



Universidade Federal do Ceará  
Centro de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais  
Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica  
Trabalho Final de Curso

Francisco Hélio Vasconcelos Filho

**Influência da Taxa de Deformação sobre as Propriedades Mecânicas de Aços  
Estruturais CA-50**

**Fortaleza**

**2012**

**Francisco Hélio Vasconcelos Filho**

**Influência da Taxa de Deformação sobre as Propriedades Mecânicas de Aços Estruturais CA-50**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel no curso de engenharia metalúrgica.

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

**Fortaleza - CE**

**2012**

## Formulário de avaliação do trabalho final de curso

<u>Nome completo do discente:</u> FRANCISCO HÉLIO VASCONCELOS FILHO
<u>Nome completo do orientador:</u> HAMILTON FERREIRA GOMES DE ABREU
<u>Título do trabalho:</u> Influência da Taxa de Deformação sobre as Propriedades Mecânicas de Aços Estruturais CA-50

Banca Examinadora	
	MÉDIA
Prof. Dr. HAMILTON FERREIRA GOMES DE ABREU	
Prof. Dr. MARCELO JOSÉ GOMES DA SILVA	
Prof. Dr. ELINEUDO PINHO DE MOURA	
MÉDIA FINAL	

Fortaleza, 15 de Fevereiro de 2012

---

Dr. HAMILTON FERREIRA GOMES DE ABREU

---

Dr. . MARCELO JOSÉ GOMES DA SILVA

---

Dr. ELINEUDO PINHO DE MOURA

*Não é a força, mas a constância dos bons resultados que  
conduz os homens à felicidade.*

Friedrich Nietzsche

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho em primeiro lugar ao meu criador, Deus. A meus pais Francisco Hélio Vasconcelos e Ângela Maria Arcanjo Alves, que como meus primeiros professores, me educaram para o mundo. Aos meus irmãos Francisco Davi Alves Vasconcelos e Lia Arcanjo Alves Vasconcelos, meus eternos companheiros. Aos amigos que fiz durante toda a minha vida. Aos colegas e fortes amigos que fiz na faculdade. A todos os professores do curso pelo vasto conhecimento passado e por ajudarem a tornar a faculdade o meu segundo lar.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus, meu criador e Pai, sem Ele não teria forças para a concretização deste trabalho. Aos meus pais, irmãos e minha família; o homem que sou, devo tudo a eles.

Ao LACAM (Laboratório de Caracterização de Materiais), pela disponibilidade dos equipamentos que foram de extrema importância para a execução deste trabalho.

Aos colegas e eternos amigos do curso que com certeza foram e serão sempre a minha segunda família.

Aos funcionários da faculdade que se preocuparam em zelar e deixar o ambiente de estudo o mais adequado para um bom aprendizado.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, que com o dom de transmitir o conhecimento irão formar muitos Engenheiros Metalurgistas.

## RESUMO

Os vergalhões de aço CA-50 para construção civil e mecânica são obtidos por laminação a quente e podem ser produzidos em diversos diâmetros nominais, em formas de rolos ou barras retas, de acordo com as especificações da norma NBR 7480/1996. Neste trabalho, procurou-se analisar a influência da taxa de deformação nas propriedades mecânicas em vergalhões CA-50, produzidos em rolos, com diferentes diâmetros nominais – 6,3mm, 8mm, 10mm e 12,5mm – quando submetidos a ensaios de tração sob três taxas de deformação na fase plástica – 7mm/min, 600mm/min e 2500mm/min. Para análise das propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência e alongamento), foram realizados quinze ensaios de tração para cada diâmetro nominal, sendo submetidos às três condições de resfriamento (alto, médio e baixo) para cada taxa de deformação, num total de 180 ensaios realizados. Os dados obtidos nos ensaios de tração foram traçados e analisados. Foi calculado o coeficiente  $m$ , conhecido como “coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação”, para cada diâmetro nominal e condições de resfriamento. Os resultados do coeficiente  $m$ , que é um valor característico de um material homogêneo, não foram iguais para as bitolas de diâmetros diferentes. A taxa de resfriamento não alterou o valor de  $m$  em um mesmo diâmetro nominal. Com o valor do coeficiente  $m$ , é possível realizar ensaios mecânicos a uma taxa de ensaio maior e obter os mesmos valores para uma taxa menor, tendo como benefício uma significativa redução do tempo de realização dos ensaios, com resultados confiáveis.

**Palavras Chaves:** taxa de deformação, propriedades mecânicas, coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação.

## **ABSTRACT**

*The steel rods CA-50 for civil construction and mechanical engineering are obtained by hot lamination and may be produced in different nominal diameters, in forms of rolls or straight bars according to the specifications of the NBR 7480/1996 rules. In this work, we tried to analyze the influence of strain rate on mechanical properties in CA-50 rods, produced in the form of rolls with different nominal diameters – 6,3mm, 8mm, 10mm and 12,5mm – when subjected to tensile tests in three strain rates in the plastic phase – 7mm/min, 600mm/min and 2500mm/min. For the analysis of mechanical properties (flow limit, strength limit and elongation) fifteen tensile tests were performed for each nominal diameter and subjected to three cooling conditions (high, medium and low) for each strain rate, totaling 180 tests. The data acquired in tensile strain test were plotted and analyzed. We calculated the coefficient  $m$ , known as "coefficient of sensitivity to strain rate" for each nominal diameter and cooling conditions. The results of coefficient  $m$ , which is a characteristic value of a homogeneous material, were not identical to the gauges of different diameters. The cooling rate did not alter the value of  $m$  in a same nominal diameter. With the value of the coefficient  $m$ , it is possible to perform mechanical tests at a higher rate tests and get the same values for a lower rate, having as benefit a significant shortening of the tests with reliable results.*

**Keywords:** *strain rate, mechanical properties, coefficient of the strain rate sensitivity.*



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Barras de aço em forma de feixe (A) e em forma de rolo (B) (MARANHÃO FERROPRONTO, 2011). .....	1
Figura 2. Desenho esquemático do equipamento Stelmor, adaptada de (WAN-HUA, SHAO-HUI, <i>et al.</i> , 2009). .....	5
Figura 3. Foto do Stelmor destacando o formador de espiras, os rolos transportadores e as barras em forma de espiras, adaptada de (UGIVIS, 2011). .....	6
Figura 4. Macrografia do vergalhão de 8 mm (NETO, M.Q, 2011). .....	7
Figura 5. Macrografia do vergalhão de 10 mm (NETO, M.Q, 2011). .....	7
Figura 6. Macrografia do vergalhão de 12,5 mm (NETO, M.Q, 2011). .....	7
Figura 7. Máquina de tração esquemática (CALLISTER, 2007). .....	8
Figura 8. Uma comparação entre os comportamentos típicos tensão-deformação de engenharia e tensão-deformação verdadeira em tração (CALLISTER, 2007). .....	9
Figura 9. Limite de escoamento-Superior e Inferior (COSTA, GUTIERREZ, RODRIGUES e SILVA, 2009). .....	10
Figura 10. Limite de escoamento convencional $n$ (COSTA, GUTIERREZ, RODRIGUES e SILVA, 2009). .....	11
Figura 11. Limite de resistência da curva tensão-deformação (COSTA, GUTIERREZ, RODRIGUES e SILVA, 2009). .....	12
Figura 12. Método de determinação de $m$ na curva tensão-deformação (HOSFORD, 2005). .....	14
Figura 13. Máquina de ensaios mecânicos INSTRON (Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFC). .....	16
Figura 14. Corpos de prova de diferentes diâmetros nominais usados no ensaio de tração (NETO, J.B.R, 2010). .....	17
Figura 15. Esquema das marcações realizadas para determinação do comprimento final (NETO, J.B.R, 2010). .....	17
Figura 16. Média com seu desvio padrão dos: limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e alongamento (AL) para a bitola de 6,3 mm nas três condições de resfriamento e três taxas de ensaio. ....	18
Figura 17. Média com seu desvio padrão dos: limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e alongamento (AL) para a bitola de 8 mm nas três condições de resfriamento e três taxas de ensaio. ....	19
Figura 18. Média com seu desvio padrão dos: limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e alongamento (AL) para a bitola de 10 mm nas três condições de resfriamento e três taxas de ensaio. ....	20
Figura 19. Média com seu desvio padrão dos: limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e alongamento (AL) para a bitola de 12,5 mm nas três condições de resfriamento e três taxas de ensaio. ....	21
Figura 20. Ensaio de Tração de 3 corpos de prova em diferentes velocidades de ensaio. ....	22

Figura 21. Valores retirados do gráfico tensão/deformação para o cálculo do coeficiente m para a bitola de 6,3 mm.....	23
Figura 22. Valores médios com seus erros para o cálculo do coeficiente m para a bitola de 6,3 mm.....	24
Figura 23. Valores retirados do gráfico tensão/deformação para o cálculo do coeficiente m para a bitola de 8mm.....	24
Figura 24. Valores médios com seus erros para o cálculo do coeficiente m para a bitola de 8 mm.....	25
Figura 25. Valores retirados do gráfico tensão/deformação para o cálculo do coeficiente m para a bitola de 10mm.....	26
Figura 26. Valores médios com seus erros para o cálculo do coeficiente m para a bitola de 10 mm.....	27
Figura 27. Valores retirados do gráfico tensão/deformação para o cálculo do coeficiente m para a bitola de 12,5mm.....	27
Figura 28. Valores médios com seus erros para o cálculo do coeficiente m para a bitola de 12,5 mm.....	28
Figura 29. Valores encontrados do coeficiente m com seus respectivos erros para todas as bitolas em diferentes taxas de resfriamento. ....	29
Figura 30. Gráfico de ensaio de tração na taxa de 600 mm/min em um vergalhão de 6,3 mm resfriado a uma taxa alta. ....	30
Figura 31. Gráfico de ensaio de tração na taxa de 3/7 mm/min num vergalhão de 6,3 mm resfriado a uma taxa alta. ....	32
Figura 32. Gráfico de ensaio de tração na taxa de 600 mm/min em um vergalhão de 10 mm resfriado a uma taxa alta. ....	32
Figura 33. Gráfico de ensaio de tração na taxa de 3/7 mm/min num vergalhão de 10 mm resfriado a uma taxa alta. ....	34

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Valores típicos do coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação $m$ , em temperatura ambiente (HOSFORD, 2005). .....	13
Tabela 2. Ensaio mecânicos realizados para cada taxa de deformação e condição de resfriamentos estudados. ....	15
Tabela 3. Valores retirados dos ensaios de tração para cálculo do coeficiente $m$ para a bitola de 6,3 mm. ....	23
Tabela 4. Valores retirados dos ensaios de tração para cálculo do coeficiente $m$ para a bitola de 8 mm. ....	25
Tabela 5. Valores retirados dos ensaios de tração para cálculo do coeficiente $m$ para a bitola de 10 mm. ....	26
Tabela 6. Valores retirados dos ensaios de tração para cálculo do coeficiente $m$ para a bitola de 12,5mm. ....	28
Tabela 7. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 6,3 mm na taxa de 3/7 mm/min. ....	39
Tabela 8. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 6,3 mm na taxa de 600/600 mm/min. ....	40
Tabela 9. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 6,3 mm na taxa de 2500/2500 mm/min. ....	41
Tabela 10. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 8 mm na taxa de 3/7 mm/min. ....	42
Tabela 11. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 8 mm na taxa de 600/600 mm/min. ....	43
Tabela 12. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 8 mm na taxa de 2500/2500 mm/min. ....	44
Tabela 13. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 10 mm na taxa de 3/7 mm/min. ....	45
Tabela 14. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 10 mm na taxa de 600/600 mm/min. ....	46
Tabela 15. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 10 mm na taxa de 2500/2500 mm/min. ....	47
Tabela 16. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 12,5 mm na taxa de 3/7 mm/min. ....	48
Tabela 17. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 12,5 mm na taxa de 600/600 mm/min. ....	49
Tabela 18. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 12,5 mm na taxa de 2500/2500 mm/min. ....	50

**SUMÁRIO**

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. AÇOS.....	4
3.1.1. AÇOS-CARBONO ESTRUTURAIS.....	4
3.2. SISTEMA DE TRATAMENTO TÉRMICO.....	5
3.2.1. STELMOR.....	5
3.2.2. THERMEX.....	6
3.2.3. TRANSFORMAÇÃO DE FASES.....	6
3.3. ENSAIO DE TRAÇÃO.....	8
3.4. CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO (CURVA DE ESCOAMENTO).....	10
3.4.1. LIMITE DE ESCOAMENTO.....	10
3.4.2. LIMITE DE RESISTÊNCIA.....	12
3.4.3. EFEITO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO NAS PROPRIEDADES DE ESCOAMENTO.....	12
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
4.1. TRATAMENTO TÉRMICO.....	15
4.2. ENSAIO DE TRAÇÃO.....	16
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
5.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	18
5.2. COMPROVAÇÃO DOS RESULTADOS.....	29
6. CONCLUSÃO.....	35
7. TRABALHOS FUTUROS.....	36
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37
9. ANEXO.....	39

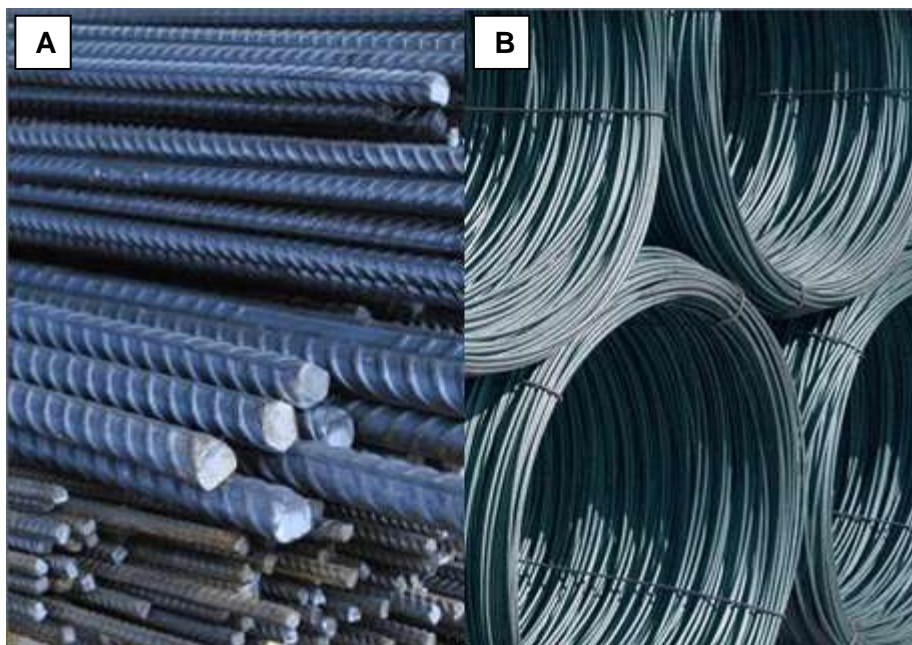
## 1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos tempos, o melhor entendimento e conhecimento dos materiais, o desenvolvimento de novas ligas e a enorme gama de aplicações possíveis com os materiais, a indústria siderúrgica muito tem se preocupado com a busca de informações sobre a melhor forma de produzir aços que serão utilizados nas mais diversas demandas.

