



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MAURO ÂNGELO OLIVEIRA DE ALFAIA

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE AMOSTRAS DE PRODUTOS DA  
INDÚSTRIA SIDERÚRGICA PARA VERIFICAÇÃO DE SUAS  
ESPECIFICAÇÕES**

Marabá  
2011

MAURO ÂNGELO OLIVEIRA DE ALFAIA

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE AMOSTRAS DE PRODUTOS DA  
INDÚSTRIA SIDERÚRGICA PARA VERIFICAÇÃO DE SUAS  
ESPECIFICAÇÕES**

Trabalho apresentado à FEMAT  
(Faculdade de Engenharia de  
Materiais), da Universidade Federal  
do Pará, para conclusão do curso de  
graduação em Engenharia de  
Materiais.

MAURO ÂNGELO OLIVEIRA DE ALFAIA

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE AMOSTRAS DE PRODUTOS DA  
INDÚSTRIA SIDERÚRGICA PARA VERIFICAÇÃO DE SUAS  
ESPECIFICAÇÕES**

Trabalho apresentado à FEMAT  
(Faculdade de Engenharia de  
Materiais), da Universidade Federal  
do Pará, para conclusão do curso de  
graduação em Engenharia de  
Materiais.

Data de aprovação: 24 de junho de 2011

Banca Examinadora:

\_\_\_\_\_ - Orientador  
Prof. Márcio Paulo de Araújo Mafra FEMAT-UFPA

\_\_\_\_\_  
Prof. Msc. Luis Fernando Nazaré Marques FEMAT-UFPA

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr Lucinewton Silva de Moura FEMMA-UFPA

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS, do qual todas as coisas dependem.

Aos meus pais, por terem me concebido ao mundo e assim oportunizando-me este momento .

A faculdade de Engenharia de Materiais - FEMAT da UFPA pelo curso de Graduação.

Aos colaboradores do laboratório de ensaios destrutivos.

A meus amigos que me ajudaram com os dias e noites de estudos.

A todos os Professores que contribuíram para minha formação profissional.

A minha filha Lethycia Ângela Neves Alfaia, por seu amor sincero e inocente e por mostrar que a renovação faz parte da vida. Você é a alegria da minha vida!

A Kelvia Alfaia, minha doce companheira, pelo apoio despretensioso, pela compreensão das minhas falhas, pela cumplicidade incondicional, pela luz que me guia, por ser minha inspiração e acima de tudo pelo amor mais intenso que jamais sonhei existir.

“Nada fiz de merecedor, todas as minhas realizações foram inteiramente as tuas ações” (Rei David para Deus).

## RESUMO

A siderurgia teve um grande crescimento como consequência do desenvolvimento da construção civil nos últimos anos no Brasil. E, com a grande demanda dos produtos siderúrgicos, como o vergalhão para concreto armado, e com a crescente concorrência na oferta de tal produto, cada vez mais se faz necessário um produto de boa qualidade que atenda as exigências desse mercado. Neste sentido, este trabalho se propôs a estudar as características mecânicas de amostras de vergalhão de três fabricantes, A, B e C, com o objetivo de verificar como tais produtos se comportam diante do ensaio de tração e do ensaio de microdureza, para que a partir dos diagnósticos feitos pudesse ser avaliado qual produto possui melhores propriedades mecânicas para construção civil. Para tanto, foi escolhido de cada fabricante amostras de vergalhão de SAE 1024 CA-50 de 8 mm. Essas amostras foram usinadas para o ensaio de tração e embutidas, lixadas e polidas para o ensaio de microdureza. Com os resultados dos ensaios, montaram-se gráficos e tabelas que serviram de ferramentas comparativas para os produtos dos três fabricantes. Tanto na microdureza quanto na tração o produto do fabricante C mostrou desempenho superior ao dos outros dois. Ainda no ensaio de tração, o produto do fabricante B foi o único que apresentou valores abaixo dos patamares prescritos na norma NBR 7480.

Palavras – Chaves: Aço. Vergalhão de Aço. Tração. Microdureza.

## **ABSTRACT**

The steel industry has greatly increased as a result of the development of civil construction in recent years in Brazil. And with the huge demand of steel products such as rebar for reinforced concrete, and the growing competition in the provision of such a product, increasingly it is necessary to a good quality product that attend to the requirements of that market. Thus, this study shows the mechanical characteristics of samples of three rods manufacturers, A, B and C, in order to see how these products behave before the tensile test and microhardness test, so that the from the diagnoses could be assessed which product has better mechanical properties for civil construction. To do so, was chosen from each manufacturer of rebar samples of SAE 1024 CA-50 8 mm. These samples were machined to the tensile test and embedded, ground and polished to microhardness testing. With the test results, to set up graphs and tables that served as a comparative tool for products from three manufacturers. Both the hardness and tensile in the manufacturer's product C showed better performance than the other two. Also in the tensile test, the manufacturer's product B was the only one who showed values lower than those prescribed in the NBR 7480.

**Keywords:** Steel. Rebar Steel. Tensile. Microhardness

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de funcionamento do alto forno .....	15
Figura 2 - Forno elétrico a arco tradicional com furo de corrida submerso (a) e detalhes da etapa de vazamento com furo submerso e com calha (c) .....	17
Figura 3 – Lingotamento contínuo.....	19
Figura 4 - Esquema de laminação.....	21
Figura 5 - Evolução da produção brasileira de aço bruto desde 1980 a 2008. Adaptado Abracave (1980a 1997) e IBS (1998 A 2009).....	29
Figura 6 - Produção anual de vergalhão para construção civil de 2001 a 2006. Adaptado IBGE (2009). .....	30
Figura 7 – Barra submetida a esforço de tração.....	32
Figura 8 – Curva tensão-deformação de um metal ou liga.....	33
Figura 9 – Corpos de prova para ensaio de tração. ....	36
Figura 10– Ângulo de tangentes à esfera, para a relação $d/D = 0,375$ na Dureza Brinell.....	37
Figura 11 – Penetrador e impressão Vickers .....	38
Figura 12 - (a) Impressão perfeita de dureza Vickers; (b) impressão defeituosa; “afundamento”; (c) impressão defeituosa; “aderência” .....	39
Figura 13 - Projeto do corpo de prova para ensaio de tração .....	43
Figura 14 - Corpos de prova: (a) para o ensaio de tração e (b) para o ensaio de microdureza .....	43
Figura 15 - Ensaio de tração.....	45
Figura 16 - Microdurômetro MHV2000. ....	46
Figura 17 - Distribuição das indentações ao longo da secção transversal do corpo de prova no ensaio de microdureza vickers .....	46
Figura 18 - Resultado médio dos ensaio de tração das amostras do fabricante A .....	48
Figura 19 - Resultado médio dos ensaio de tração das amostras do fabricante B....	48
Figura 20 - Resultado médio dos ensaios de tração das amostras do fabricante C..	49
Figura 21 - Grafico comparativo das curvas dos ensaios de tração dos três fabricantes .....	50
Figura 22 - Grafico de microdureza das amostras do fabricante A.....	51

Figura 23 - Grafico de microdureza de amostra do fabricante B .....	52
Figura 24 - Grafico de microdureza de amostras do fabricante C .....	53
Figura 25 - Grafico de microdureza de amostras dos fabricantes A, B e C.....	54



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre o processamento, microestrutura e propriedades dos aços.....	23
Tabela 2 – Resultados do ensaio de tração para amostras dos fabricantes A, B e C.....	47

## SUMÁRIO

RESUMO.....	4
ABSTRACT .....	5
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
2.1 GERAL.....	12
2.2 ESPECÍFICOS .....	12
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>13</b>
3.1 AÇO.....	13
3.1.1 Definição .....	13
3.1.2 Processo Produtivo .....	14
3.1.3 Produção no Forno Elétrico à Arco .....	15
3.1.4 Laminação .....	20
3.2 CONTROLE DE QUALIDADE .....	21
3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS.....	21
3.3.1 Classificação normativa .....	22
3.3.2 Classificação quanto ao processamento.....	23
3.3.3 Classificação Quanto à Microestrutura .....	24
3.3.4 Classificação Quanto à Composição Química .....	25
<b>3.3.5 Classificação Quanto as Propriedades .....</b>	<b>27</b>
3.3.6 Classificação Quanto a Aplicação.....	27
3.4 AÇOS ESTRUTURAIS .....	27
3.4.1 Vergalhão para Concreto .....	28
3.4.2 Vergalhão de aço auto-revenido.....	30
3.5 ENSAIOS MECÂNICOS EM METAIS .....	31
3.5.1 Ensaio de Tração.....	31
3.5.1.1 Aspectos Gerais .....	31
3.5.1.2 Ensaio de tração convencional .....	32
3.5.1.2.1 Tensão e deformação na tração.....	32
3.5.1.2.2 Propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de tração convenci onal.....	31
3.5.1.2.3 Corpo de prova.....	34
3.5.2 Dureza Vickers.....	36
3.5.2.1 Vantagens do ensaio Vickers .....	38
3.5.2.2 Anomalias que podem ocorrer .....	39

3.5.2.3 Microdureza por penetração .....	39
3.5.2.4 Cuidados a serem tomados na microdureza .....	40
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>41</b>
4.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	41
4.1.1 Materiais .....	41
4.1.2 Equipamentos .....	42
4.2 CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS.....	39
4.3 ENSAIOS DE TRAÇÃO .....	44
4.4 MICRODUREZA VICKES (HV) .....	45
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>47</b>
5.1 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	47
5.2 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS .....	50
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento da construção civil na última década acelerou o consumo de materiais desse seguimento. Com isso, muitas empresas entraram nesse tão aquecido mercado, fazendo com que a grande concorrência disponibilize nesse mercado uma grande variedade de tais produtos, como os vergalhões para concreto armado, porém nem sempre de qualidade.

Como matéria fundamental desse mercado, os vergalhões para concreto armado devem obedecer a padrões de qualidade que possam garantir confiabilidade aos projetos a que são destinados. No entanto, nesse contexto, “o problema é que no mercado de construção civil brasileiro não há garantias ao consumidor de que os fabricantes e construtores atendam as condições mínimas de processos de produção que assegurem qualidade e segurança aos consumidores” (FERRAZ, 2005).

