

# INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CONFORMAÇÃO À FRIO NA MICROESTRUTURA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO SAE 1013 UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE VERGALHÃO CA 60\*

Dário Freire Arrais<sup>1</sup>

Gilvania Katia Cruz Pinheiro<sup>2</sup>

Pedro Guilherme do Nascimento Pereira<sup>3</sup>

Hamilton Ferreira Gomes de Abreu<sup>4</sup>

## Resumo

Os vergalhões CA 60 produzidos por processos de conformação mecânica à frio, 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 é a norma NBR 7480:2007. Por esse motivo, este trabalho tinha como objetivo avaliar 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 foi o ensaio de tração, do aço SAE 1013 submetido a 2 processos de conformação: laminação e trefilação a frio com três velocidades diferentes de conformação cada um. Neste estudo, foram obtidos valores de Limite de Resistência, Limite de escoamento e Deformação. Os valores dessas propriedades chegaram a variar de 470 a 784 Mpa, para o limite de resistência à tração, e de 332 a 744 Mpa, para o limite de escoamento, aproximadamente.

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

## INFLUENCE OF COLD STRAIN SPEED IN THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A SAE 1013 STEEL USED IN THE MANUFACTURE OF CA-60 BARS

### Abstract

CA 60 rebars produced by cold forming processes are the main products used in the construction industry. And industries are currently seeking more and more 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 it is the norm NBR 7480: 2007. For this reason, the objective of this work was to evaluate the influence of the conformation velocity on the mechanical and microstructural properties of SAE 1013 steel used in the production of CA 60 rebar. The base of this study was the tensile test of SAE 1013 steel subjected to 2 forming processes: cold rolling and drawing with three different forming speeds each. In this study, values of Resistance Limit, Flow Limit and Deformation were obtained. The values of these properties ranged from 470 to 784 MPa, for the tensile strength limit, and from 332 to 744 MPa, for the flow limit, approximately..

**Keywords:** Strain; Strain speed; Mechanical properties.

<sup>1</sup> Engenharia Metalúrgica, Estudante, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará e Brasil.

<sup>2</sup> Engenharia Metalúrgica, Estudante, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará e Brasil.

<sup>3</sup> Engenharia Metalúrgica, Estudante, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará e Brasil.

<sup>4</sup> Engenharia Naval, Professor Doutor, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará e Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

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 como: Processo de conformação por compressão direta e indireta, respectivamente. E ambos os processos podem ser usados para a produção de vergalhões. Esses processos 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.

### 1.1 Conformação Mecânica

Os processos de conformação 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. (1)

No que se diz respeito as características do produto, a variável que permite uma classificação mais coerente dos processos de conformação dos metais é a temperatura em que se passa o processo. (2)

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.

#### 1.1.1 Conformação mecânica à 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 1, podemos observar a variação das propriedades mecânicas dos metais com a conformação a frio.