Um fator decisivo para a aceitação de novos produtos deve levar em conta a sua fabricação, a escolha dos teores de elementos de liga, as propriedades mecânicas dos materiais e o tipo de tratamento térmico que deve sofrer. Este último é muito aplicado na produção de aço para construção civil e mecânica.

Frequentemente, os aços são selecionados para aplicações estruturais devido às suas combinações desejáveis de características mecânicas relacionadas ao seu comportamento tensão-deformação, combinando a estes materiais uma alta resistência à capacidade de sofrerem deformação plástica.

Os vergalhões de aço podem ser produzidos em diversos diâmetros nominais, em forma de rolos ou barras retas (Figura 1).



**Figura 1. Barras de aço em forma de feixe (A) e em forma de rolo (B) (MARANHÃO FERROPRONTO, 2011).**

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

A teoria da deformação plástica tem sido uma das áreas mais ativas da mecânica do contínuo, e foram obtidos progressos consideráveis no desenvolvimento de uma teoria capaz de resolver importantes problemas de engenharia. Do ponto de vista de projeto, a plasticidade é aplicada à previsão da carga máxima que pode ser imposta a um corpo sem causar escoamento excessivo (DIETER, 1981).

Neste trabalho, procurou-se analisar a influência da taxa de deformação sobre as propriedades mecânicas: limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e alongamento (Al), em vergalhões de aço carbono CA-50 fabricados em rolo, submetidos a três taxas de deformação sobre três condições de resfriamento diferentes, durante etapa de tratamento térmico, ensaiados sob tração.

## **2 OBJETIVO**

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da taxa de deformação nas propriedades mecânicas em vergalhões CA-50 produzidos em rolos, com diferentes diâmetros nominais (bitolas) – 6,3mm, 8mm, 10mm e 12,5mm– quando submetidos a ensaios de tração sob três taxas de deformação na fase plástica – 7mm/min, 600mm/min, 2500mm/min – as quais foram realizadas na máquina de ensaio de tração INSTRON.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. AÇOS**

O aço é uma liga de natureza relativamente complexa e sua definição não é simples, visto que, a rigor os aços comerciais não são ligas binárias: de fato, apesar dos seus principais elementos de liga serem o ferro e o carbono, eles contêm sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação. Nestas condições a definição adotada por CHIAVERINI é a seguinte: “Aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação”.

As propriedades mecânicas dos aços estão intimamente relacionadas com os vários constituintes estruturais, dos quais não se conhecem, na realidade, as verdadeiras características, com a devida precisão (CHIAVERINI, 2008).

Os aços de baixo-carbono (<0,3%C) aliam uma razoável resistência a uma alta ductilidade e excelentes propriedades de fabrico. São estes os aços de construção ou estruturais; utilizados em quantidades muito grandes (90% de todo o aço) (COTTRELL, 1975).

##### **3.1.1. AÇOS-CARBONO ESTRUTURAIS**

Os aços-carbono podem ser classificados da seguinte maneira:

- aços de dureza natural, laminados a quente;
- aços encruados a frio;
- aços “patenting” (ou patenteados).

Ao primeiro grupo – aços de dureza natural – pertencem os aços utilizados pela indústria da construção civil, em concreto armado, classificados pela ABNT (Especificação NBR - 7480) nas categorias CA-25, CA-40, CA-50 e CA-60, com limites mínimos de escoamento de 250MPa, 400MPa, 500MPa e 600MPa, respectivamente. Na designação CAxx, os dois algarismos indicados por xx representam o limite de escoamento mínimo em Kgf/mm<sup>2</sup> (CHIAVERINI,2008)(SILVA e MEI, 2006).

Os aços-carbono estruturais são normalmente fornecidos para atender a requisitos mecânicos. Na maioria das aplicações comuns da engenharia requer aços estruturais de custo moderado e resistência mecânica razoável; tais requisitos são preenchidos satisfatoriamente por estes aços (CHIAVERINI, 2008).

O aço de construção é consumido em enormes quantidades; se a respectiva resistência pudesse ser aumentada, digamos de 10 a 20%, sem



perder tenacidade ao entalhe nem soldabilidade e sem aumentar o seu custo, resultaria daí imensos benefícios econômicos. Por isso têm-se realizado grandes esforços no sentido de se obterem aços de construção com melhores propriedades (COTTRELL, 1975).

### 3.2. SISTEMA DE TRATAMENTO TÉRMICO

#### 3.2.1. STELMOR

O Stelmor é um equipamento que propicia um resfriamento controlado por meio de ar forçado, bastante utilizado para a produção de barras de aço em rolo, pelo fato de ter uma alta produtividade e boa capacidade de homogeneização das propriedades mecânicas ao longo do comprimento da barra. A Figura 2 mostra um desenho esquemático do equipamento Stelmor.

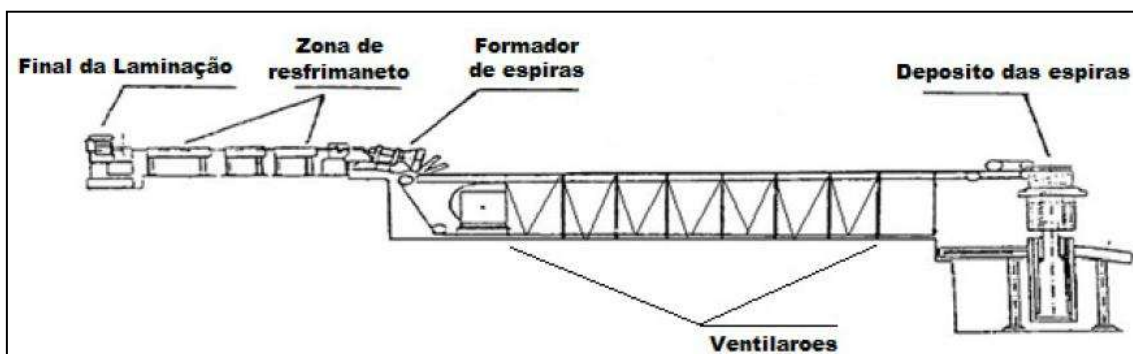
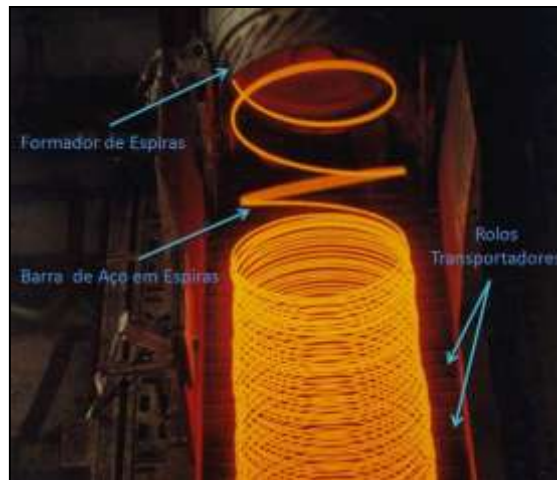


Figura 2. Desenho esquemático do equipamento Stelmor, adaptada de (WAN-HUA, SHAO-HUI, *et al.*, 2009).

No final do processo de laminação, nos trens acabadores, a barra de aço chega a ter temperaturas em torno de 1000°C. Para que possa aplicar o tratamento térmico à barra de aço passa rapidamente através de vários borrifadores de água (zona de refrigeração), que a estabelece uma temperatura específica (750 a 1000°C). Em seguida a barra passa pelo formador de espiras. Estas espiras são transportadas através de rolos transportadores. Logo abaixo destes rolos estão localizados uma série de ventiladores de alta potência que confere a taxa de resfriamento adequada (MORGAN Construction Company, 2007). A Figura 3 mostra uma fotografia do formador de espiras, rolos transportadores e as barras em formato espiral.



**Figura 3. Foto do Stelmor destacando o formador de espiras, os rolos transportadores e as barras em forma de espiras, adaptada de (UGIVIS, 2011).**

O modo de resfriamento rápido inclui ventiladores de alta capacidade localizados abaixo dos rolos transportadores. Estes ventiladores lançam o ar através de câmaras pressurizadas para uma série de bicos que o direcionam para a espira quente sobre o transportador. Dentro da câmara pressurizada, o sistema controla a distribuição do ar em toda a largura do transportador, garantindo um resfriamento uniforme das espiras para que se tenha uma distribuição uniforme das propriedades mecânicas. O alcance de altas taxas de resfriamento é influenciado pelo diâmetro nominal da barra (MORGAN Construction Company, 2007).

### **3.2.2. THERMEX**

O processo denominado de Thermex (Thermal Wave Experiment) é caracterizado por um processo de têmpera e revenimento, utilizando-se da energia térmica das barras de aço, oriunda da laminação a quente, fazendo, em seguida, um resfriamento em um curto intervalo de tempo, menor que 1 segundo, de forma uniforme (Handk-India).

### **3.2.3. TRANSFORMAÇÃO DE FASES**

Pelo método de resfriamento do material, ele irá apresentar uma taxa de resfriamento mais intensa externamente que internamente, podendo ocasionar uma diferença de fases a diferentes profundidades (NETO, M.Q, 2011).

Esta diferença de fases encontradas no material pode fazer com que sua resistência mecânica se modifique, como também as propriedades do material.

Nas figuras Figura 4 a Figura 6 são mostradas essas diferenças de fases encontradas em diferentes profundidades e em diferentes bitolas no processo de refrigeração pelo método Thermex (NETO, M.Q, 2011).

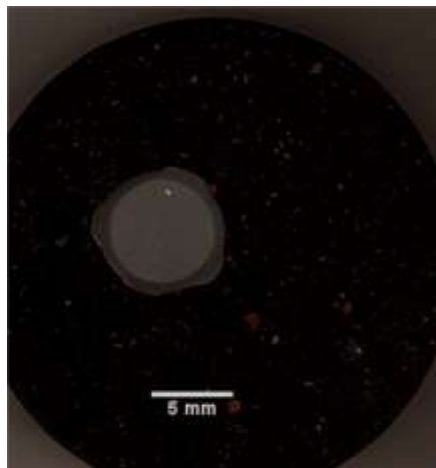


Figura 4. Macrografia do vergalhão de 8 mm (NETO, M.Q, 2011).

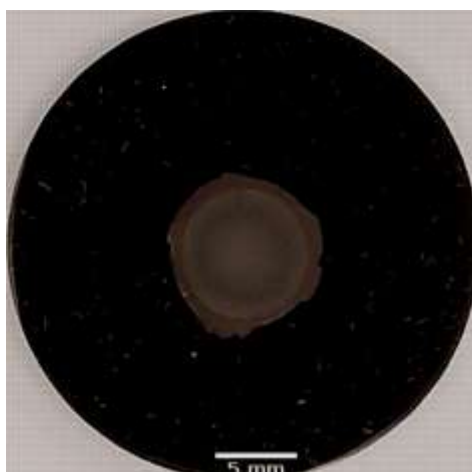


Figura 5. Macrografia do vergalhão de 10 mm (NETO, M.Q, 2011).

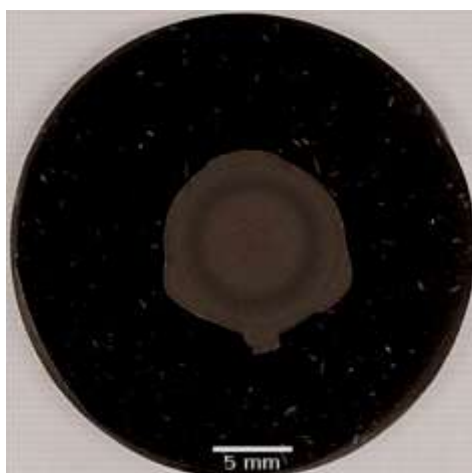


Figura 6. Macrografia do vergalhão de 12,5 mm (NETO, M.Q, 2011).

### 3.3. ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração é um dos mais utilizados no mundo metal-mecânico, tendo em vista a facilidade de execução e a reprodutividade dos resultados. Este ensaio consiste em submeter um material a um esforço que tende a esticá-lo ou alongá-lo. Geralmente, o ensaio é realizado num corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos (SOUZA, 1982).

O corpo de prova é preso pelas suas extremidades nas garras de fixação do dispositivo de testes (ver Figura 7). A máquina de ensaios de tração é projetada para alongar o corpo de prova a uma taxa constante, além de medir contínua e simultaneamente a carga instantânea aplicada (com uma célula de carga) e os alongamentos resultantes. A carga e o alongamento são normalizados de acordo com os seus respectivos parâmetros de tensão de engenharia e deformação de engenharia (CALLISTER, 2007).

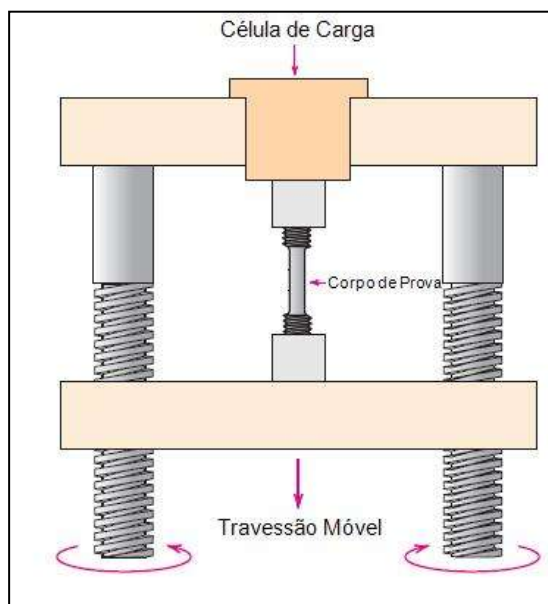


Figura 7. Máquina de tração esquemática (CALLISTER, 2007).