Contudo, é natural que os consumidores não saibam sobre a conformidade de seus vergalhões para concreto armado com as normas brasileiras vigentes, já que as características desse tipo de produto são governadas pelo modo com que foram conduzidas as etapas de sua produção; e, a simples checagem da etiqueta do produto no que se referem as suas especificações, não seria suficiente. É preciso que se tenham alguns recursos de laboratórios de ensaios para uma análise das propriedades e estrutura desse produto.

Frente a essa problemática, é que esse trabalho sugere uma minuciosa investigação, por via de caracterização mediante ensaios mecânicos destrutivos e não destrutivos tais como os ensaios de tração e microdureza Vickers, utilizando como corpos-de-prova amostras de vergalhões para concreto armado CA50, previamente preparados para tais atividades, de diâmetro 8 mm, produzidos e cedidos por três fabricantes fornecedores da região de Marabá, do seguimento da construção civil, para fins de confirmar se seus produtos estão dentro de uma faixa de segurança que satisfaça a ABNT NBR-7480/2007, norma brasileira que garante a qualidade dos aços para construção civil.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 GERAL

Analisar a conformidade de vergalhões para construção civil com as normas brasileiras posteriormente aos resultados obtidos nos ensaios de ensaios de Tração, Microdureza .

### 2.2 ESPECÍFICOS

- Realizar pesquisa bibliográfica como base para produção deste trabalho;
- Coletar amostras de três fabricantes de vergalhão do tipo CA-50, de 8 mm de diâmetro;
- Confeccionar corpos de prova para o ensaio de tração e microdureza Vickers;
- Realizar os ensaios de tração e microdureza Vickers;
- Comparar os resultados obtidos para uma posterior avaliação do comportamento do produto de cada fabricante diante dos ensaios.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 AÇO

##### 3.1.1 Definição

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 contem sempre outros elementos secundários, presentes devido aos processos de fabricação. Nestas condições, “os aços podem ser definidos como sendo ligas de ferro-carbono contendo geralmente 0,008%, até aproximadamente 2,11% de carbono, chamado aço-carbono ou liga ferro-carbono, além de certos elementos residuais, resultante do processo de fabricação” (MEI e SILVA, 2010); ou aço-liga que contem outros elementos de liga ou elementos residuais acima dos teores considerados normais.

Os aços são um tipo de material metálico utilizado na confecção de peça (engrenagem, eixo, parafuso, porcas rolamentos, etc.), ferramentas (Pás, martelo, serras e matrizes) ou estruturais (pontes, edifícios e tanques). Com isso, pode-se dizer que o principal motivo do ferro ser o elemento mais consumido no mundo é pelo fato de ser utilizado na fabricação de aços (e também dos ferros fundidos).

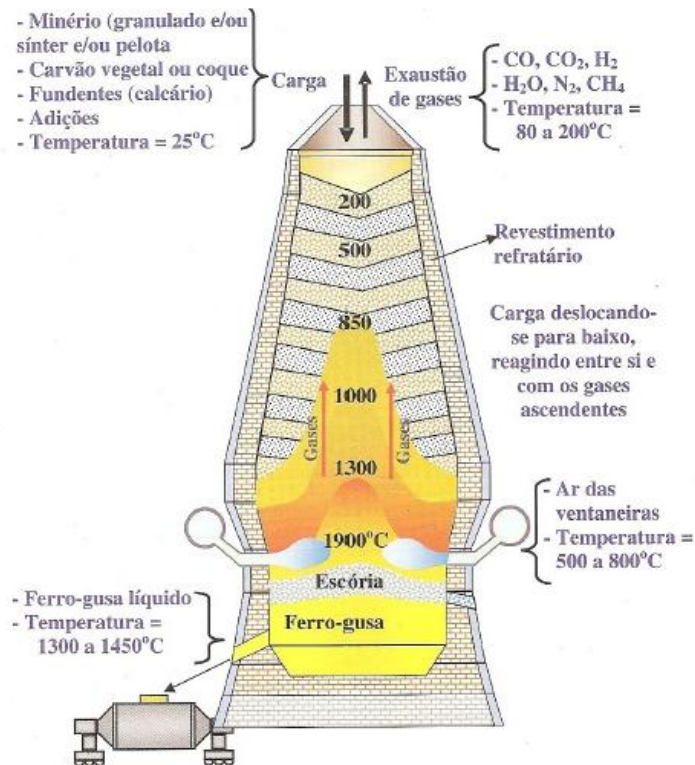
A grande gama de aplicação do aço se deve à facilidade de sua obtenção, aliado a grande versatilidade das propriedades que se pode obter a partir de pequenas mudanças nas suas propriedades químicas (CHIAVERINI, 2003), tratamento térmico e/ou processamento e, principalmente pela elevada ductilidade aliada à grande tenacidade e elevada dureza.

Um dos principais motivos que levaram ao tardio uso do ferro no Brasil (e conseqüentemente do aço) foram as altas temperaturas, necessárias para sua fabricação, e que encareciam seu processo de fabricação, dificultando tanto a popularização quanto a comercialização. Para definirmos o que é aço, partiremos de seu processo de fabricação, a partir do minério de ferro, sua matéria prima.

### 3.1.2 Processo Produtivo

A usina siderúrgica é a empresa responsável pela transformação do minério de ferro em aço, de maneira que ele possa ser usado comercialmente. Este processo tem o nome de Redução. Primeiramente, o minério – cuja origem básica é o óxido de ferro (FeO) – é aquecido em fornos especiais (alto fornos), em presença de carbono (sob a forma de coque ou carvão vegetal) e de fundentes (que são adicionados para auxiliar a produzir a escória, que, por sua vez, é formada de materiais indesejáveis ao processo de fabricação), (FERRAZ, 2005). O objetivo desta primeira etapa é reduzir ao máximo o teor de oxigênio da composição FeO. A partir disso, obtém-se o denominado ferro-gusa, que contém de 3,5 a 4,0% de carbono em sua estrutura. Como resultado de uma segunda fusão, tem-se o ferro fundido, com teores de carbono entre 2 e 6,7%. Após uma análise química do ferro, em que se verificam os teores de carbono, silício, fósforo, enxofre, manganês entre outros elementos, o mesmo segue para uma unidade da siderúrgica denominada aciaria, onde será finalmente transformado em aço. O aço, por fim, será o resultado da descarbonatação do ferro gusa, ou seja, é produzido a partir deste, controlando-se o teor de carbono para no máximo 2%. O que temos então, é uma liga metálica constituída basicamente de ferro e carbono, este último variando de 0,008% até aproximadamente 2,11%, além de certos elementos residuais resultantes de seu processo de fabricação. O limite de 0,008% de carbono está relacionado à sua máxima solubilidade no ferro à temperatura ambiente (solubilidade é a capacidade do material de se fundir em solução com outro), enquanto que o segundo - 2,11% - à temperatura de 1148°C (CHAVERINI, 1977) .

**Figura 1** - Esquema de funcionamento do alto forno



Fonte: RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira

### 3.1.3 Produção no Forno Elétrico à Arco

Muitas usinas siderúrgicas, que usam fornos elétricos a arco, utilizam como matéria prima básica na fabricação do aço a sucata, devido ao seu menor custo, maior disponibilidade, e por ser reciclável.

A utilização de sucata gera um produto final de melhor desempenho na construção civil. Os elementos químicos residuais normalmente existentes em maior porcentagem na sucata, tais como níquel, cromo e estanho, entre outros, fazem com que se obtenham materiais com características mecânicas mais altas quando comparados com aços provenientes da matéria-prima minério de ferro.

A sucata recebida é separada por tipo (pesada, leve, cavaco de aço, cavaco de ferro, chaparia) e armazenada em locais específicos. A sucata é



devidamente preparada para utilização, sendo que as de menor densidade são enviadas para prensagem, aumentando, assim, seu peso específico e melhorando o rendimento energético do forno elétrico de fusão. Outros elementos além da sucata também são usados, tais como:

- a) Ferro gusa: cujo processo de obtenção foi mencionado acima.
- b) Ferroligas: (ferro manganês, ferro silício-manganês, ferro silício etc.) utilizados para ajuste da composição química do aço e conferir as características mecânicas necessárias.
- c) Cal: atua como escorificante, retendo as impurezas do metal e formando a escória, e também atuando na proteção do refratário do forno contra ataques químicos.
- d) Oxigênio: utilizado para reduzir o teor de carbono do aço e diminuir o tempo de fusão, sendo esta uma fonte de calor para o processo.

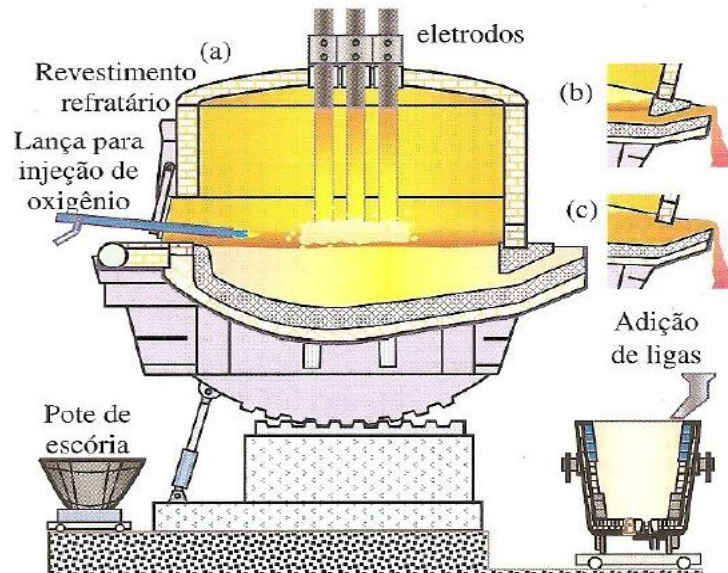
A transformação da sucata em aço, na forma de tarugos prontos para laminar, é feita na Aciaria onde estão localizados os equipamentos: Forno Elétrico e/ou Panela e Máquina de Lingotamento Contínuo. O forno elétrico responde pela transformação das matérias-primas em aço líquido e o lingotamento contínuo por transformar aço líquido em tarugo.

A primeira etapa de fabricação é o carregamento do forno. Sucata, gusa e outras matérias-primas são colocadas em grandes recipientes denominados cestões.

A proporção dos materiais usado é referente à cada tipo de aço a ser fabricado. O carregamento é realizado através da abertura da abóboda do forno, com movimento no sentido horizontal, e da abertura inferior do cestão.