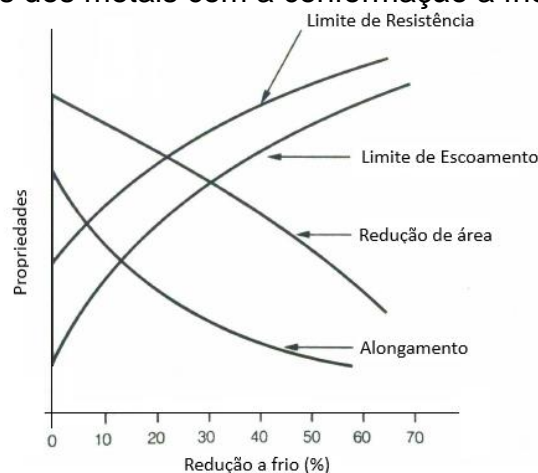
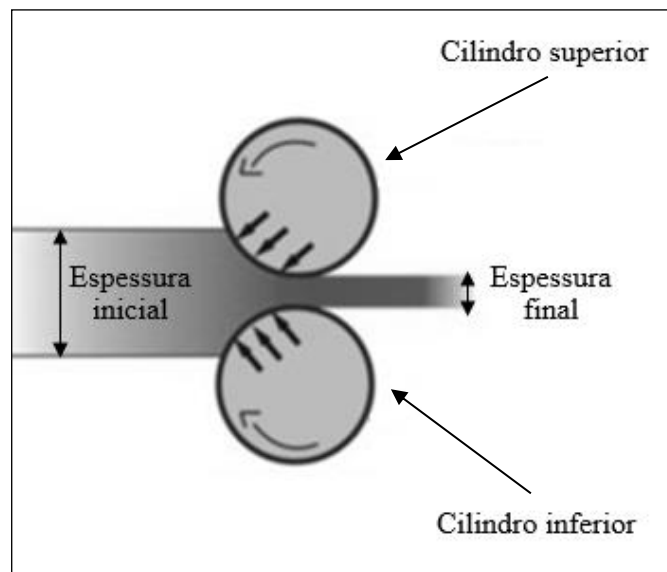


Figura 1. Variação das propriedades mecânicas dos metais com a conformação a frio.

### 1.1.2 Laminação

A laminação é um processo de conformação que essencialmente consiste na passagem de um corpo sólido (peça) entre dois cilindros (ferramentas) que giram à mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários (Figura 2). 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. (1)

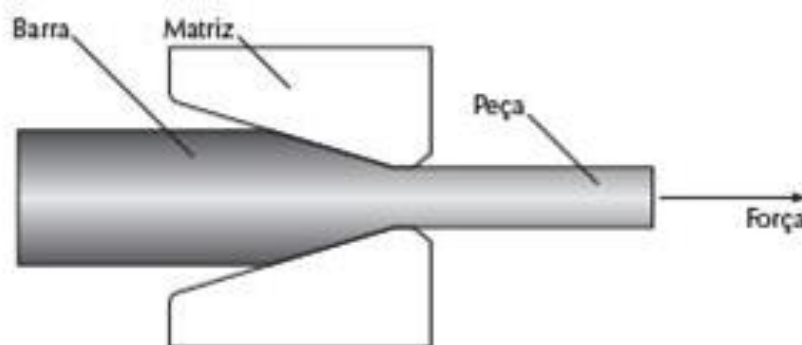


**Figura 2.** Desenho esquemático do processo de laminação.

### 1.1.3 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. (1)

A Figura 3, mostra um desenho esquemático do processo de trefilação do fio máquina.



