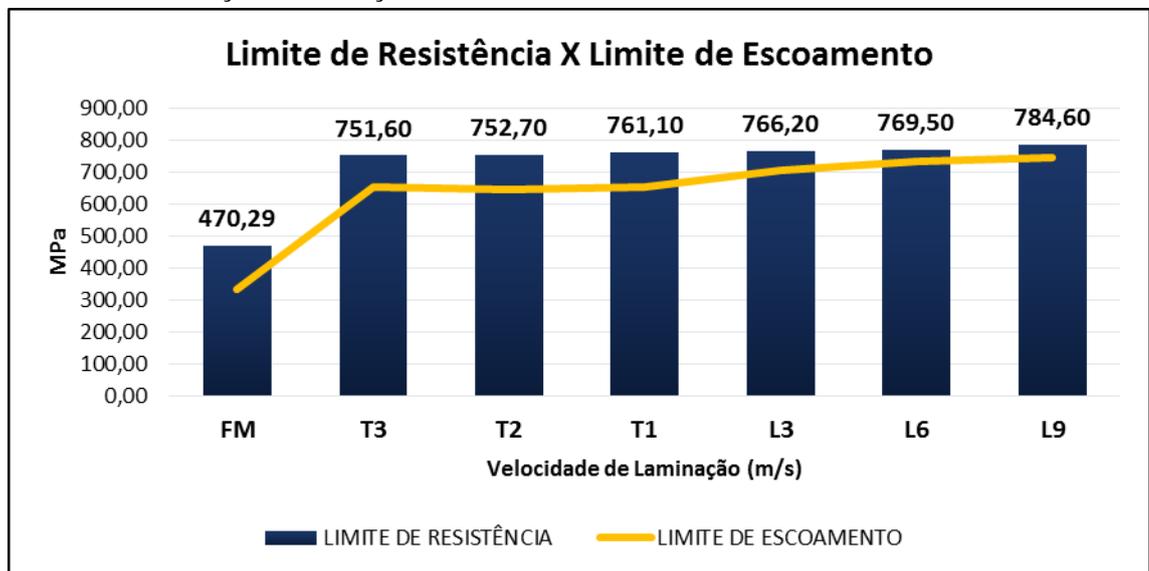
Tabela 16 – Resultados médios de LR, LE e Deformação linear dos materiais estudados.

VELOCIDADE	LIMITE DE RESISTÊNCIA	LIMITE DE ESCOAMENTO	DEFORMAÇÃO LINEAR
m/s	MPa	MPa	mm
FM	470,29	332,89	38,25
T3	751,6	651,4	5,35
T2	752,7	644,7	4,29
T1	761,1	651,9	4,79
L3	766,2	705,6	4,56
L6	769,5	733,1	3,04
L9	784,6	744	2,74

Fonte: Próprio autor.

Portanto, entre todos os materiais estudados o material que passou pelo processo de laminação com velocidade de 9 m/s apresentou os maiores valores de limite de resistência e limite de escoamento, como podemos observar também, no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Limite de Resistência X Limite de Escoamento para as diferentes velocidades de laminação e trefilação.



Fonte: Próprio autor.

### 5.1.5 Coeficiente de resistência e expoente de encruamento

Sabemos que na tensão de escoamento o expoente de encruamento ( $n$ ) é igual a deformação verdadeira, logo e podemos substituir o valor de  $n$  na Equação 9, citada

anteriormente, e vamos obter também o valor de coeficiente de resistência (K). Desse modo, podemos observar nas tabelas 17-18, os valores obtidos para o (n) e (K) de todas as amostras ensaiadas e os valores médios de cada configuração estudada.

Tabela 17 – Expoente de encruamento e coeficiente de resistência de todas as amostras ensaiadas.