É nesta etapa que é gerado o número da corrida que acompanhará o produto até o término de fabricação, cujo número serve para a sua rastreabilidade.

**Figura 2** - Forno elétrico a arco tradicional com furo de corrida submerso (a) e detalhes da etapa de vazamento com furo submerso e com calha (c)



**Fonte:** RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira

Terminada a operação de carregamento, a abóboda é fechada e o forno ligado. Os eletrodos de grafite, ligados à energia elétrica, são abaixados e se aproximam da sucata. Através da passagem de corrente elétrica é formado um arco elétrico que gera energia térmica e funde a sucata e os outros materiais. A temperatura do aço líquido atinge o valor aproximado de 1.600 °C. Após a fusão é feito um primeiro acerto na composição química. O aço líquido é vazado para uma panela e enviado ao Forno Panela, equipamento este utilizado para homogeneizar temperatura e composição química do aço líquido e eliminar impurezas.

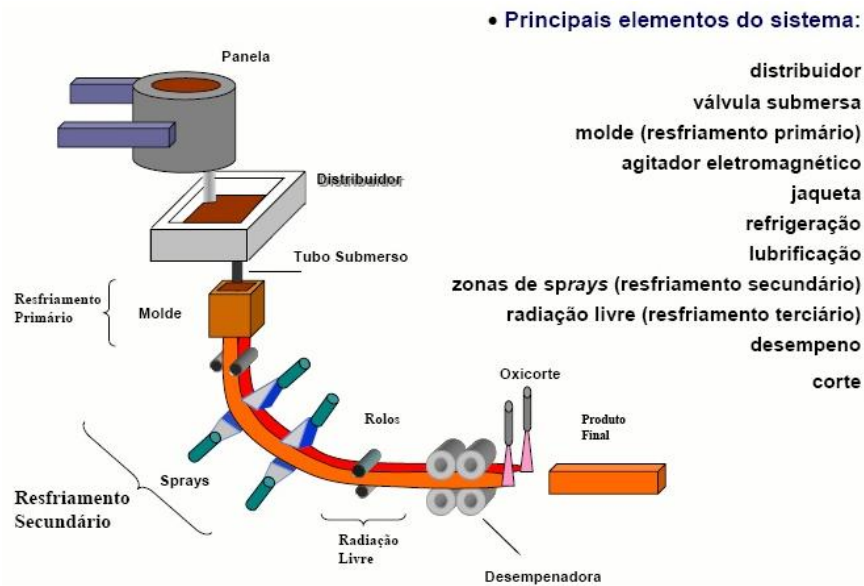
No Forno Panela são retiradas amostras e enviadas ao laboratório químico para análise. A amostra tem sua superfície lixada para torná-la plana, e é colocada em um Espectrômetro Óptico de Emissão. Este aparelho, acoplado a um computador, analisa a amostra e determina a composição química simultânea de, no

mínimo, 14 elementos. Do recebimento de cada amostra até a saída do resultado final da análise são gastos 3 minutos (RIZZO, 2005).

Através de meio eletrônico o laboratório notifica os resultados da análise para o forno, onde os técnicos processam os ajustes necessários na composição química. Novas amostras podem ser enviadas para análise química até a obtenção de produto que obedeça às especificações químicas estabelecidas. O aço líquido pronto é transferido para a etapa final do processo da aciaria, que é o lingotamento contínuo, onde são produzidos os tarugos, barras de aço com seção quadrada e comprimento de acordo com a sua utilização. A panela de aço líquido é içada sobre o lingotamento, e é aberta a válvula existente em sua parte inferior para a transferência do material para o distribuidor e deste para as lingoteiras de seção quadrada dos veios do lingotamento.

As lingoteiras são de cobre e refrigeradas externamente com água. Nelas tem início o processo de solidificação do aço, através da formação de uma fina casca sólida na superfície do material. Após a passagem pela lingoteira existe a câmara de refrigeração, onde é feita a aspersão de água diretamente sobre a superfície sólida e ainda rubra do material, auxiliando a solidificação do mesmo até o núcleo.

**Figura 3 – Lingotamento contínuo**



**Fonte:** SANTOS, Carlos A. dos, 2005

Durante a solidificação do material um mecanismo que trabalha com movimento de oscilação (vai e vem) injeta óleo nas paredes internas da lingoteira e faz com que o material solidificado não cole nas suas paredes e siga até o rolo extrator. A seguir o material é cortado em comprimento de acordo com as necessidades da laminação, dando origem aos tarugos. O corte é feito por tesouras ou por maçarico. Após o corte os tarugos seguem para o leito de resfriamento.

No leito de resfriamento os tarugos passam por inspeção, para verificação dimensional (arestas, romboidade, tortuosidade) e defeitos superficiais (trincas, bolhas etc.).

Após aprovação os tarugos são identificados com o número da corrida e armazenados, de forma a impedir mistura ou enfiados a quente na laminação para aproveitamento de sua temperatura.

No processo de laminação os tarugos são colocados no forno de reaquecimento e aquecidos a uma temperatura de aproximadamente 1.200 °C. No

interior do forno de reaquecimento um êmbolo empurrador os direciona através da boca de entrada para dentro do forno.

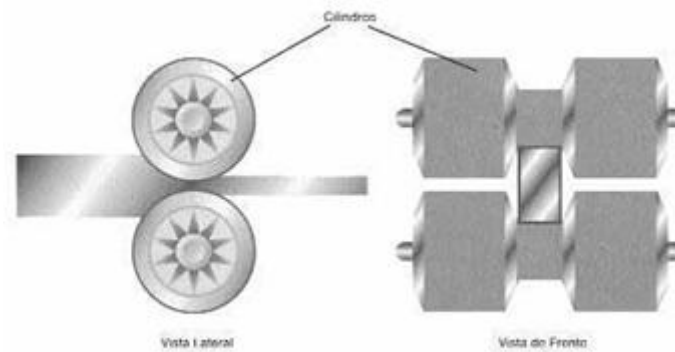
No caminho em direção à boca de saída, os tarugos recebem calor dos queimadores. O tempo de permanência dentro do forno varia de 30 minutos à 1 hora, dependendo do tarugo ter sido enornado a quente ou a frio.

Ao atingirem a boca de saída, um êmbolo lateral empurra o tarugo aquecido para fora do forno e uma calha transportadora o direciona ao laminador. O processo de laminação é dividido em três etapas: desbaste, preparação e acabamento.

Os tarugos entram no trem desbastador onde são pressionados, sucessivamente, entre cilindros, sofrendo redução em sua seção, com o conseqüente aumento de comprimento. Do desbaste o tarugo segue para o trem preparador através de uma calha transportadora. No trem preparador novos desbastes são realizados e o tarugo começa a adquirir o formato de barra laminada

#### **3.1.4 Laminação**

A laminação pode dar origem a produtos em barras e em rolos. As barras são cortadas por uma tesoura mecânica, ou seguem para uma bobinadeira para formação dos rolos. Os rolos podem ser comercializados neste formato, ou destinados às endireitadeiras, onde são transformados em barras retas que são posteriormente comercializadas em feixes retos ou dobrados. No caso de barras de aço, estas seguem para o leito de resfriamento, onde perdem o calor naturalmente, em contato com o ar do ambiente.

**Figura 4 - Esquema de laminação**

**Fonte:** BELGO, 2008

### 3.2 CONTROLE DE QUALIDADE

Durante todo o processamento do material são executados controles para verificar as medidas do produto nos passes intermediários, e retirada de amostras para verificação de peso por metro (massa linear), diâmetro, medidas de nervuras e ausência de defeitos superficiais, tais como riscos de laminação, dobras e esfoliações.

No Laboratório de Ensaio Mecânicos as amostras são ensaiadas segundo normas e especificações do produto. São verificados: conformação superficial das barras, ou seja, tamanho das nervuras, distância entre elas e altura. Em seguida os corpos de prova são medidos e pesados para a verificação da massa linear. Nestes corpos de prova são realizados ainda ensaios mecânicos em máquina universal de tração para determinação das tensões de escoamento e de ruptura, do alongamento e verificação da ductilidade através do ensaio de dobramento.

### 3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

Dada a grande variedade de tipos de aço foram criados sistemas de classificação de acordo com suas características, os quais são periodicamente

submetidos a revisões, tais como: composição, processo de acabamento e forma do produto acabado. Há também subdivisões desses tipos de aços, como aço-carbono com baixo médio e alto teor de carbono. Os aços-ligas são frequentemente classificados pelo principal ou principais elementos de liga presente.

### 3.3.1 Classificação normativa

O critério de identificação de um aço adotado no Brasil é a que considera a composição química dos aços, como o usado pela *American Iron and Steel Institute* - AISI e pela *Society of Automotive Engineers* - SAE. Nesse sistema, as letras XX ou XXX corresponde à cifras AISI-SAE, classe 1023 significa aço carbono com 0,23% de carbono em média e na designação UNS, a classe G10230, significa o mesmo teor do carbono. Por outro lado os dois primeiros algarismos diferenciam os vários tipos de aços entre si, pela presença única do carbono como elemento de liga, ou de outro elemento de liga, tal como níquel, cromo etc., além do carbono.

Os aços em alto teor em liga, como os inoxidáveis, refratários, para ferramentas, etc., são classificados de acordo com a norma *Deutsches Institut für Normung e.V.* (em português: Instituto Alemão para Normatização) - DIN 17100 que classifica os aços para construção em geral, por exemplo, em função de seu limite de resistência à tração. Assim a designação St 42 corresponde a um aço com limite de resistência à tração 42 e 50 Kgf/mm<sup>2</sup> (410 a 490 MPa).

Já a norma DIN 17200, classifica de acordo com a composição química, como por exemplo C 35 significa aço-carbono médio de 0,35%.

No Brasil, a Associação Brasileira de normas técnicas - ABNT, por intermédio das normas NBR 6006 classifica os aços-carbono e os de baixo teor em liga segundo os critérios adotados pela AISI e SAE.

De acordo com a norma 6006 da ABNT, os aços-carbonos são assim chamados quando os teores de silício e manganês não ultrapassam os teores de

0,6% (Si) e 1,65% (Mn). Neles, podem ainda ser especificados teores máximo de 0,1% de alumínio, teor mínimo de boro de 0,0005%, teor máximo de cobre de 0,3% ou ainda um teor máximo de chumbo de 0,35%. Se forem adicionados outros elementos como selênio, telúrio, e bismuto, para melhorar as características de usinabilidade dos aços, esse ainda são considerados aços-carbono, do mesmo modo que o aço com adição de nióbio.