**Figura 3.** Desenho esquemático do processo de trefilação.

## 1.2 Propriedades Mecânicas

### 1.2.1 Ensaio de 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).

### 1.2.2 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, como pode ser observado na Figura 4.

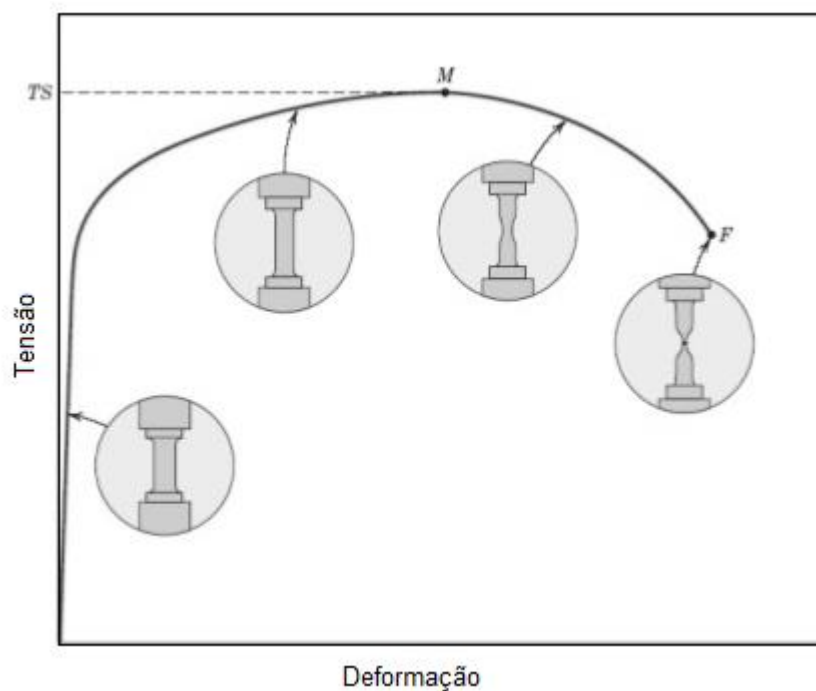


Figura 4 – Curva Tensão-Deformação.

Figura 4. Curva Tensão-Deformação.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Material

A Tabela 1, apresenta a composição química nominal do material estudado:

Tabela 1. Composição química nominal do aço SAE 1013.

	Composição Química (% de massa)			
	C	Mn	P	S
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.

## 2.2 Metodologia

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 5.

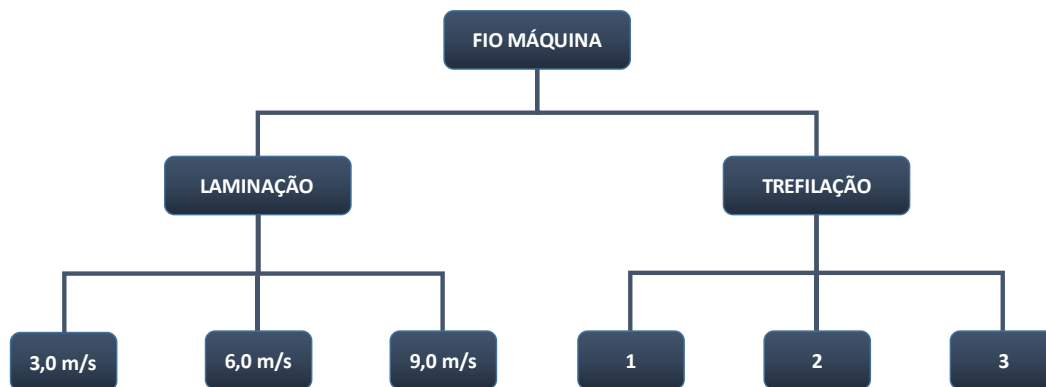


Figura 5. Fluxograma da metodologia do estudo.

### 2.2.1 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.

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.

### 2.2.2 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.

## 2.3 Resultados

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.

### 2.3.1 Fio Máquina

Na Tabela 2, podem ser observados resultados dos ensaios de tração para as 3 amostras medianas do fio máquina.

**Tabela 2** – 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.

### 2.3.2 Laminação

Na Tabela 3, podem ser observados resultados médios dos ensaios de tração para as 3 velocidades de laminação.