<b>Amostra</b>	<b>Expoente de encruamento (n)</b>	<b>Coeficiente de resistência (K)</b>
FM-1	0,0247	369,65
FM-2	0,0344	388,43
FM-3	0,0344	389,21
L3-1	0,0040	681,18
L3-2	0,0040	681,99
L3-3	0,0040	676,99
L6-1	0,0045	757,58
L6-2	0,0046	751,70
L6-3	0,0040	752,44
L9-1	0,0035	765,09
L9-2	0,0037	770,15
L9-3	0,0052	757,09
T1-1	0,0045	678,23
T1-2	0,0040	673,00
T1-3	0,0050	661,57
T2-1	0,0050	676,63
T2-2	0,0052	665,98
T2-3	0,0055	654,92
T3-1	0,0040	662,94
T3-2	0,0037	665,32
T3-3	0,0040	676,49

Fonte: Próprio autor.

Tabela 18 – Expoente de encruamento e coeficiente de resistência médio de cada configuração.

<b>Amostra</b>	<b>Expoente de encruamento (n)</b>	<b>Coeficiente de resistência (K)</b>
FM	0,0312	382,43
L3	0,0040	680,05
L6	0,0044	753,90
L9	0,0041	764,11
T1	0,0045	670,93
T2	0,0052	665,84
T3	0,0039	668,25

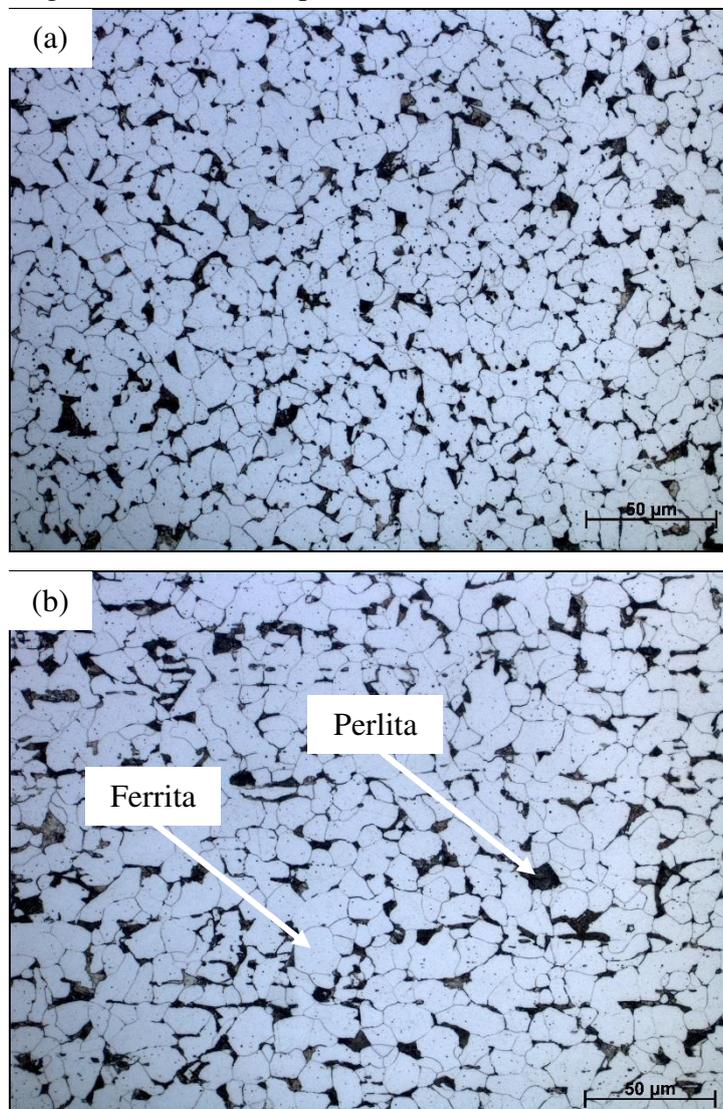
Fonte: Próprio autor.