Ainda de acordo com a ABNT, os aços-liga são aços em que possuem outros elementos de liga, não se considerando como tais os elementos adicionados para melhorar sua usinabilidade. A soma desses elementos, inclusive carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre não podem ultrapassar 6%.

No caso dos elementos silício, manganês e alumínio, sempre presentes nos aços-carbono, os aços serão considerados ligados quando seus teores ultrapassarem 0,6%, 1,65% e 0,1% respectivamente.

### **3.3.2 Classificação quanto ao processamento**

Por processamento entende-se como o tipo de operação que executa sobre o aço visando mudar sua forma ou sua estrutura.

Os processamentos que visam impor uma forma são: a conformação mecânica, a fundição e a consolidação por sinterização. Assim existem aços trabalhados (a quente ou a frio), fundidos ou sinterizados.

Os processamentos que visam alterar a estrutura são os tratamentos térmicos, tais como, recozimento, recristalização, normalização, coalescimento e têmpera.



**Tabela 1** – Relação entre o processamento, microestrutura e propriedade dos aços.

<b>PROCESSAMENTO</b>	<b>MICROESTRUTURA</b>	<b>PROPRIEDADES</b>
<b>Trabalho a frio</b>	Encruada (alta densidade de discordâncias) Grãos alongados (orientados)	Elevada resistência Baixa ductilidade Grande anisotropia
<b>Trabalho a quente</b>	Recristalizada (baixa densidade de discordâncias) Grãos refinados e equiaxiais Ausência de tensões residuais	Moderada resistência Elevada ductilidade Moderada anisotropia
<b>Fundido</b>	Estrutura dentrítica Grãos colunares e equiaxiais Baixa densidade de discordâncias Presença de segregações Presença de tensões residuais Presença de porosidade (em muitos casos)	Baixa resistência Moderada ductilidade Moderada anisotropia
<b>Sinterizado</b>	Recristalizada (baixa densidade de discordâncias) Heterogeneidade química Presença de poros	Baixa resistência Baixa ductilidade Moderada anisotropia

### 3.3.3 Classificação Quanto à Microestrutura

Essa classificação é típica da Metalurgia, temos:

- a) Aços Encruados: Esses aços são geralmente de estrutura predominantemente ferrítica, com um pouco de perlita, sendo resultado do processo de conformação à frio, normalmente são aços com baixo teor de carbono (inferior à 0,4%).

- b) Aços Ferríticos-Perlíticos: obviamente esse tipo de aço possui um teor de carbono abaixo de 0,8% (hipoeutetoide), resultantes de processos em que houve resfriamento lento.
- c) Aços Martensíticos: aços constituído de martensita revenida são próprios de situações onde se necessita de alta resistência ao longo de toda secção transversal; já os martensíticos com carbonetos são próprios de situações onde se requer alta resistência ao desgaste.
- d) Aços Bainíticos: Sob determinadas combinações de dureza e resistência a estrutura bainítica proporciona maior tenacidade que a martensítica, tornando tais aços preferíveis em condições onde se espera resistência associada à tenacidade.
- e) Aços Austenítico: Uma vez que a austenita não constituinte estável à temperatura ambiente, sua estabilização depende da presença de elementos de liga, tais como cromo e manganês. Como a austenita não possui propriedades magnéticas, é indicada para situações em que se deseja minimizar os efeitos de campos magnéticos induzidos, tais como suportes de bússolas. Além disso a austenita quando estabilizada pelo manganês pode se transformar em martensita mediante ao impacto.
- f) Aços Dúplex: Esses aços costumam ser divididos em Austenítica-Ferrítico, onde se encontram certos aços inoxidáveis, e os de estrutura Ferrítico-Martensítico, resultante de têmpera de temperatura dentro da zona crítica.

### **3.3.4 Classificação Quanto à Composição Química**

- Aços Carbono: Podem ser de baixo carbono (abaixo de 0,3%), aplicado em situações em que se exigem ductilidade elevada; aço de médio carbono (entre 0,3% e 0,5%C), tem aplicações em produtos forjados devido apresentar ductilidade à quente associado à média resistência à frio no estado forjado; os

Alto teor de carbono (acima de 0,5%), usados em casos em que se exigem grandes limites de escoamento tais como molas e vergalhões para concreto.

- Aços Ligados: São os aços que contêm elementos de liga com finalidade específica, como, aumentar a profundidade da têmpera, aumentar a resistência ao revenido, introdução de propriedades especiais tais como, resistência à corrosão em aços inoxidáveis e resistência a quente em aços ferramenta. Esse tipo de aço pode ser dividido em:

a) Aço de baixa liga, com menos do que 5% de elemento de liga, que geralmente são: Cr, Mo, Ni, Mn, Si, cuja finalidade de tais elementos é, aumentar a temperabilidade, facilitar a transição entre a superfície e o núcleo do aço cementado visando evitar o destacamento e aumentar a dureza das camadas nitretadas. Os aços de baixa liga são o aço mais consumido entre os aços ligados.

b) Aço de média liga: Com elemento de liga entre 5 à 10%, esses tipos de aços são empregados em situações onde se requer elevadas resistência mecânica em elevadas temperaturas (500°C). Ainda há casos em que se exigem resistência ao impacto e elevada dureza, tais como os aços ferramentas de trabalho a frio temperáveis ao ar. Esses aços apresentem pouca distorção após a tempera, sendo recomendável para situação de manutenção dimensional, exemplo é o aço ferramenta com A2 1%C; 0,6%Mn; 0,25%Si; 5%Cr; 0,25%V e 1%Mo.

c) Aços de alta liga: Nesses aços a quantidade de elemento de liga é superior a 10%. São aplicados em onde se requer elevada resistência à oxidação (aços inoxidáveis, %Cr>12%), elevada resistência mecânica e ao desgaste (aços D6, 2%C, 0,3%Mn, 0,85%Si, 12%Cr) e aços capazes de endurecer sob impacto, caso dos aços Hadfield (1%C; 12,7%Mn; 0,5%Si).

d) Aços de Alta resistência e Baixa Liga: São aços cujo a norma AISI-SAE não classifica como aços ligados (tais como 4340 e 8620) apesar de conterem elementos de liga adicionados para se obter resistência

mecânica e a corrosão. A soma dos elementos de liga não passa de 2% e a quantidade de carbono é abaixo de torno de 0,3%.

### **3.3.5 Classificação Quanto as Propriedades**

De todos os sistemas de classificação dos aços esse é menos sistemático, podendo-se destacar os seguintes casos mencionados na literatura, como aços de alta resistência e baixa liga, aços de alta resistência, aços inoxidáveis, aços indeformáveis (baixa distorção dimensional conseguido por tempera e revenido) e aços para fins elétricos e magnéticos.

### **3.3.6 Classificação Quanto a Aplicação**

Esse tipo de classificação é mais freqüente na literatura, provavelmente por se associar diretamente o tipo de aço com as aplicações pretendidas, podendo ser: aços estruturais, aços para molas, aços para beneficiamento, aços para cementação ou nitretação. Para os fins objetivados nesse trabalho, nos limitaremos à explanação dos ESTRUTURAIIS.

## **3.4 AÇOS ESTRUTURAIIS**

Os aços possuem posição de relevos entre os materiais de construção, pois combina resistência mecânica, trabalhabilidade, disponibilidade e baixo custo. Assim é fácil de entender a grande aplicação nos ramos da engenharia, nas estruturas como de edifícios, pontes e etc.

Para FERRAZ (2005), Aços Estruturais são vergalhões para reforço de concreto, barras, chapas e perfis para aplicações estruturais. São aqueles que são adequados para o uso em elementos que suportam cargas.

Os principais requisitos para os aços destinados à aplicação estrutural são:

- a) elevada tensão de escoamento para prevenir a deformação plástica generalizada;
- b) elevada tenacidade para prevenir fratura rápida (frágil) e catastrófica;
- c) boa soldabilidade para o mínimo de alterações das características do material na junta soldada;
- d) boa formabilidade para o material ou a peça que necessitar receber trabalho mecânico;
- e) custo reduzido.

Os aços ao carbono comuns atendem a esses de requisito, onde os que mais se utilizam são os que se encontram na faixa de 0,15% a 0,35%C. Os exemplos típicos são os aços AISI 1015 e 1020 e os DIN C15 E C20.

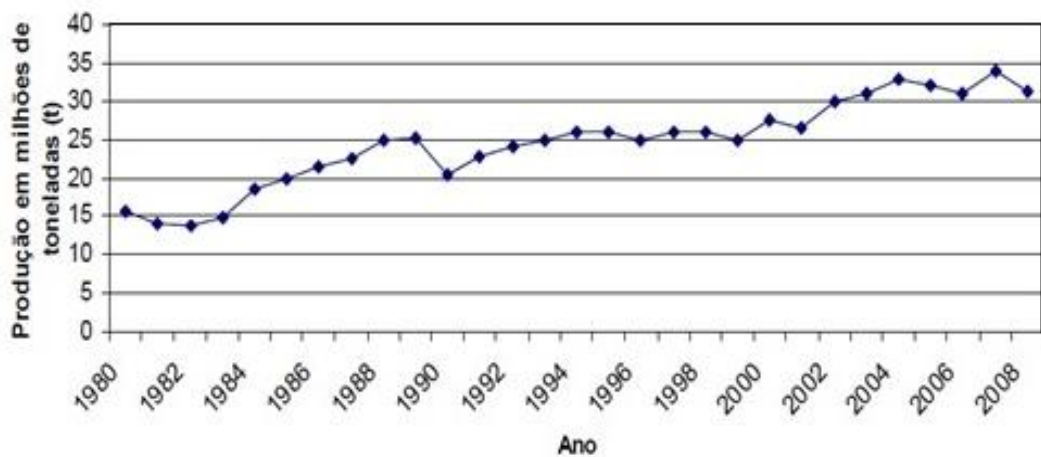
### **3.4.1 Vergalhão para Concreto**

Esses materiais são regidos pela norma NBR 7480, com a designação CAxx, em que os algarismos representados com xx indicam o mínimo limite de escoamento em  $\text{Kgf/mm}^2$ , pertencendo as classes A – laminado à quente e B – encruado

Ressalta-se que os vergalhões da classe A admitem serem soldados sem sofrer enfraquecimento, e os da classe B, ao serem soldados sofrem enfraquecimento devido a uma possível recristalização.