**Tabela 3** – 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.

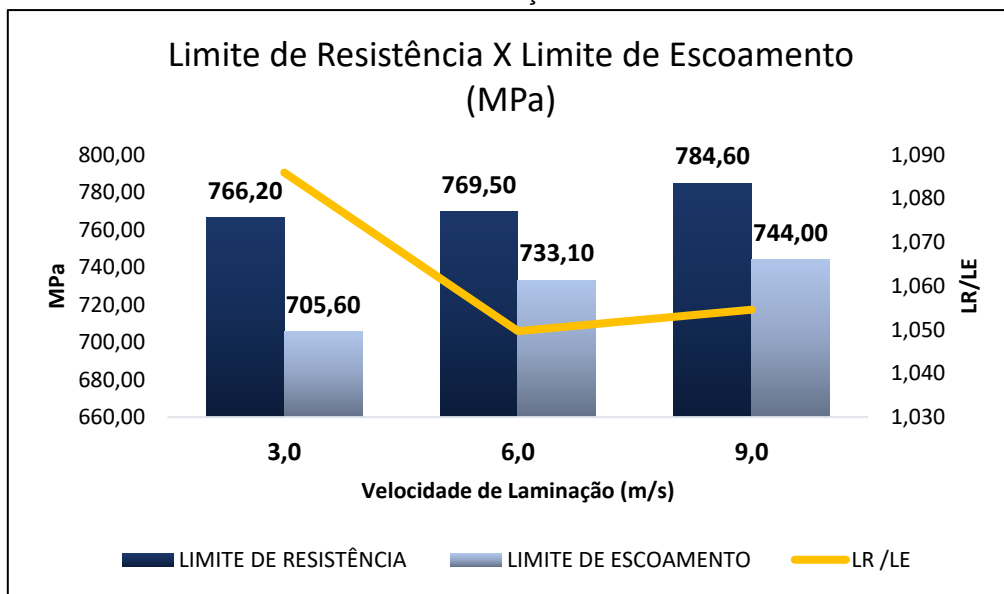
Nota-se que a velocidade de 9,0 m/s apresentou os maiores valores médios de limite de resistência(LR) e limite de escoamento(LE), 784,60 e 744,00 MPa, respectivamente, enquanto que a velocidade de 3,0 m/s apresentou os menores valores, 766,20 e 705,60 MPa, respectivamente.

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, nota-se que tanto o Limite de resistência como o Limite de escoamento aumentam com o aumento da velocidade de laminação.

**Gráfico 1** – Limite de Resistência X Limite de Escoamento para as diferentes velocidades de laminação.



Fonte: Próprio autor.

### 2.3.3 Trefilação

Na Tabela 4, podem ser observados resultados médios dos ensaios de tração para as 3 velocidades de trefilação.

**Tabela 4** – 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.

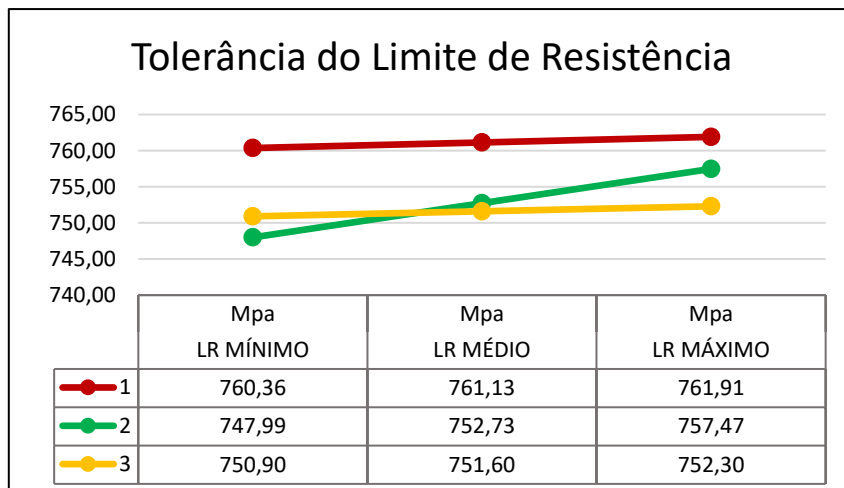
Nota-se que a velocidade 1 apresentou os maiores valores de limite de resistência e limite de escoamento, 761,10 e 651,90 MPa, respectivamente, enquanto que a velocidade 3 apresentou os menores valores, 751,60 e 651,40 MPa, respectivamente.