Algumas vezes faz mais sentido utilizar um esquema baseado em tensão verdadeira-deformação verdadeira. A tensão verdadeira é definida como sendo a carga  $F$  dividida pela área de seção reta instantânea  $A$  sobre a qual a deformação está ocorrendo (isto é o pescoço após o limite de resistência a tração). Ademais, ocasionalmente é mais conveniente representar a deformação como uma deformação verdadeira, definida pela expressão (CALLISTER, 2007):

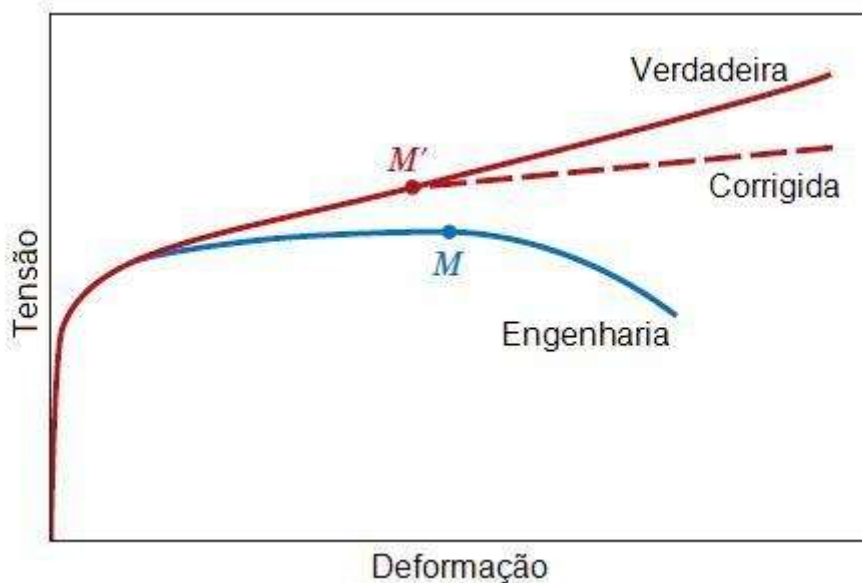
$$\epsilon_v = \ln \frac{l}{l_0}$$

Se não ocorrer alteração no volume durante a deformação, as tensões e deformações verdadeiras e de engenharia estão relacionadas com as expressões (CALLISTER, 2007):

$$\sigma_V = \sigma(1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_V = \ln(1 + \epsilon)$$

Uma comparação esquemática dos comportamentos tensão-deformação de engenharia e verdadeira é feita pela Figura 8. É importante observar que a tensão verdadeira necessária para manter uma deformação crescente continua a aumentar após o limite de resistência à tração  $M'$  (CALLISTER, 2007).



**Figura 8.** Uma comparação entre os comportamentos típicos tensão-deformação de engenharia e tensão-deformação verdadeira em tração (CALLISTER, 2007).

Com o ensaio de tração, pode-se afirmar que praticamente as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em todo o seu corpo, pelo menos até ser atingida uma carga máxima próxima do final do ensaio e, como é possível fazer com que a carga cresça numa velocidade razoavelmente lenta durante todo o teste, o ensaio de tração permite medir satisfatoriamente a resistência do material. A uniformidade da deformação permite ainda obter medições precisas da variação dessa deformação em função da tensão aplicada. Essa variação, extremamente útil para o engenheiro, é determinada pelo traçado da curva tensão-deformação, a qual pode ser obtida diretamente pela máquina ou por pontos (SOUZA, 1982).

### 3.4. CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO (CURVA DE ESCOAMENTO)

A curva tensão-deformação real (ou verdadeira) é chamada frequentemente de curva de escoamento, porque ela fornece a tensão necessária para causar o escoamento plástico do metal a qualquer nível de deformação (DIETER, 1981).

O início da plasticidade é verificado em vários metais e ligas dúcteis, principalmente no caso dos aços de baixo carbono, pelo fenômeno do escoamento. Este fenômeno é um tipo de transição heterogênea e localizada, caracterizado por um aumento relativamente grande de deformação com variação pequena da tensão durante a sua maior parte (DIETER, 1981).

Terminado o escoamento, o metal entra na fase plástica e o ensaio prossegue até ser atingida uma tensão máxima suportada pelo metal, que caracteriza o final da zona plástica (DIETER, 1981).

#### 3.4.1. LIMITE DE ESCOAMENTO

Quando um projeto requer um metal dúctil, onde a deformação plástica deva ser evitada, o limite de escoamento é o critério adotado para a resistência do material. Para aplicações estruturais, desde que as cargas sejam estáticas, as tensões de trabalho são geralmente baseadas no valor do limite de escoamento (SOUZA, 1982).

Para metais dúcteis o início da deformação plástica é indicado por uma queda brusca na carga, apresentando um ponto de escoamento superior ( $\sigma_{es}$ ) e um inferior ( $\sigma_{ei}$ )(ver Figura 9).

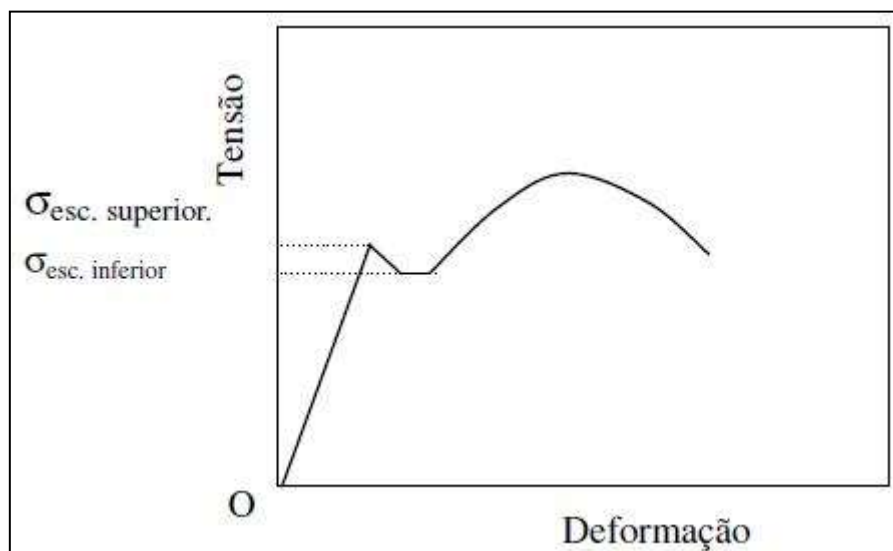


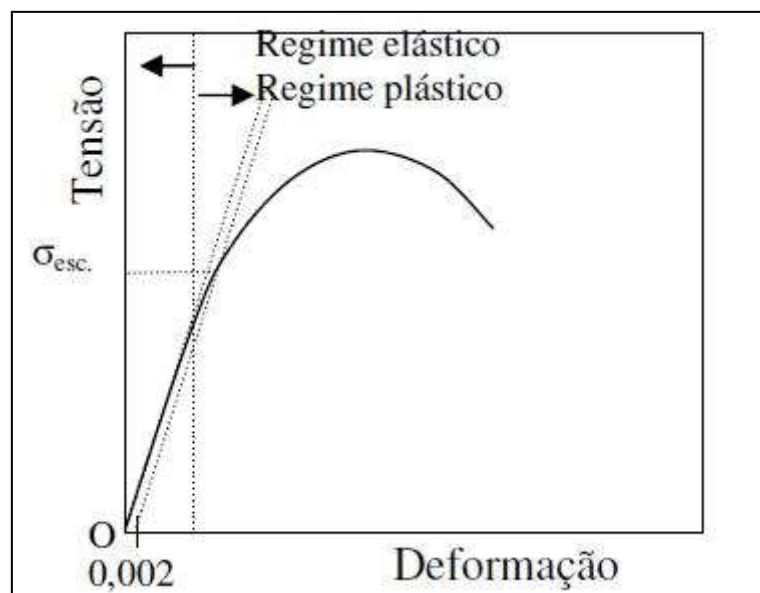
Figura 9. Limite de Escoamento-Superior e Inferior (COSTA, GUTIERREZ, RODRIGUES e SILVA, 2009).

Esses dois limites não são constantes para um determinado metal, mas dependem de diversos fatores como a geometria e condições do corpo de prova, do método de ensaio, da velocidade de deformação e principalmente das características da máquina de ensaio (HALL, 1970) (TEGART, 1966) (JOHNSON, 1968).

A velocidade de deformação é geralmente dada pelos métodos estabelecidos pelas diferentes Associações de Normas Técnicas; quando, porém, se realiza um ensaio de tração para fins de estudo ou pesquisa, essa velocidade pode ser alterada, conforme o caso. Essa velocidade é muito importante e dela dependem alguns resultados numéricos de propriedades mecânicas obtidos pelo ensaio. Em geral, os métodos de ensaio especificam a velocidade em torno de 1 kgf/mm<sup>2</sup>por segundo(COSTA, GUTIERREZ, RODRIGUES e SILVA, 2009).

Quando não for possível determinar precisamente a tensão de escoamento, as normas do ensaio especificam esta tensão como sendo aquela necessária para produzir uma dada quantidade de deformação plástica convencional  $n$  de escoamento. Geralmente o valor de  $n$  é especificado para 0,2% de deformação plástica para ligas metálicas que possuem uma região de plasticidade muito pequena (COSTA, GUTIERREZ, RODRIGUES e SILVA, 2009).

O limite convencional de escoamento de 0,2% é obtido pela intersecção da curva com uma reta, traçada paralela à porção elástica da curva tensão em função da deformação a partir do ponto de deformação 0,2%, o que significa uma deformação plástica de 0,002 (ver Figura 10).



**Figura 10. Limite de escoamento convencional  $n$**  (COSTA, GUTIERREZ, RODRIGUES e SILVA, 2009).

### 3.4.2. LIMITE DE RESISTÊNCIA

O limite de resistência é calculado pela carga máxima atingida no ensaio (ver Figura 11).

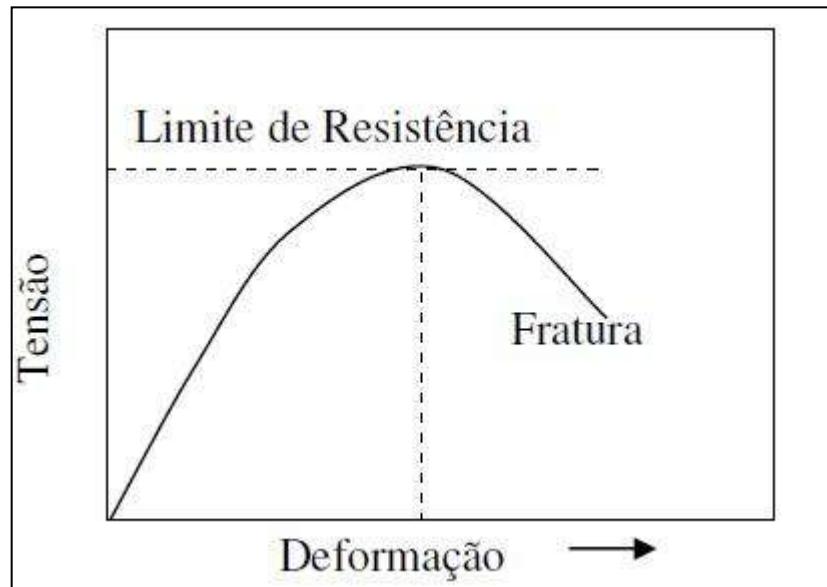


Figura 11. Limite de resistência da curva tensão-deformação (COSTA, GUTIERREZ, RODRIGUES e SILVA, 2009).

Embora o limite de resistência seja uma propriedade fácil de se obter, seu valor tem pouca significação com relação à resistência dos metais dúcteis. Para esses, o valor do limite de resistência dá a medida da carga máxima que o material pode atingir sob a restrita condição de carregamento uniaxial (SOUZA, 1982).

O limite de escoamento hoje em dia é mais usado nos projetos do que o limite de resistência, para os metais dúcteis. Entretanto, o limite de resistência serve para especificar o material, do mesmo modo que a análise química identifica o material. Por ser fácil de se calcular e ser uma propriedade bem determinante, o limite de resistência é especificado sempre com as outras propriedades mecânicas dos metais e ligas (SOUZA, 1982).

### 3.4.3. EFEITO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO NAS PROPRIEDADES DE ESCOAMENTO

A velocidade de deformação que é aplicada no corpo de prova pode ter uma influência importante na tensão plástica. A taxa de deformação é definida como  $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$ , e é convencionalmente expressa em unidades “por segundo”(DIETER, 1981).



A taxa de deformação durante muitos testes de tração estão na extensão de  $10^{-3}$  a  $10^{-2}/s$ . Se após 5 min de realização de um ensaio de tração a deformação produzida foi de 0,3, teremos que a taxa de deformação  $\dot{\epsilon}$  é de  $10^{-3}/s$ . Se a taxa de deformação for de  $\dot{\epsilon} = 10^{-2}/s$  uma deformação de 0,3 ocorrerá em 30s. Para muitos materiais o efeito da taxa de deformação na tensão plástica, à temperatura e deformação constantes, pode ser descrita pela expressão (HOSFORD, 2005 ):

$$\sigma = C \dot{\epsilon}^m$$

onde  $m$  é conhecido como “coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação”. Os níveis relativos de tensão para duas taxas de deformação (medidas pela mesma deformação total) são dados por (HOSFORD, 2005 ):

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

$$\text{ou, } \ln \left( \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) = m \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right)$$

$$\text{onde, } m = \frac{\ln \left( \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)}{\ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1} \right)}$$

Em temperaturas ambiente, os valores de  $m$  para os aços baixo-carbono estão entre 0,010 e 0,015, como mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1. Valores típicos do coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação  $m$ , em temperatura ambiente (HOSFORD, 2005).**

Material	$m$
Aços baixo-carbono	0,010 a 0,015
Aços HSLA	0,005 a 0,010
Aços inoxidáveis ferríticos	0,010 a 0,015
Cobre	0,005
Ligas de titânio - $\alpha$	0,01 a 0,02
Ligas de zinco	0,05 a 0,08

A Figura 12 mostra como se pode determinar o valor do  $m$ . Esse método consiste no trajeto de dois testes de tração contínuos para diferentes taxas de deformação, comparando-se os níveis de tensão com a mesma deformação

fixada. Ambas as curvas contínuas de tensão-deformação das diferentes taxas de deformação podem ser comparadas com a mesma deformação, encontrando-se o valor do  $m$  pela equação (HOSFORD, 2005).

$$m = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)}{\ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}\right)}$$

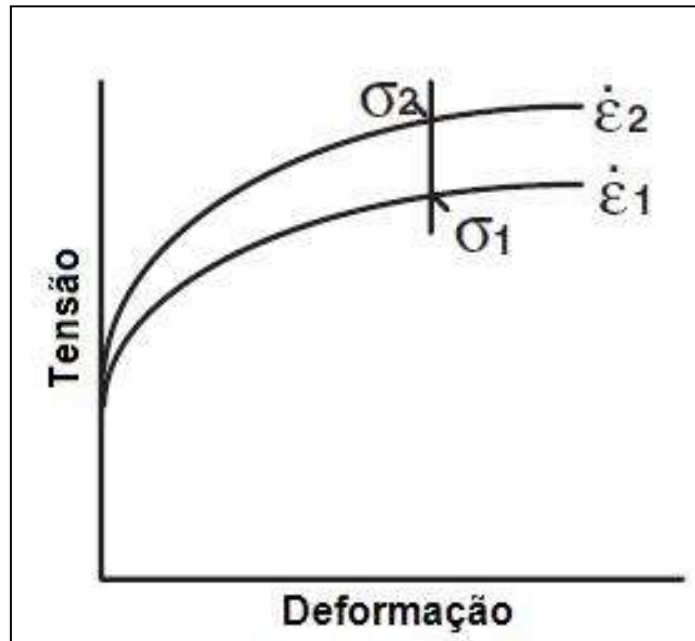


Figura 12. Método de determinação de  $m$  na curva tensão-deformação (HOSFORD, 2005).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho consiste em vergalhões de aço baixo carbono comercial CA-50, com quatro diferentes diâmetros nominais (6,3mm; 8mm; 10mm e 12,5mm), os quais foram submetidos a três condições de resfriamento (Alto, Médio e Baixo) que foram realizados no Stelmor.