A Figura 5. Mostra a evolução da produção brasileira de aço bruto, usado como insumo na produção de laminado e semi-acabado. De acordo com este gráfico, observa-se que a produção brasileira segue uma tendência de aumento, apesar de algumas quedas eventuais. Segundo CARVALHO (2008), através do cálculo da taxa geométrica de crescimento, tem-se que a produção de aço bruto obteve um crescimento de 2,95% a.a. no período de 1980 a 2006.

**Figura 5** - Evolução da produção brasileira de aço bruto desde 1980 a 2008. Adaptado Abracave (1980a 1997) e IBS (1998 A 2009)



**Fonte:** BARRETO, 2009.

Este aumento foi principalmente estimulado pelo aumento da demanda tanto do mercado interno quanto no mercado externo e pela expansão dos investimentos iniciado no período pós-privatização, iniciado em 1994. E, em virtude de tais investimentos as empresas puderam modernizar seus parques industriais e assim tornando mais competitiva a indústria do aço brasileira.

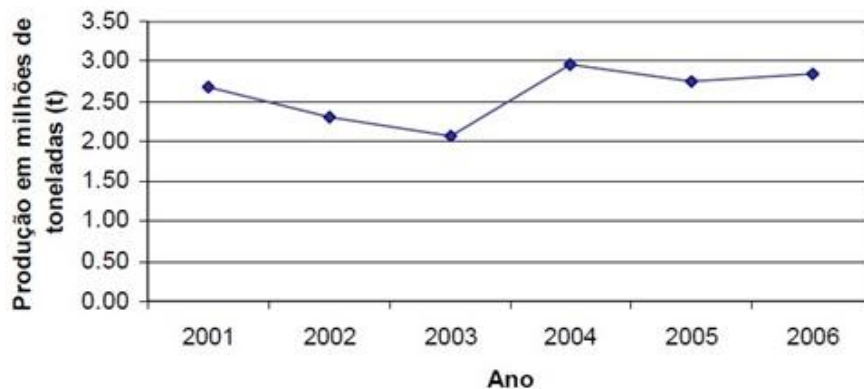
Tal suporte possibilitou uma produção nacional com altos padrões de qualidade capaz de abastecer o mercado interno e atender certa demanda externa.

Outro dado relevante é o recorde histórico de em 2007 o Brasil ter produzido 33,8 milhões de toneladas de aço bruto. Esse valores manteriam a tendência em continuar em 2008 e 2009 se não fosse a retração do mercado do aço

ocorrido devido a crise na economia americana e mundial, que afetou diretamente a produção nacional do aço.

O setor da construção civil, segundo maior consumidor de produtos siderúrgicos laminados, é considerado como um setor não exportado, responsável por 14% do consumo aparente destes, dos quais 60% são produtos longos, destacando-se os vergalhões para concreto armado. Na Figura 6 pode-se acompanhar a produção de vergalhão no Brasil 2001 a 2006.

**Figura 6** - Produção anual de vergalhão para construção civil de 2001 a 2006. Adaptado IBGE (2009).



Fonte: BARRETO, 2009.

### 3.4.2 Vergalhão de aço auto-revenido

Segundo SiMON et al. (1984), dentre os métodos usados na fabricação de vergalhão aço de boa qualidade, pode-se citar dois métodos: o primeiro é utilizado elementos de liga para reduzir os teores de carbono; e, no segundo, as barras são encruadas por trabalho mecânico à frio após a laminação.

Um terceiro tipo de processo difundiu-se por todo mundo por se mostra muito menos oneroso para a indústria siderúrgica, é o processo auto-revenimento. Este processo é executado no ultimo passe da laminação, onde o vergalhão passa por canhões de sistema de resfriamento com água com um fluxo dirigido no mesmo

sentido da barra, passando a temperatura superficial da barra de 1000<sup>0</sup>C para valores próximos a 300<sup>0</sup>C.

Nesse exato instante ocorre uma tempera na camada superficial da barra de aço transformando-se em martensita, enquanto o centro permanece austenítico. A quantidade de martensita formada cresce do centro para extremidade da barra. (SIMON at al., 1984).

Ainda segundo SIMON at al. (1994), quando o vergalhão deixa o sistema de resfriamento existe ainda um gradiente de temperatura ao longo barra. E, o calor oriundo do centro aquece a região martensitica, ocorrendo um auto-revenimento. Por fim, no leito de estocagem, a barra se resfria ate a temperatura ambiente, e o centro austenítico da origem a ferrita e perlita. Dos processos de auto-revenimento, os mais conhecidos são: o Tempcore e o Thermex.

### 3.5 ENSAIOS MECÂNICOS EM METAIS

#### 3.5.1 Ensaio de Tração

##### 3.5.1.1 Aspectos Gerais

A facilidade de execução e a reprodutibilidade dos resultados tornam o ensaio de tração um dos mais importantes entre os ensaios mecânicos.

A aplicação de uma força num corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço, desta forma, o ensaio de tração 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 (SOUSA, 1982).



### 3.5.1.2 Ensaio de tração convencional

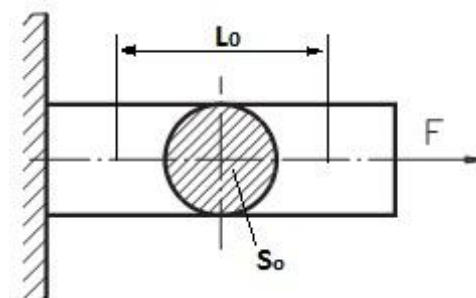
#### 3.5.1.2.1 Tensão e deformação na tração

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

Considera-se uma barra metálica cilíndrica de secção transversal uniforme,  $S_0$ , onde é marcada uma distância  $L_0$ , ao longo de seu comprimento, Figura 5. Se essa barra é submetida a uma única força de tração  $F$ , isto é, uma força normal à secção transversal da barra e coincidente com o seu eixo longitudinal, a tensão média da tração,  $\sigma$ , produzida na barra é dada por:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (01)$$

**Figura 7** – Barra submetida a esforço de tração



Fonte: SOUSA, 1982

O termo “tensão média” provém do fato de a tensão não ser completamente uniforme sobre a área,  $S_0$ , do espécime, ou seja, cada elemento longitudinal na barra não sofre a mesma deformação. A anisotropia inerente aos grãos de um metal policristalino impede uma completa uniformidade da tensão num corpo de tamanho macroscópico. Entretanto, como a variação é extremamente

pequena, pode-se excluir, daqui para frente, o termo “Tensão média”, chamando-o de apenas tensão.

Com a aplicação da tensão,  $\sigma$ , a barra sofre uma deformação,  $\epsilon$ . A força,  $F$ , produz um aumento da distância,  $L_0$ , de um valor,  $\Delta L$ . A deformação linear média é dada então por:

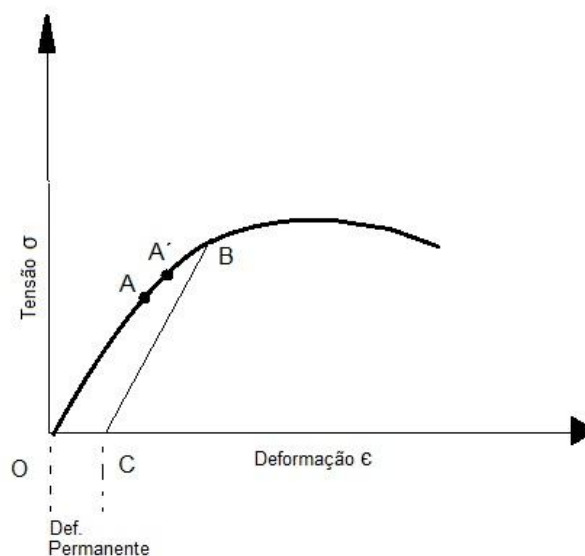
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (02)$$

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

### 3.5.1.2.2 Propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio de tração convencional

Quando um corpo de prova metálico é submetido a um ensaio de tração, pode-se construir um gráfico tensão-deformação, pelas medidas diretas da carga (ou tensão) e da deformação que crescem continuamente até quase o fim do ensaio, Figura 8.

**Figura 8** – Curva tensão-deformação de um metal ou liga



**Fonte:** SOUSA, 1982.

Verifica-se inicialmente que o diagrama é linear e é representado pela equação:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (03)$$

que corresponde a lei de *Hooke* (descoberta em 1678 por *Sir Robert Hooke*). A constante de proporcionalidade, *E*, é conhecida por módulo de elasticidade ou módulo de *Young*.

A linearidade do diagrama termina num ponto *A*, denominado limite elástico, definido como maior tensão que o material pode suportar, sem deixar qualquer deformação permanente quando o material é descarregado.

Ao atingir uma tensão em que o material já não mais obedece à lei de *Hooke*, ou seja, a deformação não é proporcional à tensão, chega-se ao ponto *A'*, Figura 6, denominado limite de proporcionalidade.

O início da plasticidade é verificada em vários metais e ligas dúcteis, principalmente no caso dos aços de baixo carbono, pelo fenômeno do escoamento. O escoamento é caracterizado praticamente por uma oscilação ou uma parada do ponteiro da máquina durante a duração do fenômeno. Determina-se limite de escoamento, à tensão atingida durante o escoamento e é dado pela equação:

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (04)$$

onde  $F_e$  é a força de escoamento. O limite de escoamento é dado em  $\text{Kgf./mm}^2$ .

Terminando 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. O limite de resistência,  $\sigma_r$ , do metal (dado em Kgf./mm<sup>2</sup>) é determinado pela equação:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{S_0} \quad (05)$$

onde a  $F_r$  é a força máxima atingida durante o ensaio.

Após ser atingida a força,  $F_r$ , entra-se na fase de ruptura do material, caracterizada pelo fenômeno da estrição, que é uma diminuição muitas vezes sensível da secção transversal do corpo de prova, numa certa região do mesmo. Quanto mais mole é o material, mais estrita se torna a secção nessa fase.