## 5.2 Micrografias

### 5.2.1 Fio máquina

A Figura 22 apresenta a microestrutura da seção longitudinal da amostra do fio máquina de 5,50 mm de diâmetro, onde pode se observar uma microestrutura composta por uma matriz ferrítica próeutetóide com presença de perlita, além de grãos sem orientação ou alongamento, típico de um material que não passou por conformação a frio.

Figura 22 – a) Microestrutura da seção transversal do fio máquina. b) Microestrutura da seção longitudinal do fio máquina. Ambas com aumento de 500x.

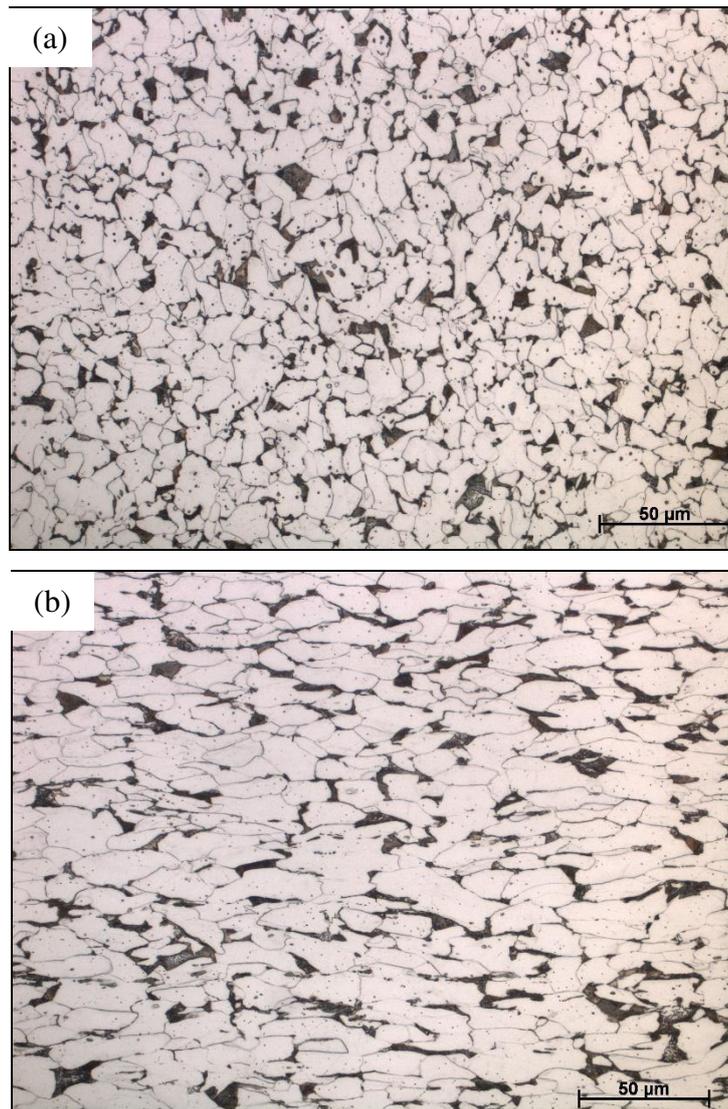


Fonte: Próprio autor.