Com o objetivo de se obter os Limites de escoamento (LE), Limites de Resistência (LR) e Alongamento (Al), foram realizados 45 ensaios de tração para cada diâmetro nominal, submetidos a três condições de resfriamento, e a três taxas de deformação, totalizando 180 ensaios realizados neste trabalho, como mostra a Tabela 2 abaixo:

**Tabela 2. Ensaios mecânicos realizados para cada taxa de deformação e condição de resfriamentos estudados.**

Taxa de Deformação	Condição de Resfriamento	Diâmetro Nominal / Número de Ensaios			
		6,3mm	8mm	10mm	12,5mm
7 mm/min	Alto	5	5	5	5
	Médio	5	5	5	5
	Baixo	5	5	5	5
600 mm/min	Alto	5	5	5	5
	Médio	5	5	5	5
	Baixo	5	5	5	5
2500 mm/min	Alto	5	5	5	5
	Médio	5	5	5	5
	Baixo	5	5	5	5
<b>Número de Ensaios</b>		45 ensaios	45 ensaios	45 ensaios	45 ensaios
<b>Total (Geral)</b>		180 ensaios			

Os dados obtidos nos ensaios de tração foram usados para a construção de gráficos, utilizando o programa Origin, com a finalidade de mostrar a correlação entre eles.

### 4.1. TRATAMENTO TÉRMICO

Na fabricação dos vergalhões, após a laminação, o material passou pelo Stelmor, que possui vários ventiladores de elevada potência que irão atuar diretamente no tratamento térmico do metal.

Para a condição de tratamento térmico de Alta velocidade de resfriamento, todos os ventiladores do equipamento foram ligados; para o

tratamento térmico Médio, uma quantidade menor dos ventiladores foram ligados e finalmente para o tratamento térmico Baixo, todos os ventiladores foram desligados (resfriamento ao ar livre).

#### 4.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos da Universidade Federal do Ceará-UFC, usando a máquina INSTRON, Figura 13, com a finalidade de se determinar as propriedades mecânicas: LE, LR e AI.



**Figura 13. Máquina de ensaios mecânicos INSTRON (Laboratório de Ensaio Mecânicos da UFC).**

No total, foram ensaiados 180 corpos de prova que, por possuírem seção constante, Figura 14, podem ser ensaiados sem serem usinados (NBR 7480/1996).



**Figura 14. Corpos de prova de diferentes diâmetros nominais usados no ensaio de tração (NETO, J.B.R, 2010).**

Para determinar o alongamento, os corpos de prova foram levemente marcados com traços – 10 mm entre cada marcação –, ver Figura 15, mas com riscos que não influenciaram na ruptura do material. Após o término do ensaio foi feita a medição do comprimento final ( $l_f$ ) que se realizou pegando as duas partes do corpo de prova rompido e unindo-as na mesma posição coaxial do rompimento. O comprimento inicial ( $l_0$ ) foi obtido pela relação:  $l_0 = \varnothing \times 10$ . Quando o valor calculado não foi múltiplo de 10 arredondou-se para o valor mais próximo que seja múltiplo do mesmo.



**Figura 15. Esquema das marcações realizadas para determinação do comprimento final (NETO, J.B.R, 2010).**

As medições do comprimento final ( $l_f$ ) foram realizadas com a utilização de um paquímetro.

O cálculo do alongamento, em percentual, foi obtido utilizando-se a seguinte equação:

$$Al = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100$$

O limite de escoamento e o limite de resistência foram fornecidos pelo software da INSTRON ao final de cada ensaio.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO

As Figuras Figura 16 a Figura 19 mostram os resultados médios com seus devidos desvios padrões para o limite de escoamento, limite de resistência e alongamento para as bitolas de 6,3mm, 8mm, 10mm e 12,5mm, respectivamente. A taxa de ensaio 3/7 indica que a velocidade de ensaio na fase elástica foi de 3mm/min e na fase plástica foi de 7mm/min, as demais taxas seguem também a mesma lógica. Os resultados de cada ensaio de tração podem ser vistos nas tabelas de Tabela 7 a Tabela 18 em anexo.

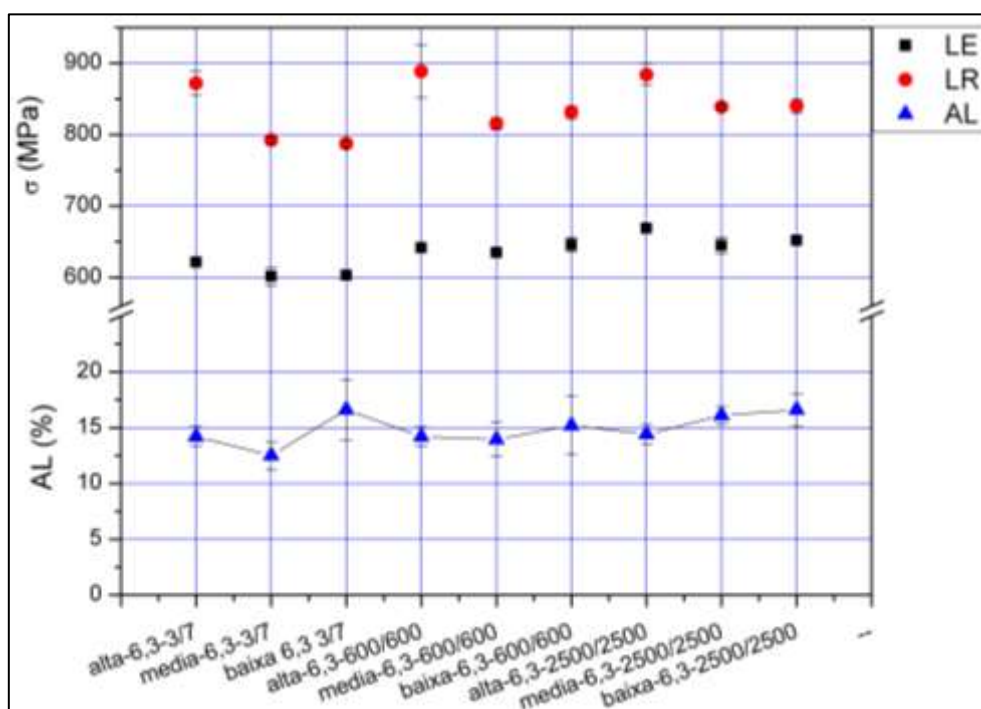
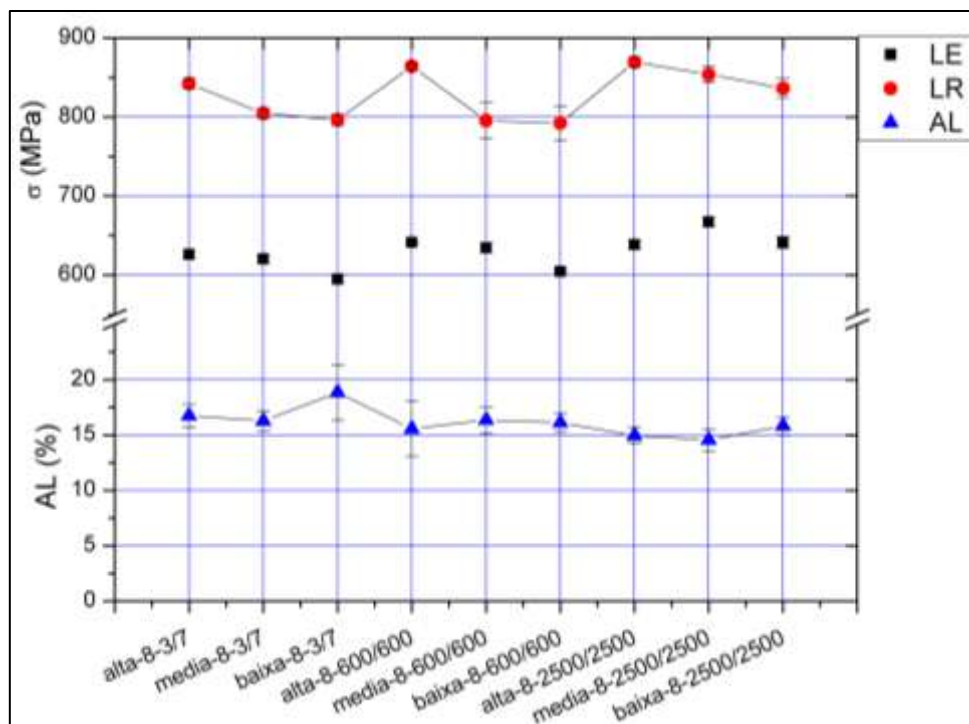


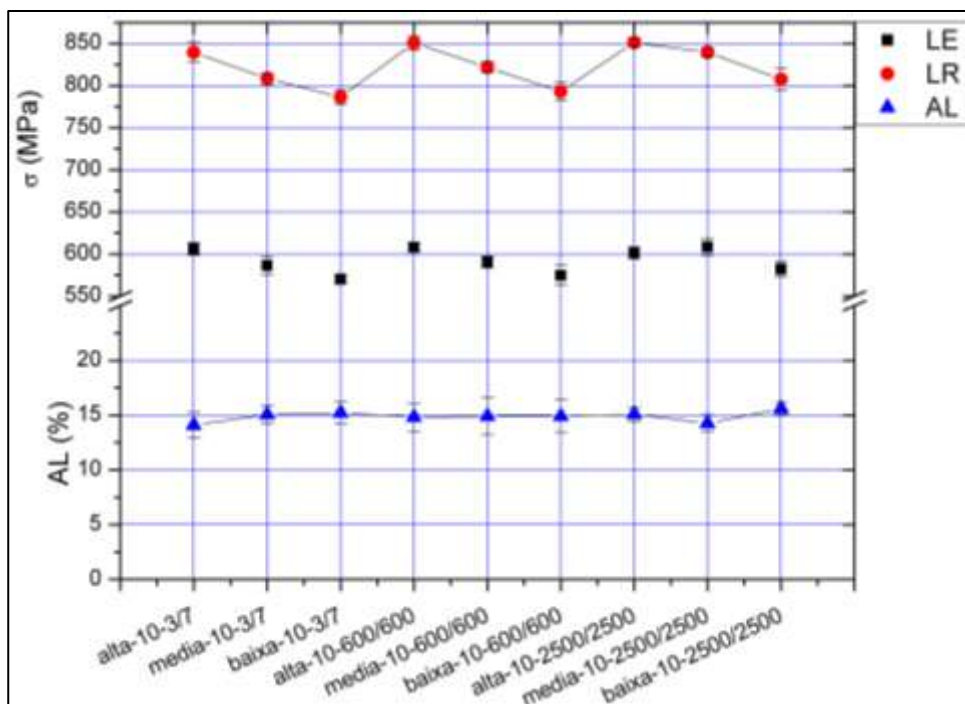
Figura 16. Média com seu desvio padrão dos: limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e alongamento (AL) para a bitola de 6,3 mm nas três condições de resfriamento e três taxas de ensaio.

A Figura 16 mostra que a bitola de 6,3mm apresenta um alongamento praticamente constante. O LE também se apresenta constante para a mesma taxa de ensaio. Já o LR, se a taxa de resfriamento for alta, aumentará a sua resistência mecânica; enquanto nas taxas de resfriamento média e baixa a resistência mecânica é praticamente constante para a mesma taxa de ensaio.



**Figura 17. Média com seu desvio padrão dos: limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e alongamento (AL) para a bitola de 8 mm nas três condições de resfriamento e três taxas de ensaio.**

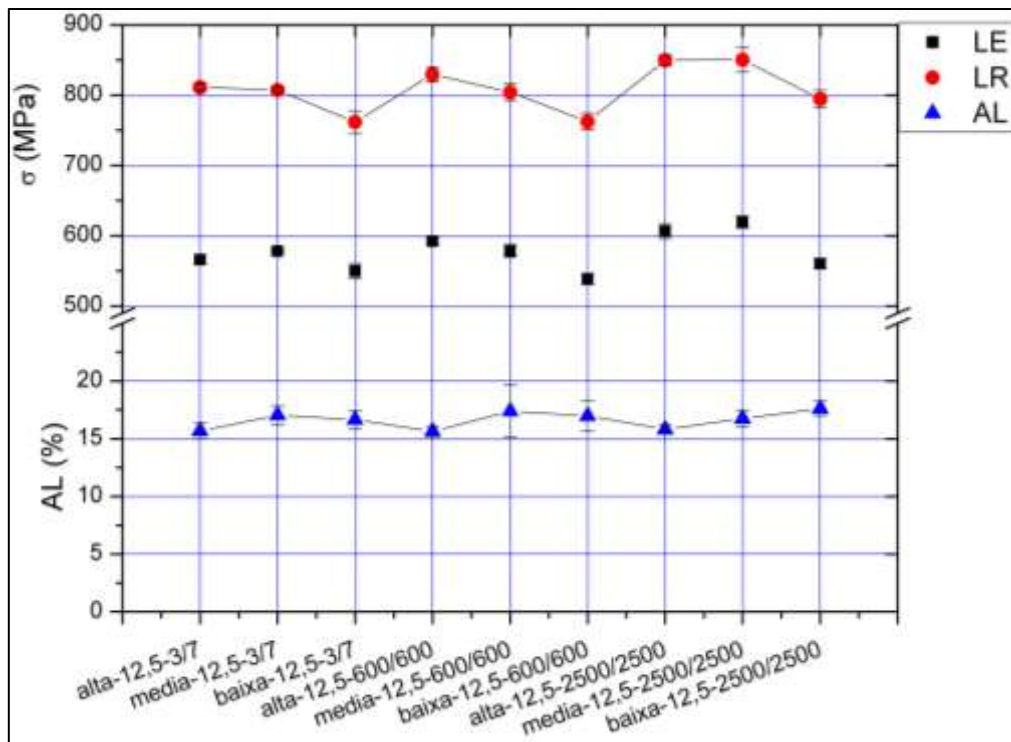
A Figura 17 mostra novamente que a bitola de 8mm apresenta um alongamento praticamente constante. Já no LE, é mostrado que com a redução da taxa de resfriamento, a resistência mecânica apresenta uma pequena redução, com exceção da taxa de 2500mm/min que apresentou um comportamento anômalo. Já no LR, é mostrado que tendo uma taxa de resfriamento alta, resultará em uma maior resistência mecânica e tendo uma taxa de resfriamento média ou baixa, apresentará resultados de resistência mecânica praticamente constantes para a mesma taxa de ensaio.



**Figura 18. Média com seu desvio padrão dos: limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e alongamento (AL) para a bitola de 10 mm nas três condições de resfriamento e três taxas de ensaio.**

A Figura 18 mostra os resultados para a bitola de 10mm. No AL nota-se que praticamente não houve variação. O LE e o LR mostram que com uma taxa de resfriamento mais alta haverá uma maior resistência mecânica, decaindo sutilmente sua resistência de forma praticamente linear com a redução da sua taxa de resfriamento. No LE para a taxa de ensaio de 2500mm/min, nota-se que na taxa de resfriamento alta e média apresentaram resultados praticamente idênticos, tendo uma redução na condição de resfriamento baixo.