Outra propriedade mecânica que pode ser facilmente determinadas pelo ensaio de tração, é o alongamento total do corpo de prova. O alongamento  $\delta$  é calculado pela equação:

$$\delta = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (06)$$

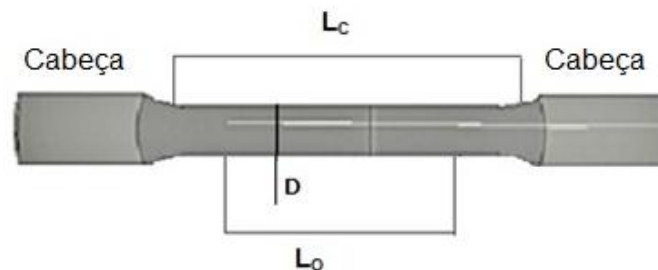
Onde  $L_0$  é uma distancia inicial marcada no corpo de prova antes do ensaio, geralmente especificadas pelas normas técnicas e  $L$  é a distancia final após a ruptura do corpo de prova. O Alongamento é expresso em % (SOUSA, 1982).

### 3.5.1.2.3 *Corpos de prova*

O ensaio de tração é feito em corpos de prova com características especificadas de acordo com normas técnicas. Suas dimensões devem ser adequadas à capacidade da máquina de ensaio. Normalmente utilizam-se corpos de prova de seção circular ou de seção retangular, dependendo da forma e tamanho do

produto acabado do qual foram retirados, a Figura 9 mostra um corpo de prova utilizado para ensaio de tração.

**Figura 9** – Corpos de prova para ensaio de tração.



**Fontes:** ALFAIA, 2011

O comprimento paralelo do corpo de prova, identificada, na Figura 9 por  $L_c$ , é a região da parte usinada que une as extremidades dos raios de concordância, e o comprimento original, representado por  $L_0$ , é a parte do corpo de prova onde são medidas as propriedades da peça.

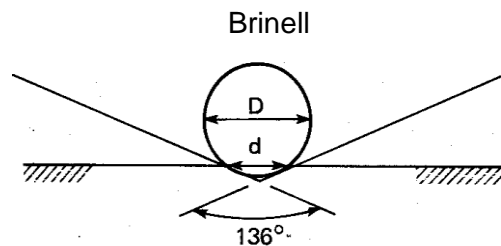
As cabeças são as regiões extremas, que servem para fixar o corpo de prova à máquina de modo que a força de tração atuante seja axial. Devem ter seção maior do que o comprimento paralelo para que a ruptura do corpo de prova não ocorra nelas.

Segundo a ABNT NBR 6152, o comprimento da parte original dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração deve corresponder a 5 vezes o diâmetro da seção da parte útil. Por acordo internacional, sempre que possível um corpo de prova deve ter 10 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento inicial. Não sendo possível a retirada de um corpo de prova deste tipo, deve-se adotar um corpo com dimensões proporcionais a essas (GARCIA, 1999).

### 3.5.2 Dureza Vickers

Essa dureza foi introduzida em 1925 por SMITH e SANDLAND, levando o nome Vickers, porque a companhia Vickers-Armstrong Ltda. fabricou as máquinas mais conhecidas para operar com esse tipo de dureza. O penetrador é uma pirâmide de diamante de base quadrada, com um ângulo  $136^\circ$  entre as faces opostas. Esse ângulo produz valores de impressões semelhantes à dureza Brinell, porque a relação ideal  $d/D$  da dureza Brinell sendo 0,375, para essa relação ideal, as tangentes à esfera partindo dos cantos da impressão fazem entre si um ângulo de  $136^\circ$ , como mostrado na Figura 11.

**Figura 10**– Ângulo de tangentes à esfera, para a relação  $d/D = 0,375$  na Dureza



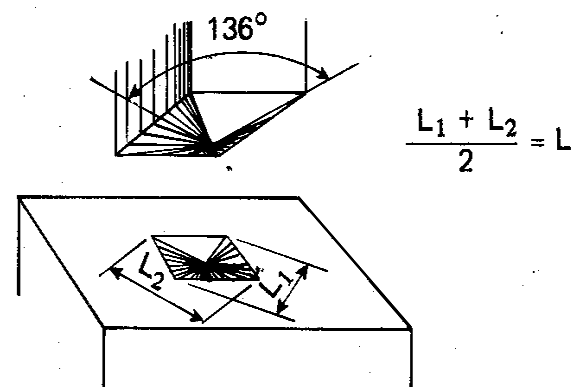
**Fonte:** SOUSA, 1982.

Como o penetrador é de diamante, ele é praticamente indeformável e como todas as impressões são semelhantes entre si, não importando o seu tamanho, a dureza vickers (HV) é independente da carga, isto é, o número de dureza obtido é o mesmo qualquer que seja a carga usada para materiais homogêneos. Para esse tipo de dureza, a carga varia de 1 até 100 ou 120 Kgf. A mudança da carga é necessária para se obter uma impressão regular, sem deformação e de tamanho compatível para a medida de suas dimensões no visor da máquina; isso depende, naturalmente, da natureza do material que se está ensaiando. A forma da impressão é um losango regular, ou seja, quadrada, e pela média  $L$  das suas diagonais, tem-se, conforme a equação seguinte, a dureza Vickers.

$$HV = \frac{1,8544Q}{L^2} \quad (07)$$

Como Q é dado em Kgf ou N e L em mm, a dimensão da dureza Vickers é N/mm<sup>2</sup> ou Kgf/ mm<sup>2</sup>. Esse tipo de dureza fornece, assim, uma escala contínua de dureza (de HV = 5 até HV = 1000 Kgf/ mm<sup>2</sup>) para cada carga usada. A Figura 12 mostra a dureza Vickers esquematicamente (SOUSA, 1982).

**Figura 11 – Penetrador e impressão Vickers**



**Fonte:** SOUSA, 1982.

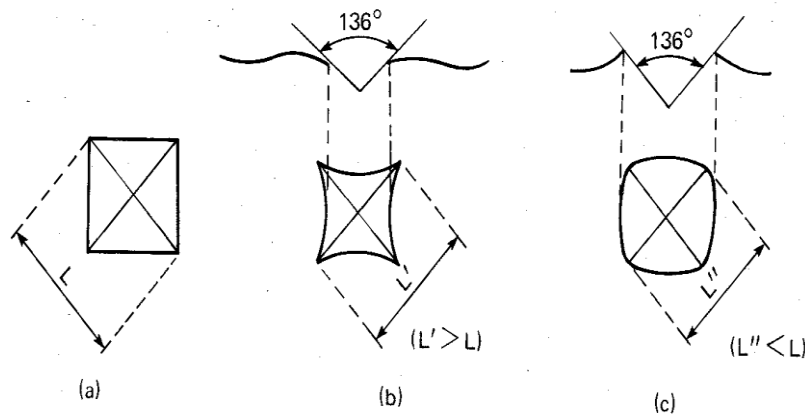
### 3.5.2.1 Vantagens do ensaio Vickers

As principais vantagens do método Vickers são: 1) É aplicável a todos os materiais metálicos, de qualquer dureza, especialmente para materiais muito duros ou muito moles, muito finos, pequenos e irregulares; 2) É indicado para o levantamento de curvas de profundidade de tratamentos superficiais como tempera e cementação; 3) A escala de dureza é contínua; 4) As impressões deixadas no material são extremamente pequenas; 6) A deformação do penetrador é nula; 7) Oferece grande precisão de medidas (SOUSA, 1982).

### 3.5.2.2 Anomalias que podem ocorrer

Como no caso da dureza Brinell, as impressões Vickers podem ocasionar erros, quando as impressões não apresentam seus lados retos, como mostra a figura 13(a). O Primeiro caso na figura 13(b) em Materiais muito moles (recozidos): pode ocorrer o afundamento do metal em torno das faces do penetrador. No segundo caso verificado na figura 13(c) em Materiais muito duros (encruados): pode ocorrer uma aderência do metal em torno das faces do penetrador (SOUSA, 1982).

**Figura 12** - (a) Impressão perfeita de dureza Vickers; (b) impressão defeituosa; “afundamento”; (c) impressão defeituosa; “aderência”



Fonte: SOUSA, 1982.

### 3.5.2.3 Microdureza por penetração

Como o próprio nome diz, a microdureza produz uma impressão microscópica no material, empregando uma carga menor que 1 Kgf com penetrador de diamante. A carga pode chegar a até 100 Kgf somente e a superfície do corpo de prova também deve ser plana. A microdureza Vickers utiliza a mesma técnica descrita anteriormente e pode ser aplicadas para: 1) Levantamento de curvas de profundidade de tempera, cementação ou outro tratamento superficial; 2) Determinação da dureza de microconstituintes individuais de uma microestrutura; 3)



Determinação da dureza de materiais frágeis; 4) Determinação da dureza de peças pequeníssimas e finas (SOUSA, 1982).

#### 3.5.2.4 Cuidados a serem tomados na microdureza

A preparação do corpo de prova deve ser feita metalograficamente, em vista da pequena carga a ser aplicada. Polimento eletrolítico deve ser usado preferencialmente para evitar encruamento do metal na superfície, que afetaria o resultado. O polimento eletrolítico torna também mais nítida a impressão para as medidas das diagonais. Caso seja necessário um polimento mecânico prévio, deve-se remover alguns microns da camada superficial. Um método bom, empregados para corpos de prova muito pequenos, é o de embuti-lo em baquelite, por exemplo, a fim de fixá-lo firmemente e de tornar a sua superfície perpendicular ao penetrador (SOUSA, 1982).

## 4 METODOLOGIA

Neste item estão descritos os procedimentos e materiais adotados para a obtenção e avaliação das propriedades mecânicas dos aços produzidos pela empresas A, B e C.

### 4.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

#### 4.1.1 Materiais

Para confecção dos corpos de prova para o ensaio de tração e microdureza Vickers foram usados:

- Vergalhão de aço CA-50 de 8 mm de diâmetro de três fabricantes diferentes;
- Serra manual MICHOLSON (24 dentes por polegada) para o corte do vergalhão, para ser embutido e para confecção do corpo de prova para o ensaio de tração;
- Resina de poliéster insaturada GAMA 313 do tipo ORTOFTALICA pré-acelerada, reticulada com estireno para o embutimento à frio;
- Emenda de tubo  $\frac{3}{4}$  para o embutimento à frio;
- Lixa d'água de numeração: 200, 400, 600, 1200 e 1500.

A composição química aproximada das amostras de vergalhão utilizadas é: 0,24% em carbono, 0,89% de manganês, 0,029% de fósforo, 0,024% de enxofre e 0,25% de silício.