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 2, pode-se observar os valores médios de limite de resistência e suas respectivas tolerâncias devido o desvio padrão,

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

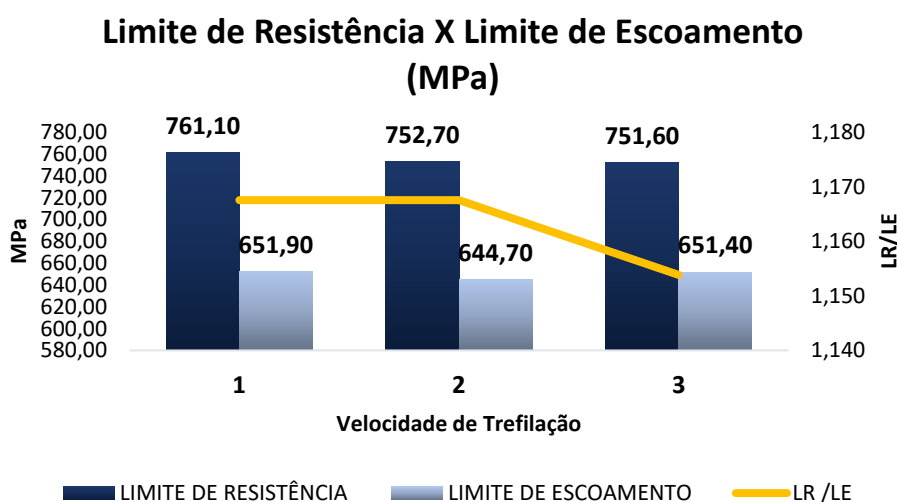


Fonte: Próprio autor.

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.

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.**



Fonte: Próprio autor.



### 2.3.4 Resultados Médios

No Tabela 5, 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.

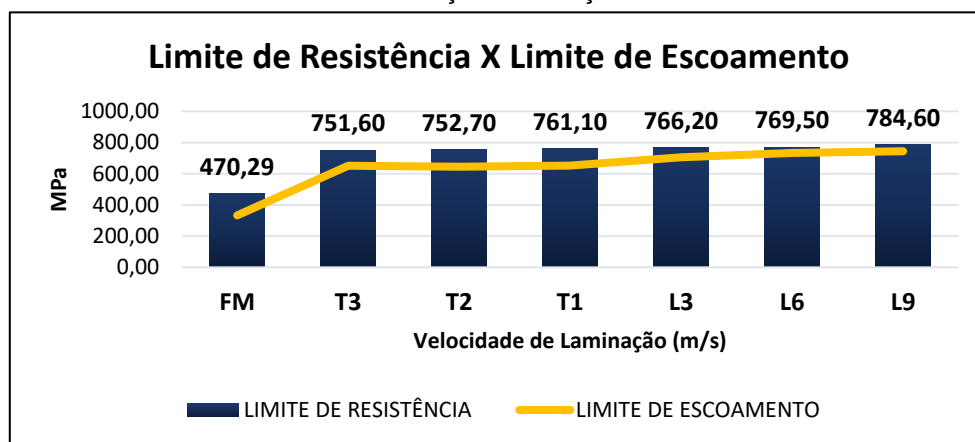
**Tabela 5** – Resultados médios de LR, LE e Deformação linear dos materiais estudados.

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.

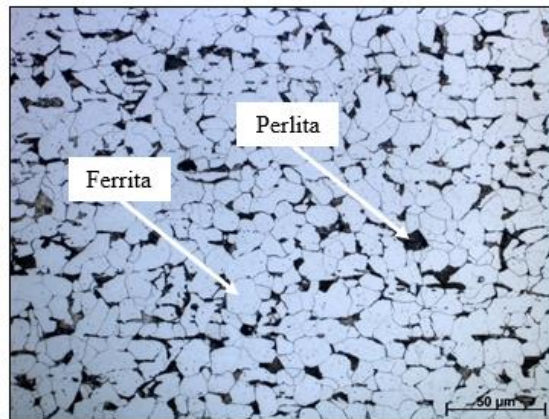
**Gráfico 5** – Limite de Resistência X Limite de Escoamento para as diferentes velocidades de laminação e trefilação.