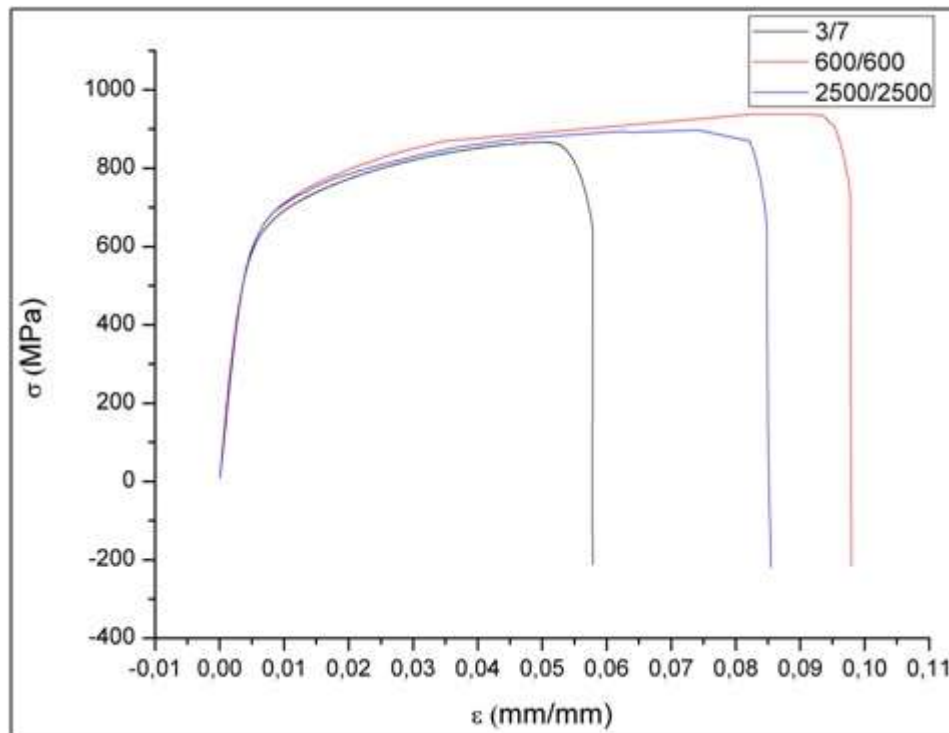




**Figura 19.** Média com seu desvio padrão dos: limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e alongamento (AL) para a bitola de 12,5 mm nas três condições de resfriamento e três taxas de ensaio.

Na Figura 19 são mostrados os resultados dos ensaios de tração para a bitola de 12,5mm. O AL praticamente é constante, não importando sua taxa de resfriamento nem a sua taxa de ensaio. Os resultados para o LE e o LR mostram que tendo-se uma taxa de resfriamento alta ou média, o resultado praticamente não se altera para a mesma taxa de ensaio, já na taxa de resfriamento baixa haverá uma redução da sua resistência mecânica.

A Figura 20 mostra três ensaios de tração do vergalhão de 6,3mm com diferentes velocidades de ensaio.



**Figura 20. Ensaio de Tração de três corpos de prova de 6,3mm em diferentes taxas de ensaio.**

Verifica-se na Figura 20 que o ensaio de tração de 2500 mm/min deveria apresentar valores de tensão maiores que os de 600 mm/min, pois apresentaria uma maior taxa de encruamento do material, ocasionando em maiores resistências mecânicas. Porém, o resultado mostrado não correspondeu com o esperado; com causa provável à elevada taxa de ensaio, que se encontrava no limite operacional do equipamento. Sendo assim, não se conseguiu fazer uma medição confiável. Portanto, os resultados de ensaio de 2500 mm/min foram descartados para dar uma maior credibilidade ao estudo.

Para a bitola de 6,3 mm, a Figura 21 mostra como foram retirados os resultados para o cálculo do coeficiente  $m$ ; a Tabela 3 mostra os valores calculados para  $m$  e a Figura 22 mostra os valores médios encontrados do coeficiente  $m$  com seus devidos erros.

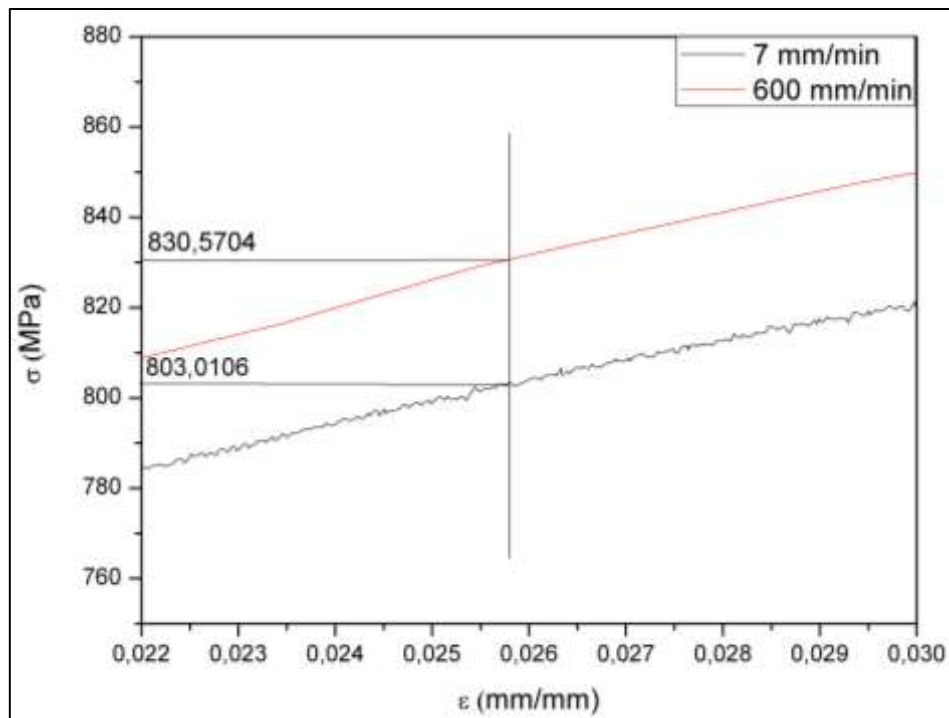


Figura 21. Valores retirados do gráfico tensão/deformação para o cálculo do coeficiente  $m$  para a bitola de 6,3 mm.

Tabela 3. Valores retirados dos ensaios de tração para cálculo do coeficiente  $m$  para a bitola de 6,3 mm.

6,3mm											
Alto				Médio				Baixo			
	Gráfico 7 mm/min (MPa)	Gráfico 600 mm/min (MPa)	$m$		Gráfico 7 mm/min (MPa)	Gráfico 600 mm/min (MPa)	$m$		Gráfico 7 mm/min (MPa)	Gráfico 600 mm/min (MPa)	$m$
1	803,0106	830,5704	0,010660	1	721,5660	750,6048	0,012464	1	711,8565	736,5875	0,010789
2	848,8392	891,8529	0,015616	2	766,5843	802,8475	0,014601	2	714,2391	754,7959	0,017448
3	795,0276	810,9068	0,006248	3	723,0215	744,9036	0,009419	3	705,8712	744,7385	0,016933
4	802,9698	844,2647	0,015843	4	726,1581	753,0621	0,011493	4	709,0235	728,4466	0,008538
5	798,3982	833,4545	0,013575	5	729,8214	756,3902	0,011296	5	804,2849	837,0662	0,012621
		Média	0,012388			Média	0,011855			Média	0,013266
		Desvio Padrão	0,004014			Desvio Padrão	0,001890			Desvio Padrão	0,003868

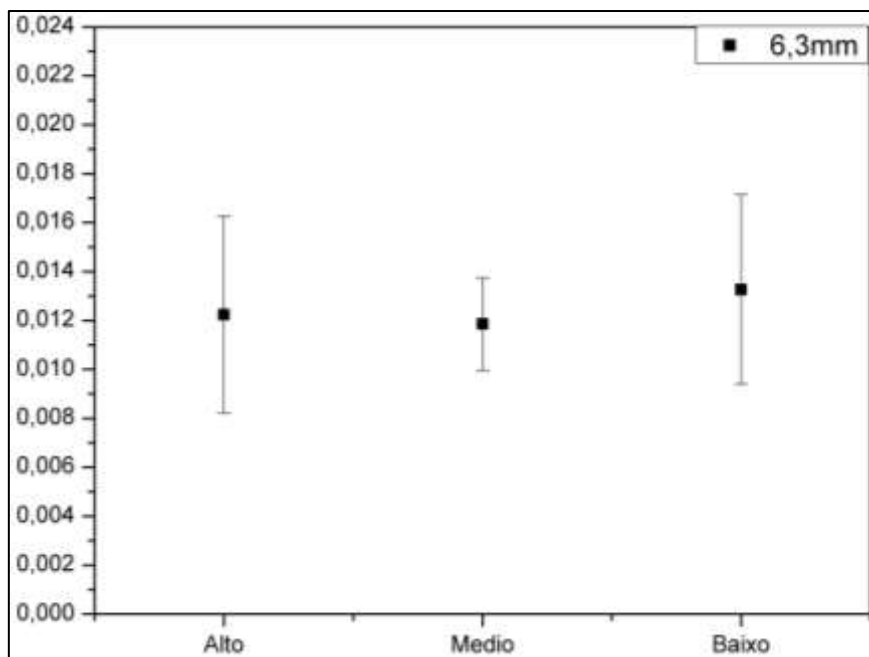


Figura 22. Valores médios com seus erros para o cálculo do coeficiente  $m$  para a bitola de 6,3 mm.

Para a bitola de 8 mm, a Figura 23 mostra como foram retirados os resultados para o cálculo do coeficiente  $m$ ; a Tabela 4 mostra os valores calculados para  $m$  e a Figura 24 mostra os valores médios encontrados do coeficiente  $m$  com seus devidos erros.

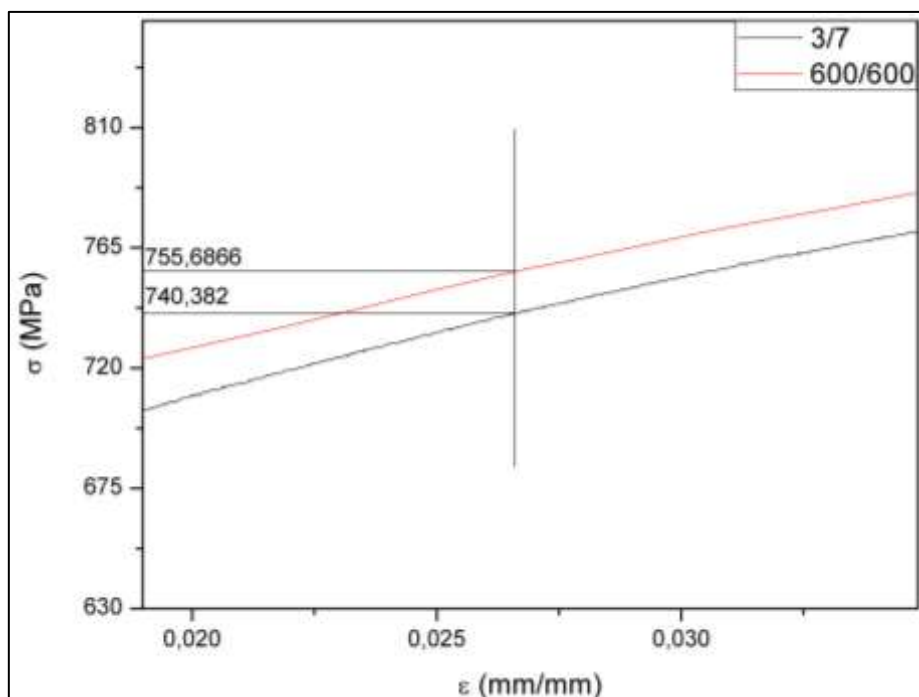
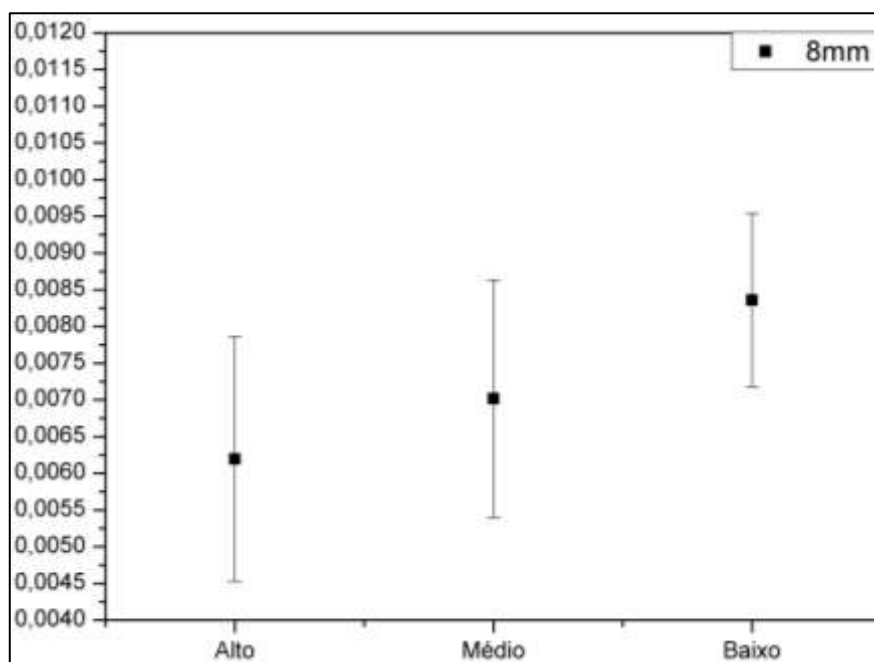


Figura 23. Valores retirados do gráfico tensão/deformação para o cálculo do coeficiente  $m$  para a bitola de 8mm.

**Tabela 4. Valores retirados dos ensaios de tração para cálculo do coeficiente  $m$  para a bitola de 8 mm.**

8 mm											
Alto			Médio			Baixo					
	Gráfico 7 mm/min (MPa)	Gráfico 600 mm/min (MPa)	m		Gráfico 7 mm/min (MPa)	Gráfico 600 mm/min (MPa)	m		Gráfico 7 mm/min (MPa)	Gráfico 600 mm/min (MPa)	m
1	740,382	755,6866	0,006317	1	741,2643	752,5763	0,004676	1	692,2116	711,1046	0,008313
2	745,3822	756,7981	0,004692	2	745,2318	763,4992	0,007476	2	707,3936	728,0961	0,008905
3	768,6596	791,3804	0,008993	3	739,6588	761,7213	0,009074	3	743,9292	759,5673	0,006422
4	768,6644	782,7673	0,005613	4	735,8675	753,838	0,007449	4	646,5104	664,7005	0,008566
5	767,9787	781,4447	0,005366	5	708,7976	723,66	0,006406	5	741,3906	764,766	0,009583
		Média	0,006196			Média	0,007016			Média	0,008358
		Desvio Padrão	0,001668			Desvio Padrão	0,001619			Desvio Padrão	0,001183



**Figura 24. Valores médios com seus erros para o cálculo do coeficiente  $m$  para a bitola de 8 mm.**

Para a bitola de 10 mm, a Figura 25 mostra como foram retirados os resultados para o cálculo do coeficiente  $m$ ; a Tabela 5 mostra os valores calculados para  $m$  e a Figura 26 mostra os valores médios encontrados do coeficiente  $m$  com seus devidos erros.