### 4.1.2 Equipamentos

Na realização do trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Embutidora PANTEC mod. PANPRESS-30;
- Lixadeira SOLOTEST;
- Lixadeira e politriz modelo PLF FORTEL.
- Microdurômetro MHV2000;
- Máquina de ensaio de tração EMIC DL-10000.

### 4.2 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS

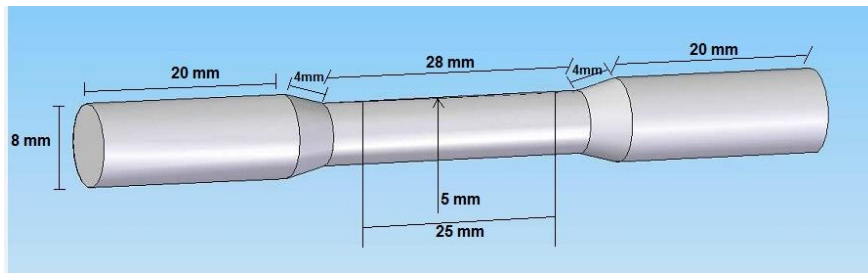
Para o ensaio de tração os corpos de prova foram confeccionados de acordo com NBR ISO 6892 (Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente).

Foi usinada uma barra de aço de CA 50 de 8 mm para que se obtivesse um diâmetro do comprimento paralelo igual a 5 mm, com um raio de concordância medindo 4 mm.

Foi calculado o comprimento paralelo  $L_c$ , de acordo com a norma NBR ISO 6892, e obtido o valor de 28 mm. E, para o comprimento de medida original  $L_0$ , foi calculado o valor 25 mm. E, para a “cabeça”, que não existe determinação dimensional, apenas que tenha tamanho suficiente para seja encaixada na máquina de tração, teve comprimento de 20 mm.

Após ter sido calculada as dimensões do projeto do corpo de prova, cinco corpos de prova para cada um dos três fabricantes (fabricante A, fabricante B e fabricante C) foram confeccionados em um torneiro mecânico, como mostra a Figura 13.

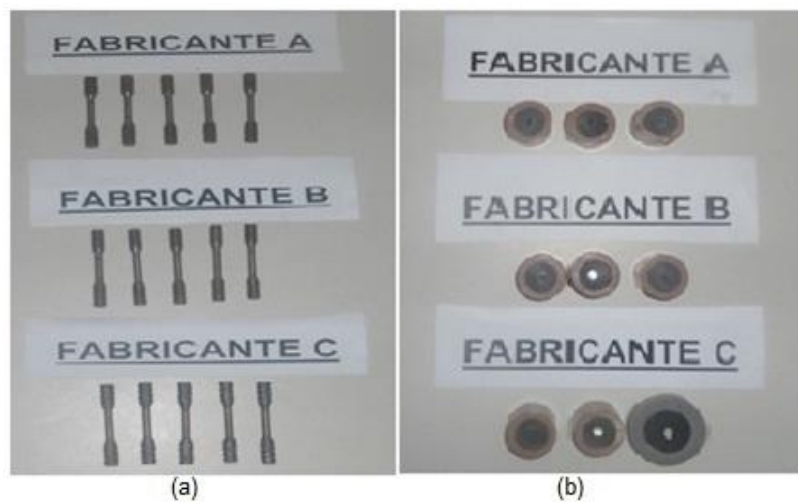
**Figura 13** - Projeto do corpo de prova para ensaio de tração



**Fonte:** ALFAIA, 2011

Os corpos de prova acabados para o ensaio de tração e microdureza estão expostos abaixo na figura 14.

**Figura 14** - Corpos de prova: (a) para o ensaio de tração e (b) para o ensaio de microdureza



**Fonte:** ALFAIA, 2011

Para o ensaio de microdureza foram embutidas à frio com resina de poliéster insaturada GAMA 313 do tipo ORTOFTALICA pré-acelerada, reticulada com estireno, três amostras de vergalhão do tipo CA 50 de 8 mm de cada um dos três fabricante (fabricante A, fabricante B e fabricante C).

As peças de aço embutidas foram lixadas com lixas d'água de numeração: 200, 400, 600, 1200 e 1500 para retirada de seus riscos superficiais. E, logo após, foram polidas na Lixadeira e politriz modelo PLF FORTEL.

### 4.3 ENSAIOS DE TRAÇÃO

O Ensaio de Tração é amplamente utilizado para o levantamento de informações básicas sobre a resistência dos materiais e como um teste de aceitação de materiais que se faz pelo confronto das propriedades determinadas pelo ensaio e ajustes especificados em projeto. O ensaio consiste na aplicação de uma carga uniaxial crescente a um corpo de prova especificado, ao mesmo tempo em que são medidas as variações no comprimento.

Todas as especificações quanto às dimensões do corpo de prova assim como a velocidade de tensionamento são verificadas na norma ABNT NBR ISO 6892 (Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente).

Os ensaios a temperatura ambiente foram realizados, em cinco corpos de prova de cada fabricante, em um equipamento modelo DL-10000 da EMIC – Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda, como visto na Figura 15, auxiliado pelo software Tesc versão 3,05 que interpreta e armazena os dados obtidos no ensaio.

**Figura 15 - Ensaio de tração**



**Fonte:** Laboratório UFPA-Marabá

Determinou-se o comprimento do corpo de prova em função do ajuste nas garras da máquina. E, a colocação desses corpos de prova na máquina foi manualmente, de modo que as garras estivessem alinhadas. Definiu-se a velocidade de 10 mm/min na operação da máquina de acordo com as orientações da norma citada.

#### 4.4 MICRODUREZA VICKES (HV)

Os ensaios para verificação das medidas de microdureza foram feitas em 3 peças embutidas e previamente preparada (lixadas e polidas) de cada fabricante, no Laboratório de Ensaio Mecânicos da UFPA, em uma máquina de modelo “DIGITAL Microhardness MHV2000”, como o da Figura 16.

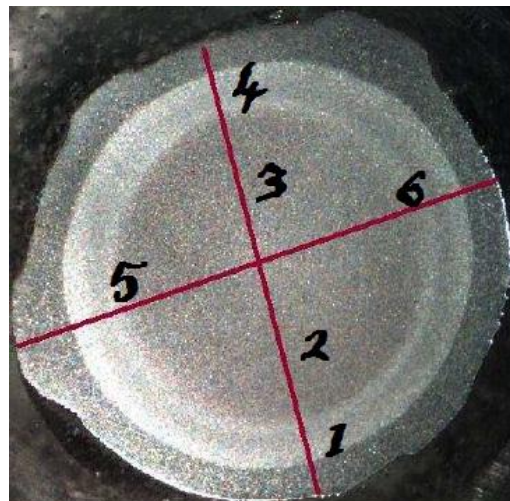
**Figura 16** - Microdurômetro MHV2000.



**Fonte:** Laboratório de Ensaaios Mecânicos – UFPA, Marabá

No ensaio utilizou-se uma carga de 2,94 N com um tempo de 20 segundos. Foram feitas seis endentações ao longo da superfície de cada corpo de prova para verificação da distribuição de microdureza da peça, como indica a Figura 17.

**Figura 17** - Distribuição das indentações ao longo da secção transversal do corpo de prova no ensaio de microdureza vickers



**Fonte:** BARRETO, 2009

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos são apresentados neste em dois diferentes grupos: ensaio de tração e microdureza Vickers.

### 5.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

No ensaio de tração, verificou-se que os desempenhos das amostras dos três fabricantes foram diferentes, apesar dos corpos de prova terem sido confeccionados e ensaiados sob as mesmas condições.

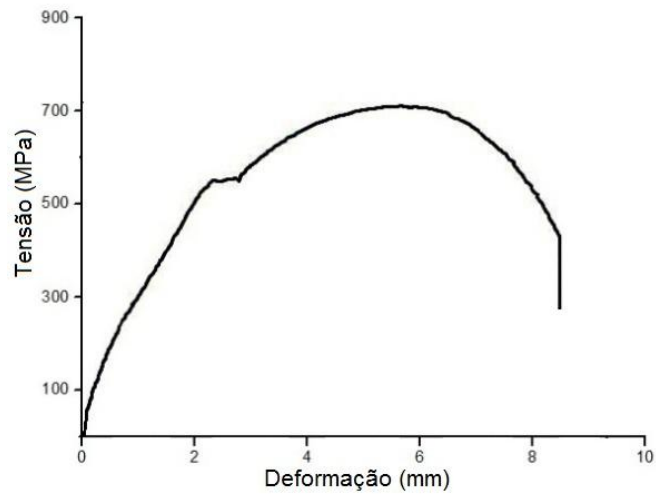
. Logo após os ensaios, utilizaram-se os dados gerados para construir as curvas TENSÃO X DEFORMAÇÃO das Figuras 18, 19 e 20, e na construção da Tabela 2.

Os gráficos das figuras 18, 19 e 20 confirmam as evidências que são expostas na tabela 3, de que o fabricante C apresenta as propriedades encontradas no ensaio de tração com valores superiores aos dos fabricantes A e B, se levado em conta de que todos os ensaios de tração foram feitos sob mesmas condições.

No gráfico da Figura 18 verifica-se uma tensão de escoamento de aproximadamente 514 MPa, com um limite de resistência em torno de 708 MPa, limite de ruptura em mais ou menos 448 MPa e um alongamento em média de 10,27 mm. Tais valores satisfazem os patamares exigidos pela norma NBR 7480.



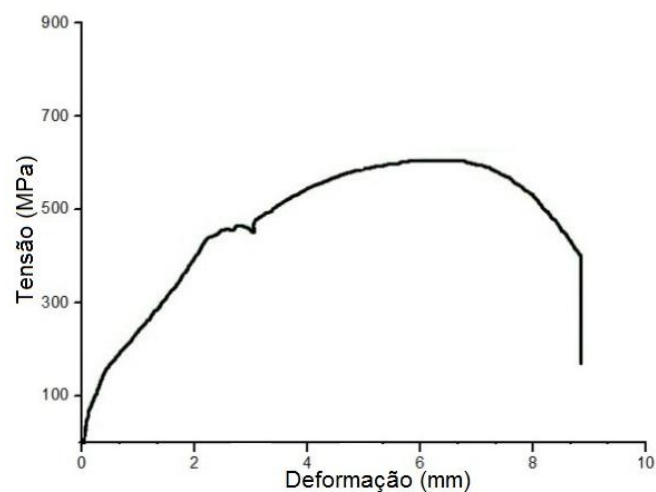
**Figura 18** - Resultado médio dos ensaios de tração das amostras do fabricante A



**Fonte:** ALFAIA, 2011

Para o resultado do ensaio das amostras do fabricante B, mostrado no gráfico da Figura 19, a tensão de escoamento é da ordem de 458 MPa, o limite de resistência 606 MPa, um limite de ruptura de 425 MPa e um alongamento médio de 13,00 mm. Se analisarmos os valores de referência da norma NBR 7480, contido na Tabela 3, podemos constatar que os valores da tensão de escoamento e do limite de resistência apresentado pelo corpo de prova desse fabricante estão abaixo das especificações da referida norma.