### 5.2.2 Laminação

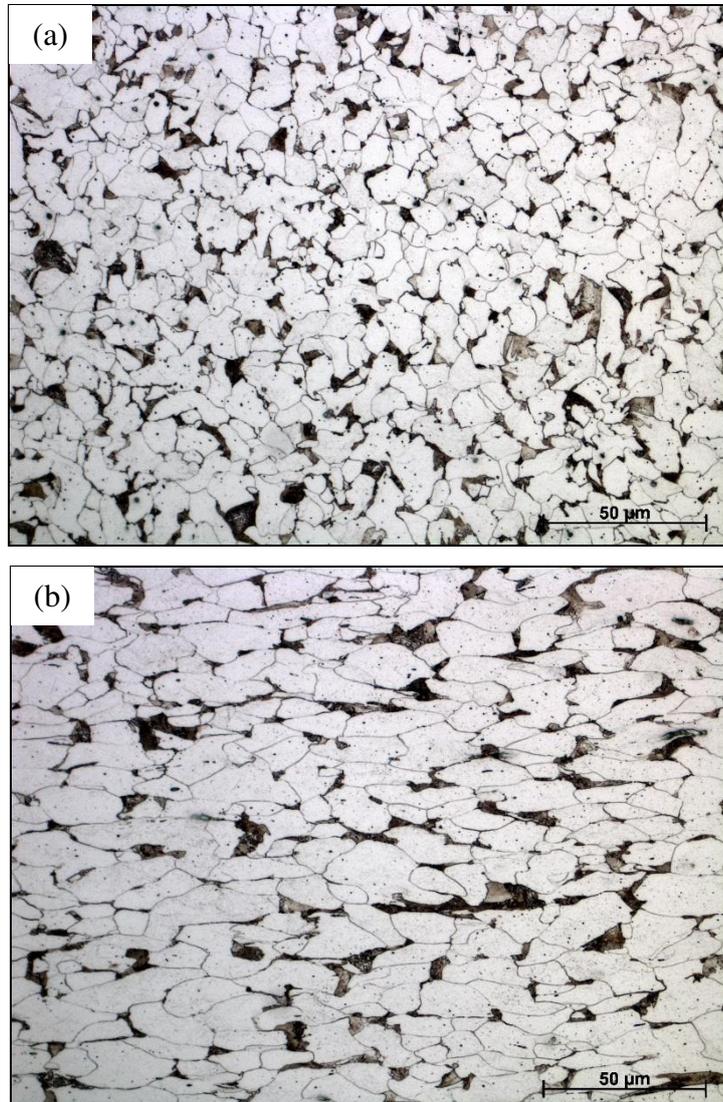
As Figuras 23-25 apresentam as microestruturas das amostras de CA 60 que foram laminadas nas velocidades de 3,0, 6,0 e 9,0m/s, respectivamente.

Figura 23 – a) Microestrutura da seção transversal do CA 60 laminado com velocidade de 3,0m/s. b) Microestrutura da seção longitudinal do CA 60 laminado com velocidade de 3,0m/s. Ambas com aumento de 500x.



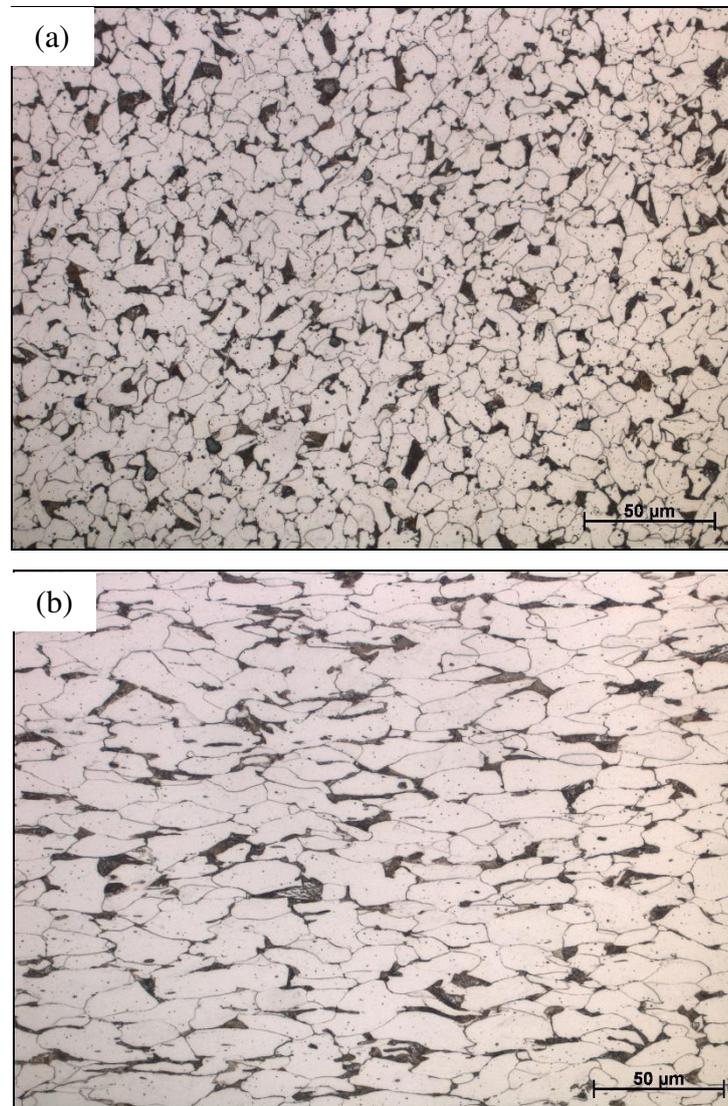
Fonte: Próprio autor.