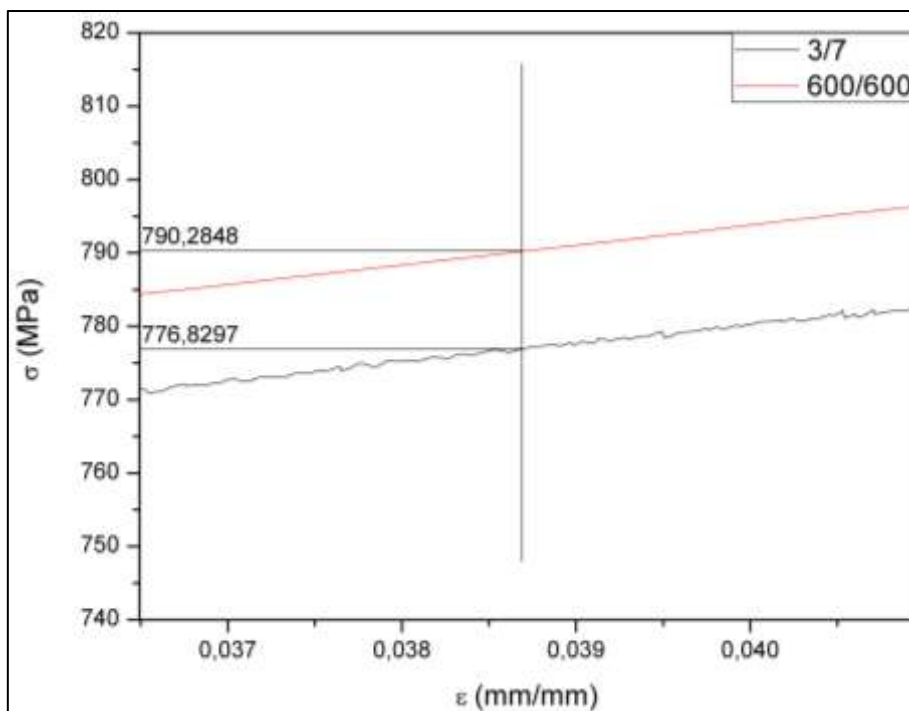


Figura 25. Valores retirados do gráfico tensão/deformação para o cálculo do coeficiente  $m$  para a bitola de 10mm.

Tabela 5. Valores retirados dos ensaios de tração para cálculo do coeficiente  $m$  para a bitola de 10 mm.

10mm											
Alto			Médio			Baixo					
	Gráfico 7 mm/min (MPa)	Gráfico 600 mm/min (MPa)	$m$		Gráfico 7 mm/min (MPa)	Gráfico 600 mm/min (MPa)	$m$		Gráfico 7 mm/min (MPa)	Gráfico 600 mm/min (MPa)	$m$
1	776,8297	790,2848	0,005112	1	807,0905	822,9544	0,005795	1	684,1346	699,5546	0,006636
2	802,0337	818,289	0,005973	2	798,1649	810,6757	0,004630	2	682,5762	701,4229	0,008109
3	727,4534	730,5115	0,001249	3	704,8925	708,0992	0,001351	3	746,2328	790,704	0,017233
4	734,6159	742,6951	0,003256	4	812,4944	820,7029	0,002993	4	776,697	798,8626	0,008377
5	756,146	777,3	0,008214	5	713,5181	722,0324	0,003531	5	694,3263	699,5606	0,002236
		Média	0,004761			Média	0,003660			Média	0,008518
		Desvio Padrão	0,002651			Desvio Padrão	0,001680			Desvio Padrão	0,005458

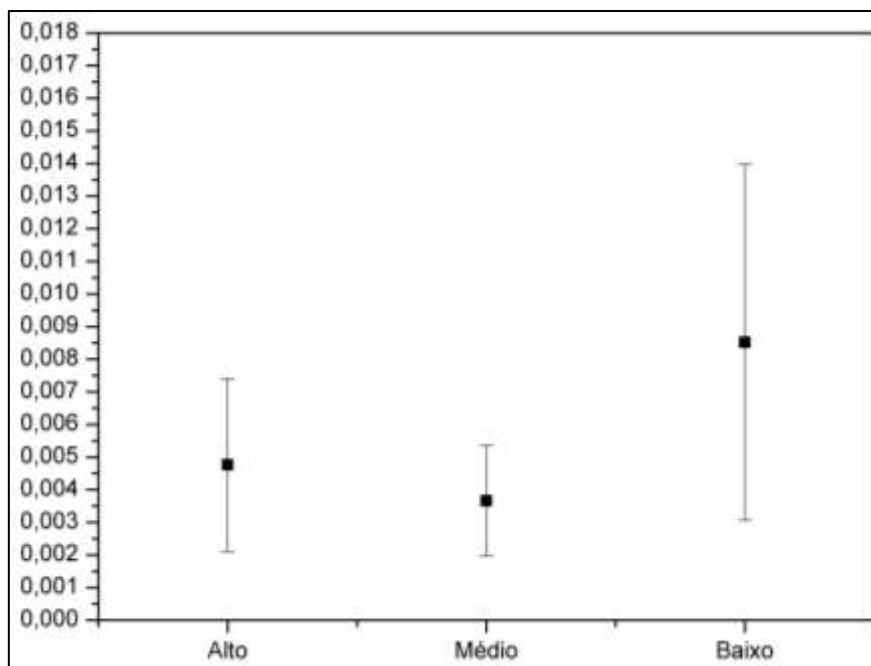


Figura 26. Valores médios com seus erros para o cálculo do coeficiente  $m$  para a bitola de 10 mm.

Para a bitola de 12,5 mm, a Figura 27 mostra como foram retirados os resultados para o cálculo do coeficiente  $m$ ; a Tabela 6 mostra os valores calculados para  $m$  e a Figura 28 mostra os valores médios encontrados do coeficiente  $m$  com seus devidos erros.

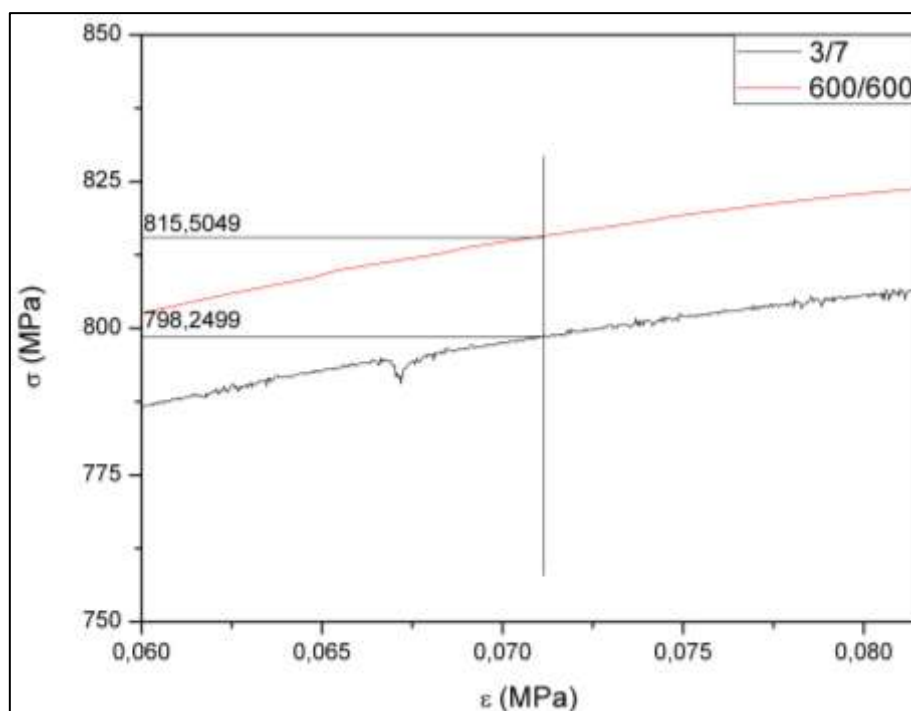
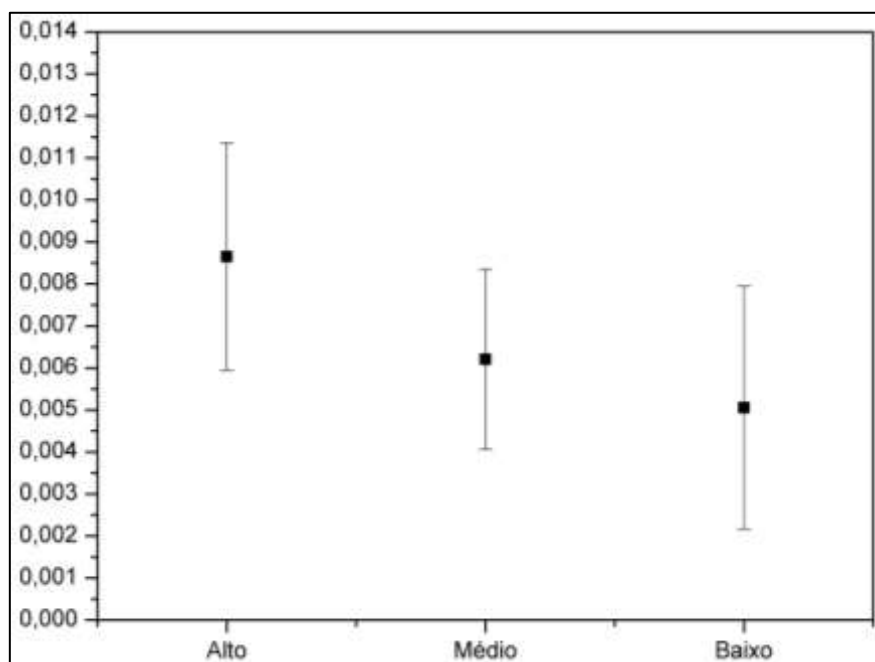


Figura 27. Valores retirados do gráfico tensão/deformação para o cálculo do coeficiente  $m$  para a bitola de 12,5mm.

**Tabela 6. Valores retirados dos ensaios de tração para cálculo do coeficiente  $m$  para a bitola de 12,5mm.**

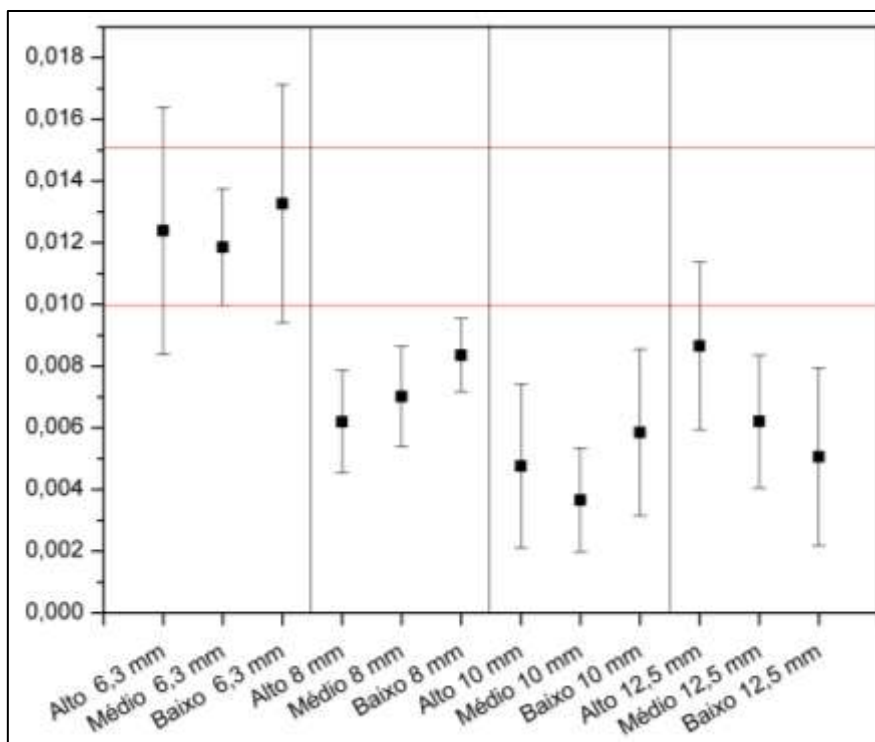
12,5mm											
Alto			Médio			Baixo					
	Gráfico 7 mm/min (MPa)	Gráfico 600 mm/min (MPa)	$m$		Gráfico 7 mm/min (MPa)	Gráfico 600 mm/min (MPa)	$m$		Gráfico 7 mm/min (MPa)	Gráfico 600 mm/min (MPa)	$m$
1	798,2499	815,5049	0,00619	1	763,7107	785,0737	0,00799	1	766,7122	775,0493	0,00313
2	776,3467	810,4758	0,01246	2	783,7234	791,1937	0,00275	2	750,9222	768,9136	0,00686
3	805,3992	827,1811	0,00773	3	792,4354	809,6842	0,00624	3	706,7742	727,7005	0,00845
4	779,6684	808,2553	0,01043	4	761,9824	783,3882	0,00802	4	745,933	749,1578	0,00125
5	788,0099	805,7782	0,00646	5	740,4889	756,0839	0,00604	5	740,614	755,0814	0,0056
		Média	0,00865			Média	0,00621			Média	0,00506
		Desvio Padrão	0,00271			Desvio Padrão	0,00215			Desvio Padrão	0,00288



**Figura 28. Valores médios com seus erros para o cálculo do coeficiente  $m$  para a bitola de 12,5 mm.**

A Figura 29 representa o gráfico com todos os valores do coeficiente  $m$  com seus respectivos erros de todas as bitolas.





**Figura 29. Valores encontrados do coeficiente  $m$  com seus respectivos erros para todas as bitolas em diferentes taxas de resfriamento.**

Levando-se em conta que o coeficiente  $m$  é um valor característico de um material homogêneo, observou-se que os resultados do coeficiente  $m$  não foram iguais para as bitolas de diâmetros diferentes. Isto se dá possivelmente pelas fases presentes no material. Como a bitola de 6,3 mm, por apresentar um menor diâmetro em relação às outras, teve um resfriamento mais brusco por um todo, que ocasionou um material mais homogêneo. Já os vergalhões acima de 8 mm, o tratamento térmico modificou a quantidade de fases presentes no material, que propiciou uma alteração do coeficiente  $m$  para cada bitola. Temos que considerar também que o intervalo de valores de  $m$ , fornecidos pela literatura, para aços baixo carbono (linhas vermelhas – Figura 29) foram obtidos através de ensaios com corpos de provas padrão para ensaios de materiais metálicos, já no presente trabalho os corpos de provas foram ensaiados como produzidos (vergalhões), de acordo com a norma NBR 7480/1996.

## 5.2. COMPROVAÇÃO DOS RESULTADOS

Tendo-se o coeficiente  $m$ , podemos obter matematicamente os resultados de um ensaio de tração a uma taxa menor, realizando-o a uma taxa maior; obtendo-se assim uma redução no tempo de execução dos ensaios.