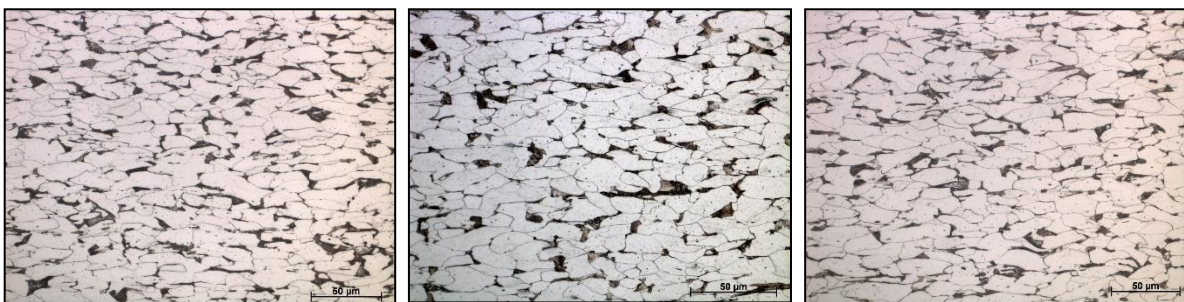
Fonte: Próprio autor.

### 2.3.5 Micrografias

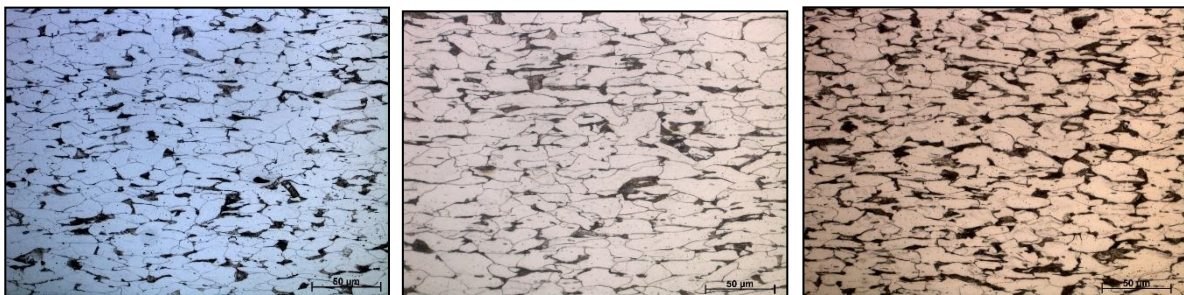
As Figura 6-8 apresentam a microestrutura da seção longitudinal da amostra do fio máquina de 5,50 mm de diâmetro e do CA 60 de 4.20 mm de diâmetro, laminado e trefilado, onde pode se observar uma microestrutura composta por uma matriz ferrítica próeutetóide com presença de perlita, além de grãos sem orientação ou alongamento, típico de um material que não passou por conformação a frio.



**Figura 6.** Microestrutura da seção longitudinal do fio máquina. Com aumento de 500x.



**Figura 7.** Microestrutura da seção longitudinal do CA 60 laminado nas velocidades 3,0m/s, 6,0 m/s e 9,0 m/s, respectivamente. Com aumento de 500x.



**Figura 8.** Microestrutura da seção longitudinal do CA 60 trefilado nas velocidades 1,5m/s, 3,0 m/s e 4,5 m/s, respectivamente. Com aumento de 500x

### 3 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 1 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 2 do trefilador foi a configuração onde se obteve os menores resultados de limite de escoamento, 651,40 Mpa.

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

- 1 BRESCIANI, E. et al. *Conformação Plástica dos Metais*. 6ª. ed. Campinas: Unicamp, 2011
- 2 COSTA E SILVA, A. L. MEI, P. R. *Aços e ligas especiais*. 3 ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2010
- 3 CALLISTER JR, W. D.; RETHWISH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- 4 ABNT NBR 6892. *Materiais metálicos. Ensaio de tração à temperatura ambiente*. ABNT NBR 6892, 2002.
- 5 ABNT NBR 7480. *Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado*. ABNT NBR 7480, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007