Figura 24 – a) Microestrutura da seção transversal do CA 60 laminado com velocidade de 6,0m/s. b) Microestrutura da seção longitudinal do CA 60 laminado com velocidade de 6,0m/s. Ambas com aumento de 500x.



Fonte: Próprio autor.

Figura 25 – a) Microestrutura da seção transversal do CA 60 laminado com velocidade de 9,0m/s. b) Microestrutura da seção longitudinal do CA 60 laminado com velocidade de 9,0m/s. Ambas com aumento de 500x.



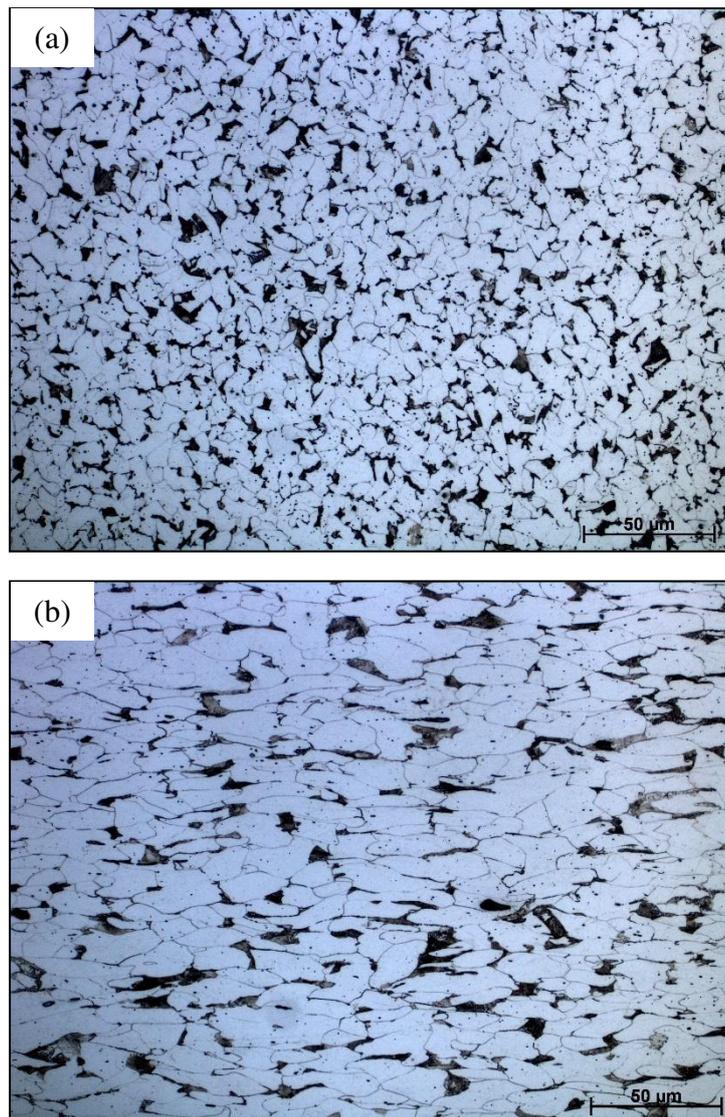
Fonte: Próprio autor.