Como exemplo, temos um ensaio de tração da Figura 30 realizado na taxa de 600 mm/min na bitola de 6,3 mm.

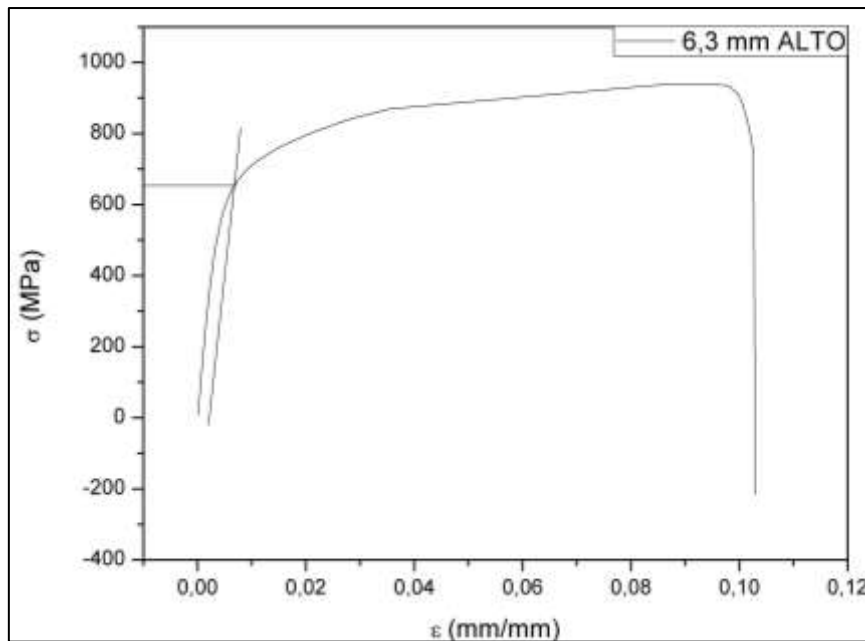


Figura 30. Gráfico de ensaio de tração na taxa de 600 mm/min em um vergalhão de 6,3 mm resfriado a uma taxa alta.

Da Figura 30 foi obtido o valor de  $LE = 650 \text{ MPa}$ .

Da Tabela 3, foi retirado o valor de  $m_{\text{médio}}$ , onde depois foi calculado  $m_1$  que é o  $m_{\text{médio}} +$  desvio padrão e o  $m_2$  que é o  $m_{\text{médio}} -$  desvio padrão, com o intuito de se obter um intervalo de valores possíveis para esta condição.

$$m_1 = 0,016402$$

$$m_{\text{médio}} = 0,012388$$

$$m_2 = 0,008374$$

$$m = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)}{\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1}\right)}$$

Para o cálculo, precisou-se achar o valor de  $\dot{\varepsilon}_1$  e  $\dot{\varepsilon}_2$ , calculado abaixo:

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{\ln \frac{L}{L_0}}{t} = \frac{\ln \frac{670}{70}}{60} = 0,037646$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{\ln \frac{L}{L_0}}{t} = \frac{\ln \frac{77}{70}}{60} = 0,001588$$

O valor do logaritmo natural de  $\frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1}$  é igual a:

$$\ln\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right) = \ln\left(\frac{0,037646}{0,001588}\right) = 3,165751$$

Portanto, temos que:

$$m \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right) = \ln\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)$$

$$3,165751 \cdot m = \ln\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)$$

$$e^{3,165751 \cdot m} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

Para  $m_1$ , temos:

$$e^{3,165751 \cdot 0,016402} = \frac{650}{\sigma_1}$$

$$\sigma_1 = 617,11 \text{ MPa}$$

Para  $m_2$ , temos:

$$e^{3,165751 \cdot 0,008374} = \frac{650}{\sigma_1}$$

$$\sigma_1 = 632,99 \text{ MPa}$$

Portanto, podemos dizer que a tensão do LE em condições de ensaio normal irá variar de 617,11 MPa até 632,99 MPa.

Para provar esse resultado, na Figura 31 está sendo mostrado um gráfico de ensaio de tração a uma taxa de 3/7 mm/min em um vergalhão de 6,3 mm com resfriamento a uma taxa alta.

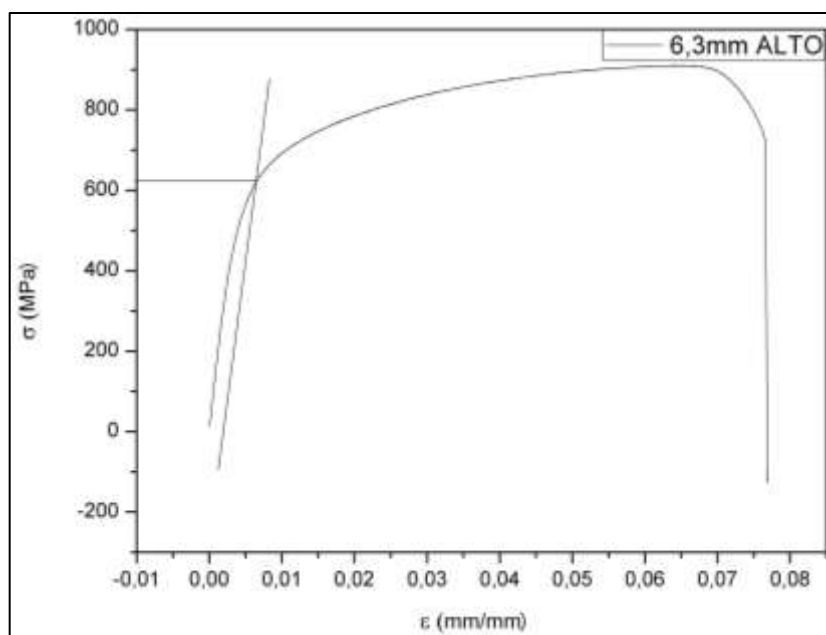


Figura 31. Gráfico de ensaio de tração na taxa de 3/7 mm/min num vergalhão de 6,3 mm resfriado a uma taxa alta.

O resultado retirado do gráfico para o LE é de 624 MPa, provando assim os resultados dos testes realizados.

Para firmar ainda mais o estudo, foi realizado também um teste na bitola de 10 mm na taxa de 600 mm/min, mostrado na Figura 32.

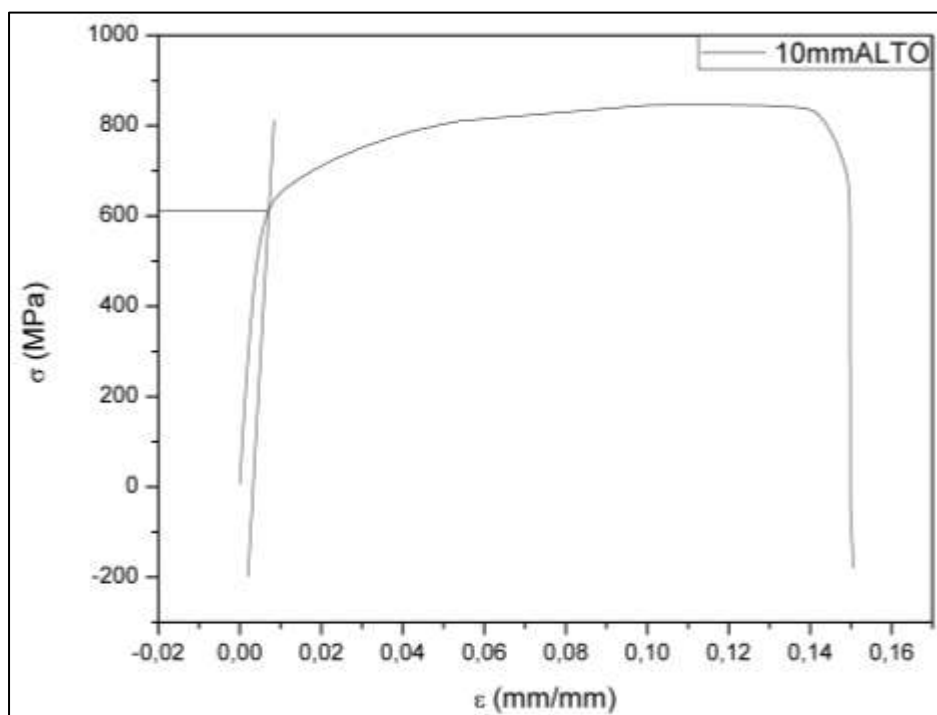


Figura 32. Gráfico de ensaio de tração na taxa de 600 mm/min em um vergalhão de 10 mm resfriado a uma taxa alta.

Da Figura 32 foi obtido o valor de  $LE = 607 \text{ Mpa}$ .

Da Tabela 5, foi retirado o valor de  $m_{m\u00e9dio}$ , onde depois foi calculado  $m_1$  que \u00e9 o  $m_{m\u00e9dio} +$  desvio padr\u00e3o e o  $m_2$  que \u00e9 o  $m_{m\u00e9dio} -$  desvio padr\u00e3o, com o intuito de se obter um intervalo de valores poss\u00edveis para esta condi\u00e7\u00e3o.

$$m_1 = 0,007412$$

$$m_{m\u00e9dio} = 0,004761$$

$$m_2 = 0,00211$$

$$m = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)}{\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1}\right)}$$

Para o c\u00e1lculo, precisou-se achar o valor de  $\dot{\varepsilon}_1$  e  $\dot{\varepsilon}_2$ , calculado abaixo:

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{\ln\frac{L}{L_0}}{t} = \frac{\ln\frac{700}{100}}{60} = 0,032432$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{\ln\frac{L}{L_0}}{t} = \frac{\ln\frac{107}{100}}{60} = 0,001128$$

O valor do logaritmo natural de  $\frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1}$  \u00e9 igual a:

$$\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1}\right) = \ln\left(\frac{0,032432}{0,001128}\right) = 3,35901$$

Portanto, temos que:

$$m \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1}\right) = \ln\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)$$

$$3,35901 \cdot m = \ln\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)$$

$$e^{3,35901 \cdot m} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

Para  $m_1$ , temos:

$$e^{3,35901 \cdot 0,007412} = \frac{607}{\sigma_1}$$

$$\sigma_1 = 592,07 \text{ MPa}$$

Para  $m_2$ , temos:

$$e^{3,35901 \cdot 0,00211} = \frac{607}{\sigma_1}$$

$$\sigma_1 = 602,71 \text{ MPa}$$

Portanto, podemos dizer que a tensão do LE em condições de ensaio normal irá variar de 592,07 MPa até 602,71 MPa.

Para provar esse resultado, na Figura 33 está sendo mostrado um gráfico de ensaio de tração a uma taxa de 3/7 mm/min em um vergalhão de 10 mm com resfriamento a uma taxa alta.

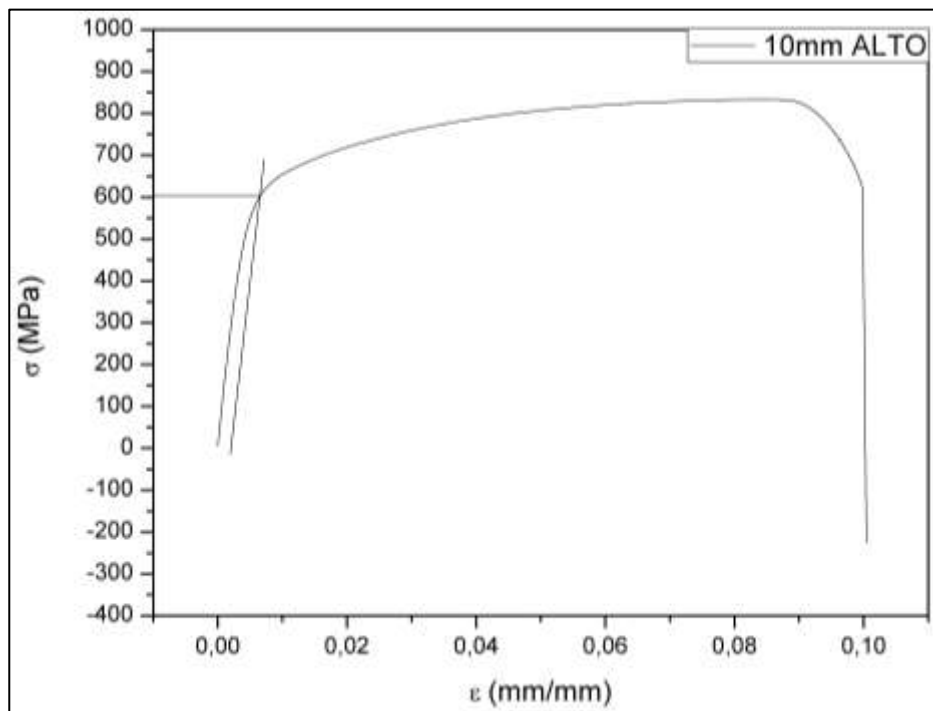


Figura 33. Gráfico de ensaio de tração na taxa de 3/7 mm/min num vergalhão de 10 mm resfriado a uma taxa alta.

O resultado retirado do gráfico para o LE é de 600 MPa, provando assim os resultados dos testes realizados.

## 6 CONCLUSÃO

- 1) Os vergalhões em diferentes diâmetros nominais apresentam propriedades mecânicas distintas, não se podendo fazer uma comparação geral para todas as bitolas, mas uma comparação somente de bitolas de mesmo diâmetro.
- 2) Tendo-se o valor  $m$  de cada diâmetro nominal, podemos realizar ensaios a uma taxa maior e obter os resultados para um ensaio de tração a taxas menores, com resultados confiáveis e significativa redução do tempo de realização dos ensaios.
- 3) Os ventiladores do Stelmor não influenciaram significativamente o valor de  $m$ , mas sim o diâmetro nominal de cada vergalhão; tendo-se assim, um valor geral para cada bitola.

## **7 TRABALHOS FUTUROS**

- 1) Correlacionar os dados dos ensaios de tração com a microestrutura, o diâmetro e o tratamento térmico em vergalhões CA-50
- 2) Fazer análise por outros métodos de resfriamento;
- 3) Fazer análise para taxas menores que 2500 mm/min e para bitolas maiores;



## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARA, M.H. **Princípio da Ciência dos Materiais Aplicados aos Materiais de Construção Civil – PCC5726**, 2006. Disponível em <http://pcc5726.pcc.usp.br/Trabalhos%20dos%20alunos/Trabalho%20PCC5726%20-%20A%C3%A7os%20Estruturais%20-%20Marcos%20Ara.pdf>. Acessado em 10 nov. 2011.

CALLISTER, W. D. **Introdução a Ciência e Engenharia dos Materiais**. 7ª Edição. John Wiley e Sons, Inc., 2007.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª Edição. ABM, 2008.

COSTA A.V; GUTIERREZ J.; RODRIGUES R.M.; SILVA V.D. de P. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. Relatório apresentado à disciplina de: Desgastes Mecânicos de Tecnologia em Manutenção Industrial da Universidade de Mogi das Cruzes, S.P, 2009.