Em todas as amostras que foram laminadas podemos observar uma microestrutura similar à amostra inicial do fio máquina composta por uma matriz ferrítica proeutetóide com presença de perlita, porém na seção longitudinal os grãos estão mais alongados, típico de um material que passou por conformação a frio. Podemos notar também que as microestruturas das 3 velocidades apresentaram alongamentos de grãos bastante semelhantes.

### 5.2.3 Trefilação

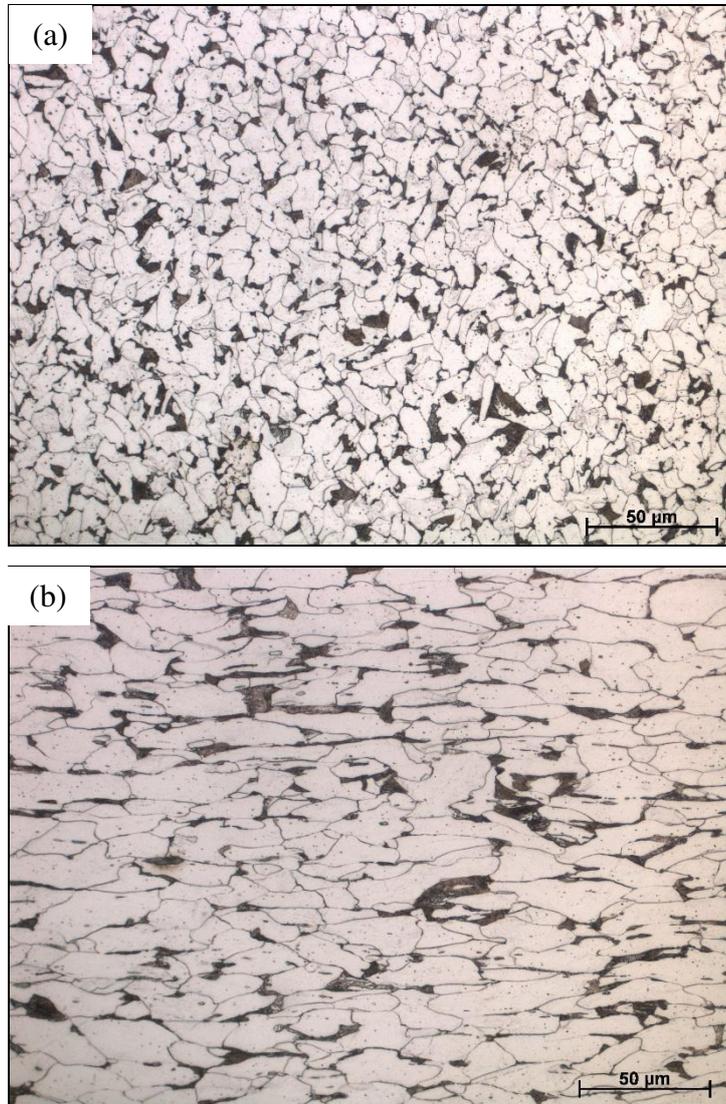
As Figuras 26-28 apresentam as microestruturas das amostras de CA 60 que foram trefiladas nas velocidades 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 26 – a) Microestrutura da seção transversal do CA 60 trefilado na velocidade 1. b) Microestrutura da seção longitudinal do CA 60 trefilado na velocidade 1. Ambas com aumento de 500x.