COTTRELL, A.H. **Introdução a Metalurgia**. 3ª Edição. Fundação CalousteGulbenkian,Lisboa,1975.

DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª Edição. Rio de Janeiro. Editora Guanabara Koogan S.A., 1981.

FILHO, C. H. (22 de Dezembro de 2004). Análise da influência da taxa de resfriamento no gradiente microestrutural de barras laminadas a quente tratadas termicamente. Curitiba, Paraná, Brasil.

HALL,E.O.**Yield Point Phenomena in Metals & Alloys**. Macmillan, Londres, Inglaterra,1970.

Handk-India. (s.d.).Disponível em Handk-india: <http://handk-india.tripod.com/id5.html>. Acessado em 16 de janeiro de 2012

HOSFORD,W.F. **Mechanical Behavior of Materials**. Cambridge University Press, 2005.

JOHNSON, R.F. **The Measurement of Yield Stress**. The Iron and Steel Institute, Londres, Inglaterra, 1968.

KEELER, S.P. **Mach. Mag.**,Jul a Setembro,1968.

MARANHÃO FERROPRONTO. Disponível em: <http://www.maranhaofp.com.br/vergalhao.html>. Acessado em 20 de Novembro de 2011.

MORGAN Construction Company. **Site MORGAN Construction Company**, 2007. Disponível em:

<[http://akamai.industry.siemens.com/metalsmining/morgan/rolling\\_mills/pdf/MMG\\_53\\_02\\_v05\\_screen.pdf](http://akamai.industry.siemens.com/metalsmining/morgan/rolling_mills/pdf/MMG_53_02_v05_screen.pdf)>. Acessado em: 08 de Novembro de 2011.

NETO, J. R. B. **Influência da Taxa de Resfriamento e do Diâmetro Nominal da Barra na Microestrutura e nas Propriedades Mecânicas de um Aço Baixo Carbono**. Dezembro, 2010.

NETO, M. Q. **Caracterização microestrutural de diferentes bitolas do aço ca-50 com composição química definida**. Dezembro, 2011.

NBR 7480/1996. [S.I.].

SILVA, A. L. D. C. E.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 2ª Edição. Edgard Blücher, 2006.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais metálicos. Fundamentos Teóricos e Práticos**. 5ª Ed. São Paulo. Ed. Edgard Blücher Ltda, 1982.

TEGART, W. J Mc. Gregor. **Elements of Mechanical Metallurgy**. Macmillian Co. New York, EUA, 1966.

UGIVIS, **Inox Wires e Fasteners**. Disponível em: <http://www.ugivis.eu/en/node/329>. Acessado em 20 de Novembro de 2011.

WAN-HUA, Y. et al. Development and application of online Stelmor Controlled Cooling System. **Applied Thermal Engineering**, Março, 2009.

## 9 ANEXO

Tabela 7. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 6,3 mm na taxa de 3/7 mm/min.

Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
<b>ALTA</b>	6,3	3/7	1	629,5	894,2	14,0
			2	627,21	867,69	13,4
			3	620,39	866,33	13,7
			4	621,05	884,27	13,7
			5	610,63	847,46	16,0
			Média	621,76	871,99	14,2
			Desvio Padrão	6,5707	16,1017	0,9180
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
<b>MÉDIA</b>	6,3	3/7	1	590,89	788,54	10,6
			2	610,99	790,16	12,3
			3	582,93	794,71	12,0
			4	611,26	797,86	13,3
			5	612,29	791,05	14,3
			Média	601,67	792,46	12,5
			Desvio Padrão	12,3208	3,3724	1,2506
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
<b>BAIXA</b>	6,3	3/7	1	604,06	781,96	12,3
			2	601,78	789,77	15,7
			3	605,9	791,42	16,3
			4	608,45	791,73	18,6
			5	597,73	782,2	20,1
652			Média	603,58	787,42	16,6
			Desvio Padrão	3,6549	4,4081	2,6808

Tabela 8. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 6,3 mm na taxa de 600/600 mm/min.

Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
<b>ALTA</b>	6,3	600/600	1	643,83	845,36	13,6
			2	644,61	938,55	15,6
			3	632,49	879,2	14,8
			4	641,68	926,14	13,7
			5	647,37	854,83	13,3
			Média	642,00	888,82	14,2
			Desvio Padrão	5,0900	37,4232	0,8611
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
<b>MÉDIA</b>	6,3	600/600	1	632,74	801,46	14,6
			2	635,82	823,98	16,6
			3	633,55	813,5	13,6
			4	635,1	815	12,1
			5	638,26	821,73	12,9
			Média	635,09	815,13	13,94
			Desvio Padrão	1,9223	7,8921	1,5402
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
<b>BAIXA</b>	6,3	600/600	1	639,5	835,01	16,9
			2	644,39	831,13	12,9
			3	665,34	841,5	18,3
			4	645,44	833,2	16,7
			5	635,54	815,4	11,4
			Média	646,04	831,25	15,2
			Desvio Padrão	10,2820	8,6515	2,6180

Tabela 9. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 6,3 mm na taxa de 2500/2500 mm/min.

Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
<b>ALTA</b>	6,3	2500/2500	1	672	909	13,6
			2	667	880	14,3
			3	672	878	13,4
			4	666	889	15,0
			5	669	864	15,6
			Média	669,20	884,00	14,4
			Desvio Padrão	2,4819	14,8459	0,8588
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
<b>MÉDIA</b>	6,3	2500/2500	1	657	843	17,3
			2	656	838	15,3
			3	642	835	16,4
			4	625	842	15,3
			5	645	841	16,1
			Média	645,00	839,80	16,1
			Desvio Padrão	11,6103	2,9257	0,7538
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
<b>BAIXA</b>	6,3	2500/2500	1	657	850	14,6
			2	654	849	18,3
			3	654	843	17,1
			4	648	832	17,7
			5	648	827	15,0
			Média	652,20	840,20	16,6
			Desvio Padrão	3,6000	9,1957	1,4669

Tabela 10. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 8 mm na taxa de 3/7 mm/min.

Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
ALTA	8	3/7	1	624,21	834,54	17,625
			2	630,05	850,4	16,875
			3	626,14	838,35	15,625
			4	632,02	842,28	17,875
			5	618,09	846,04	15,75
			Média	626,102	842,322	16,75
			Desvio Padrão	5,4402	6,2333	1,0383
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
MÉDIA	8	3/7	1	614,23	808,57	14,875
			2	618,61	803,78	16,375
			3	616,51	810,34	17,125
			4	628,88	805,42	17
			5	623,08	795,36	16
			Média	620,262	804,694	16,275
			Desvio Padrão	5,8181	5,8178	0,9074
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
BAIXA	8	3/7	1	584,73	792,18	23,25
			2	596,35	800,11	18,125
			3	596,26	798,87	18,375
			4	600,24	804,17	17,25
			5	596,35	786,36	17,25
			Média	594,786	796,338	18,85
			Desvio Padrão	5,8723	7,0503	2,5115

Tabela 11. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 8 mm na taxa de 600/600 mm/min.

Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
ALTA	8	600/600	1	642,65	865,78	14,25
			2	638,72	869,66	15
			3	641,56	861,1	14,5
			4	642,14	865,06	20
			5	642	859,86	14,125
			Média	641,414	864,292	15,575
			Desvio Padrão	1,5554	3,9195	2,4962
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
MÉDIA	8	600/600	1	644,07	783,49	16,875
			2	629,1	781,71	15
			3	634,89	833,06	15,75
			4	629,47	777,06	16
			5	633,75	801,52	18,125
			Média	634,256	795,368	16,35
			Desvio Padrão	6,0511	23,0290	1,1970
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
BAIXA	8	600/600	1	608	813,13	16,125
			2	602,05	814,69	17,375
			3	604,78	781,26	15,875
			4	603,04	787,02	16,25
			5	604,51	765,18	15
			Média	604,476	792,256	16,125
			Desvio Padrão	2,2616	21,3333	0,8524

Tabela 12. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 8 mm na taxa de 2500/2500 mm/min.

Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
ALTA	8	2500/2500	1	633,48	864,15	14,75
			2	645,67	873,8	15,475
			3	637,19	877,13	13,7875
			4	641,94	868,86	15,2625
			5	633,36	862,88	15,475
			Média	638,328	869,364	14,95
			Desvio Padrão	5,3952	6,1129	0,7142
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
MÉDIA	8	2500/2500	1	661,35	851,64	14,85
			2	669,51	868,92	15,075
			3	675,05	853,8	14,875
			4	667,66	855,75	15,1125
			5	661,69	839,26	12,825
			Média	667,052	853,874	14,5475
			Desvio Padrão	5,7368	10,5885	0,9700
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
BAIXA	8	2500/2500	1	644,52	843,57	16,65
			2	636,79	821,8	15,3375
			3	631,75	825,87	15,3
			4	649,74	846,18	15,0875
			5	643,55	844,64	16,75
			Média	641,27	836,412	15,825
			Desvio Padrão	7,0392	11,6081	0,8052



Tabela 13. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 10 mm na taxa de 3/7 mm/min.

Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
ALTA	10	3/7	1	603,29	857,42	15,3
			2	613,26	843,67	15,4
			3	598,65	832,03	13,1
			4	613,95	837,25	13,4
			5	600,15	827,14	13,3
			Média	605,86	839,502	14,1
			Desvio Padrão	7,2698	11,7489	1,1467
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
MÉDIA	10	3/7	1	604,34	813,67	16
			2	576,34	809,8	15
			3	585,91	814,32	15
			4	580,8	799,49	15,6
			5	584,34	805,24	13,7
			Média	586,346	808,504	15,06
			Desvio Padrão	10,7107	6,2068	0,8706
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
BAIXA	10	3/7	1	568,86	797,59	14,74
			2	566,22	776,01	15,26
			3	578,46	789,81	14,6
			4	571,54	786,8	14,5
			5	565,08	782,05	17
			Média	570,032	786,452	15,22
			Desvio Padrão	5,3323	8,1220	1,0372

Tabela 14. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 10 mm na taxa de 600/600 mm/min.

Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
ALTA	10	600/600	1	603,89	854,9	14,4
			2	607,98	846,23	15,8
			3	607,98	858,13	16,5
			4	603,29	839,25	14
			5	615,72	856	13,4
			Média	607,772	850,902	14,82
			Desvio Padrão	4,9602	7,9343	1,2892
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
MÉDIA	10	600/600	1	585,73	812,27	16,7
			2	584,07	819,71	12,3
			3	592,14	830,36	14,7
			4	601,35	823,99	16
			5	589,04	822,73	14,8
			Média	590,466	821,812	14,9
			Desvio Padrão	6,8307	6,5978	1,6778
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
BAIXA	10	600/600	1	585,99	797,18	13,1
			2	559,65	785,58	15,4
			3	580,82	803,52	17,1
			4	582,11	801,53	14,8
			5	564,47	778,42	14,1
			Média	574,608	793,246	14,9
			Desvio Padrão	11,7361	10,8194	1,4983

Tabela 15. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 10 mm na taxa de 2500/2500 mm/min.

Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
ALTA	10	2500/2500	1	607,14	846,93	15
			2	605,45	846,73	15,1
			3	597,25	857,17	16
			4	591,5	852,04	15
			5	605,11	852,88	14,3
			Média	601,29	851,15	15,08
			Desvio Padrão	6,6762	4,3980	0,6058
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
MÉDIA	10	2500/2500	1	601,64	834,48	13,68
			2	610,56	836,85	14,87
			3	613,61	843,62	13,3
			4	621,19	847,09	15,17
			5	594,84	836,71	14,28
			Média	608,368	839,75	14,26
			Desvio Padrão	10,3073	5,3450	0,7840
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
BAIXA	10	2500/2500	1	594,92	814,49	14,9
			2	583,32	817,27	15,72
			3	572,06	786,46	16,22
			4	576,69	801,35	15,15
			5	583,6	818,19	15,97
			Média	582,118	807,552	15,592
			Desvio Padrão	8,6336	13,5930	0,5540

Tabela 16. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 12,5 mm na taxa de 3/7 mm/min.

Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
ALTA	12,5	3/7	1	574,55	815,89	15,0
			2	561,83	809,61	15,8
			3	566,83	807,67	16,7
			4	566,44	816,13	15,83333
			5	559,75	806,45	15
			Média	565,88	811,15	15,66667
			Desvio Padrão	5,7089	4,5782	0,6972
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
MÉDIA	12,5	3/7	1	579,13	813,55	16,25
			2	579,13	807,1	17,16667
			3	581,3	803,7	16,66667
			4	574,14	806,57	18,33333
			5	577,26	805,42	16,75
			Média	578,192	807,268	17,03333
			Desvio Padrão	2,6789	3,7458	0,7963
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
BAIXA	12,5	3/7	1	540,37	766,57	17,08333
			2	537,98	742,78	16,66667
			3	548,61	748,8	15,58333
			4	561,53	780,47	17,66667
			5	560,37	770,51	16,25
			Média	549,772	761,826	16,65
			Desvio Padrão	10,9472	15,6360	0,7936

Tabela 17. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 12,5 mm na taxa de 600/600 mm/min.

Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
ALTA	12,5	600/600	1	588,2	824,06	15
			2	587,16	847,5	16,16667
			3	591,83	820,47	15,41667
			4	598,61	828,44	15,83333
			5	595,51	826,65	15,75
			Média	592,262	829,424	15,63333
			Desvio Padrão	4,8364	10,5398	0,4433
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
MÉDIA	12,5	600/600	1	578,2	806,35	20
			2	572,37	788,66	17,16667
			3	587,44	821,5	16
			4	567,33	804,91	14,58333
			5	586,28	799,61	19,16667
			Média	578,324	804,206	17,38333
			Desvio Padrão	8,6996	11,9056	2,2264
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
BAIXA	12,5	600/600	1	548,19	776,5	15,25
			2	536,55	755,91	17,83333
			3	535,19	759,95	15,91667
			4	528,06	747,19	17,5
			5	544,58	773,23	18,41667
			Média	538,514	762,556	16,98333
			Desvio Padrão	7,9783	12,2009	1,3403

Tabela 18. Valores do LE, LR e AI para a bitola de 12,5 mm na taxa de 2500/2500 mm/min.

Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
ALTA	12,5	2500/2500	1	588,96	837,75	15,91667
			2	608,56	846,23	15,33333
			3	616,32	857,42	16,33333
			4	615,34	851,54	15,83333
			5	603,23	855,32	15,58333
			Média	606,482	849,652	15,8
			Desvio Padrão	11,1486	7,8962	0,3755
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
MÉDIA	12,5	2500/2500	1	631	877	17,5
			2	619	844	16,66667
			3	609	830	17,41667
			4	623	858	16,25
			5	615	843	15,83333
			Média	619,4	850,4	16,73333
			Desvio Padrão	8,2946	17,8690	0,7250
Condição	Diâmetro Nominal	Taxa (mm/min)		LE (MPa)	LR (MPa)	AI(%)
BAIXA	12,5	2500/2500	1	562	786	18,5
			2	560	795	16,91667
			3	551	779	17,16667
			4	559	802	17,5
			5	569	810	17,91667
			Média	560,2	794,4	17,6
			Desvio Padrão	6,4576	12,3410	0,6275