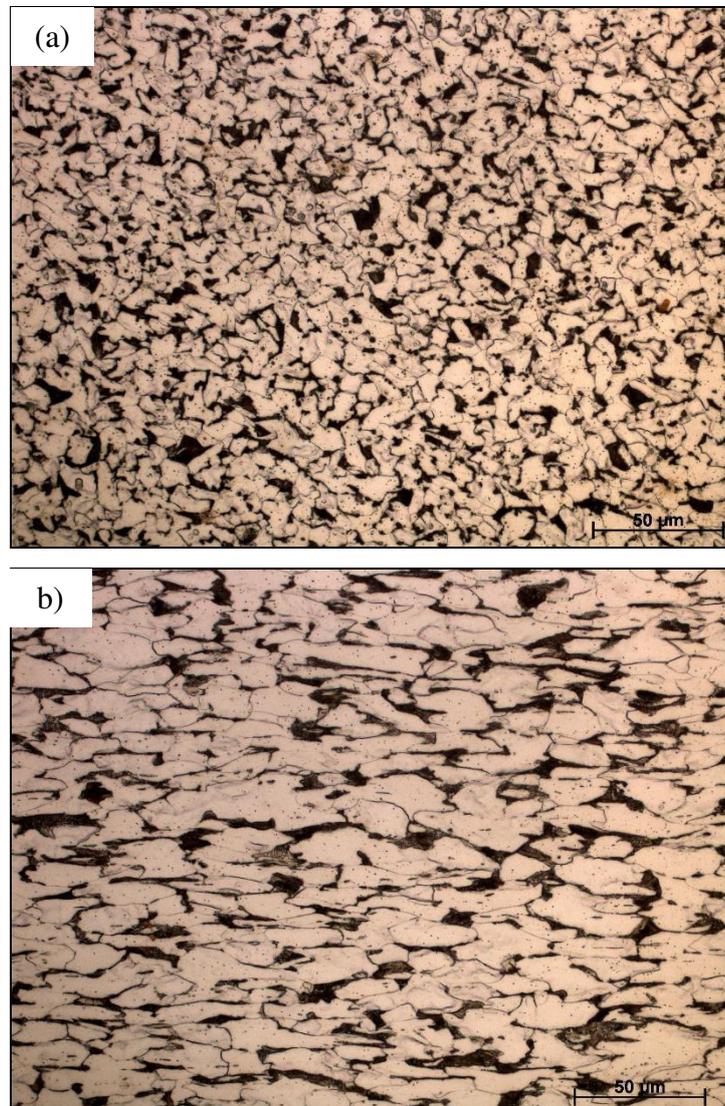
Fonte: Próprio autor.

Figura 27 – a) Microestrutura da seção transversal do CA 60 trefilado na velocidade 2. b) Microestrutura da seção longitudinal do CA 60 trefilado na velocidade 2. Ambas com aumento de 500x.



Fonte: Próprio autor.

Figura 28 – a) Microestrutura da seção transversal do CA 60 trefilado na velocidade 3. b) Microestrutura da seção longitudinal do CA 60 trefilado na velocidade 3. Ambas com aumento de 500x.



Fonte: Próprio autor.

No caso da trefilação, também podemos observar uma microestrutura similar à amostra inicial do fio máquina composta por uma matriz ferrítica proeutetóide com presença de perlita, porém na seção longitudinal os grãos estão mais alongados, típico de um material que passou por conformação a frio. Podemos notar também que as microestruturas das 3 velocidades de trefilação apresentaram alongamentos de grãos bastante semelhantes.

## 5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos nos ensaios de tração e nas micrografias, pode-se afirmar que foi possível analisar a influência da velocidade de conformação nas propriedades mecânicas e nas microestruturas do aço baixo carbono, SAE 1013. Desse modo, com a realização do presente estudo pode-se concluir que:

Todas as amostras conformadas em ambos os processos de conformação à frio foram aprovadas nos requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 7480.

A laminação à frio na velocidade de 9,0 m/s foi a configuração onde se obteve os maiores resultados de limite de resistência e limite de escoamento, 784,60 e 744,00 Mpa, respectivamente.

Na laminação a frio o limite de resistência e o limite de escoamento aumentaram com o aumento da velocidade de conformação do fio máquina.

Com exceção do fio máquina como recebido o processo de trefilação à frio na velocidade de 4,5 m/s do trefilador foi a configuração onde se obteve os menores resultados de limite de resistência, 751,60 Mpa.

Com exceção do fio máquina como recebido o processo de trefilação à frio na velocidade 3,0 m/s do trefilador foi a configuração onde se obteve os menores resultados de limite de escoamento, 651,40 Mpa.

O desvio padrão no processo de trefilação, nos leva a concluir que não é possível afirmar com segurança a tolerância do limite de resistência e do limite de escoamento na velocidade de 3,0 m/s do trefilador, pois o desvio padrão foi muito superior as outras velocidades, inclusive da laminação, no entanto, pode-se afirmar que com o aumento da velocidade de 1,5 m/s para valores acima de 3,0 m/s o limite de resistência e o limite de escoamento irão cair, visto que isso aconteceu em todas as amostras da trefilação.

Como esperado, por se tratar de processos de conformação a frio, todas as microestruturas apresentaram uma microestrutura similar à amostra inicial do fio máquina composta por uma matriz ferrítica proeutetóide com presença de perlita, porém na seção longitudinal, os grãos estão mais alongados, típico de um material que passou por conformação a frio.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6892. **Materiais metálicos. Ensaio de tração à temperatura ambiente.** ABNT NBR 6892, 2002.

ABNT NBR 7480. **Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado.** ABNT NBR 7480, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007.

ASM HANDBOOK. **Vol. 8 - Mechanical Testing and Evaluation.** Materials Park: ASM International, 2000.

ASM HANDBOOK. **Volume 1. Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys,** v. 2, 2009.

BOYER, H. E. **Atlas of Stress-Strain Curves.** 2ª. ed. Materials Park: ASM International, 2002.

BRESCIANI, E. et al. **Conformação Plástica dos Metais.** 6ª. ed. Campinas: Unicamp, 2011.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica- Estrutura e propriedades das ligas metálica.** 2ª. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

COSTA E SILVA, A. L. MEI, P. R. **Aços e ligas especiais.** 3 ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2010.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos.** 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008

DALCIN, G. B. **Ensaio dos Materiais.** Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. 2007.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy.** 3ª. ed. Singapore: McGraw-Hill Book, 1988.

FERREIRA, R. A. S. **Conformação Plástica: Fundamentos Metalúrgicos e Mecânicos.** 2ª. ed. Recife: Universitária UFPE, 2010.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. D. **Ensaio dos Materiais.** Rio de Janeiro: LTC, 2000.

HOSFORD, W. F. **Mechanical Behavior of Materials.** 2ª. ed. New York: Cambridge University Press, 2010.

PADILHA, A. F.; SICILIANO JR., F. **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura.** 3ª. ed. São Paulo: ABM, 2005.

ROCHA, F. A. C. da. **Desenvolvimento de Um Sistema de Ventilação Forçada Para Secar o Fio Máquina na Laminação a Frio de Vergalhões**. Dissertação de Mestrado PGETEMA, Porto Alegre, 2012.

Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo, **Trefilação** <[https://docplayer.com.br/docs-images/42/7879862/images/page\\_12.jpg](https://docplayer.com.br/docs-images/42/7879862/images/page_12.jpg)>. Acesso em: 30/06/2019 às 12:34.

Grupo Aço Cearense. **Vergalhão SI 60** <<http://www.grupoacocearense.com.br/wp-content/uploads/2017/02/si60-vergalhao-aco-cearense.jpg>>. Acesso em: 30/06/2019, às 14:19.

Regis Almir Rohde, **Metalografia preparação de amostras**, Outubro de 2010. <<http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>>. Acesso em: 30/06/2019, às 17:24.