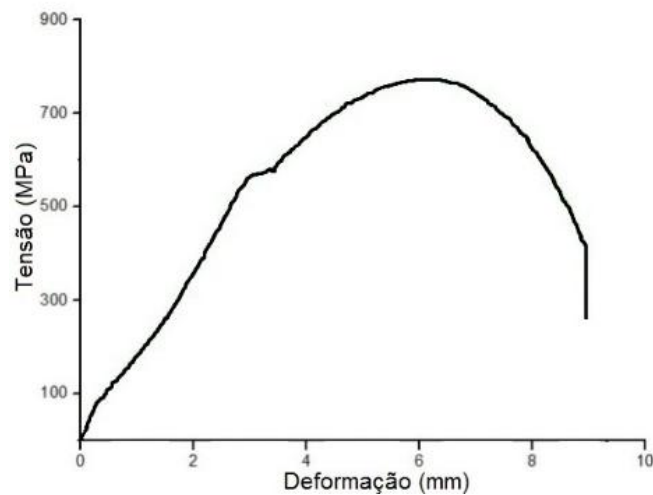
**Figura 19** - Resultado médio dos ensaios de tração das amostras do fabricante B



**Fonte:** ALFAIA, 2011

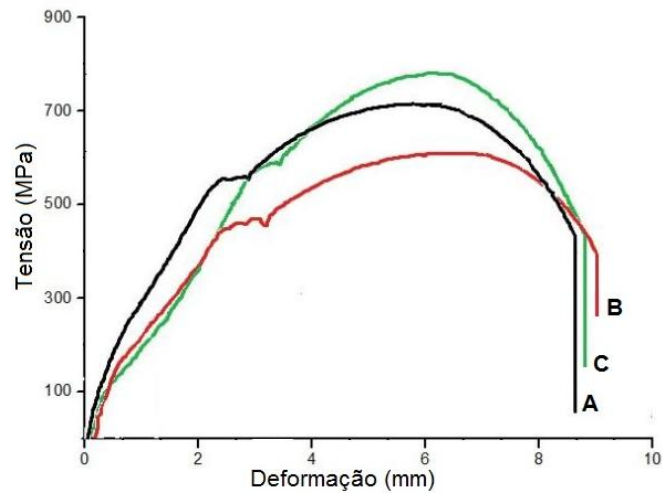
Já na Figura 20, amostra do fabricante C, evidencia-se que os três tipos de tensões investigadas no ensaio de tração foram superiores as tensões diagnosticadas nas amostras dos fabricantes A e B. Na tensão de escoamento detectou-se em torno de 597 MPa, para o limite de resistência encontrou-se valores em torno de 777 MPa e um alongamento de aproximadamente 11,82 mm. Tais resultados demonstraram que o produto deste fabricante apresentou superioridade no desempenho ao qual foi solicitado no ensaio; já que, além de seus valores de tensão de escoamento e limite de resistência estarem acima dos patamares exigido pela norma NBR 7480, estão também acima dos dois outros fabricantes.

**Figura 20** - Resultado médio dos ensaios de tração das amostras do fabricante C



**Fonte:** ALFAIA, 2011

Para fins de uma melhor análise comparativa a cerca dos resultados obtidos no ensaio de tração a Figura 21 traz em um mesmo plano o comportamento das curvas nos ensaios de tração dos três fabricantes.

**Figura 21** - Grafico comparativo das curvas dos ensaios de tração dos três fabricantes

Fonte: ALFAIA, 2011

A Tabela 2 abaixo mostra de forma tabelada os resultados expostos nos três gráficos acima já citados.

**Tabela 2** - Resultado do ensaio de tração para amostras dos fabricantes A, B e C

Fabricante	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Alongamento (%)
A	514±8,5	708±15	448±11	10,27±5,3
B	458±7,3	606±10,3	425±7,5	13,00±3,7
C	597±9,7	777±11	476±7,5	11,82±5,8
<b>Exigência NBR 7480</b>	≥500	≥679	---	≥8

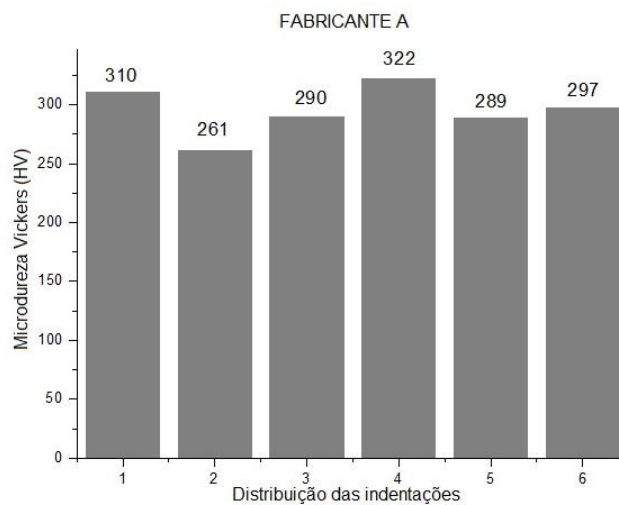
## 5.2 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

A microdureza Vickers foi o método usado para a caracterização da microdureza das amostras de vergalhão, a partir da definição na secção de

métodos, que seria analisado dois perfis perpendiculares em todas as amostras a fim de se conseguir uma caracterização eficiente do material estudado.

Na Figura 22, em que é mostrado o gráfico do perfil de microdureza para amostra do fabricante A, podemos perceber uma variação de 18,7% da parte mais macia (261 HV), no centro, em relação a parte mais dura, nos extremos. É verificada também uma variação média de 12 HV entre as bordas.

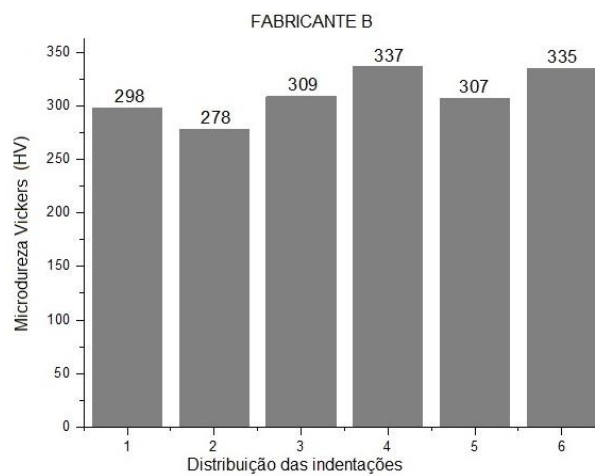
**Figura 22** - Gráfico de microdureza das amostras do fabricante A



**Fonte:** ALFAIA, 2011

Para a amostra do fabricante B os perfis de microdureza máxima são da ordem de 335 HV próximo da borda e 278 HV próximo do centro. No entanto, pode-se verificar que na indentação 3 a região apresentou uma dureza de 309 HV, valor esse mais elevado que em regiões mais externas, como nas indentações 1 e 5, com valores de 298 e 307 respectivamente. Também percebe-se uma variação de 39 HV entre as bordas. Estes fatores são indicadores de falhas no resfriamento do vergalhão após a laminação, como se verifica na Figura 23.

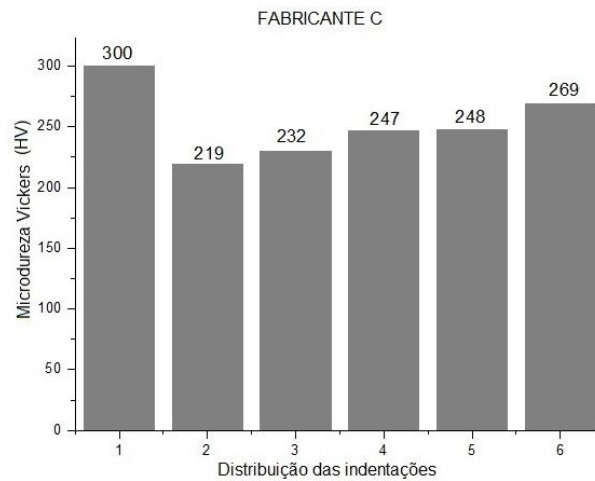
**Figura 23** - Grafico de microdureza de amostra do fabricante B



**Fonte:** ALFAIA, 2011

Já a amostra do fabricante C, apresentou uma dureza máxima nas bordas de 300 HV e um dureza mínima de 219 HV nos centros. Essa variação de 37% nas duas dureza aponta para um sucesso no processo de auto-revenimento, como é percebido na Figura 24.

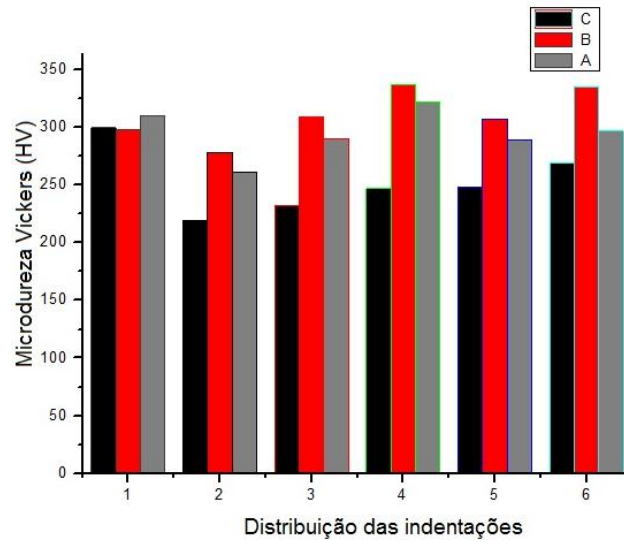
**Figura 24** - Grafico de microdureza de amostras do fabricante C



**Fonte:** ALFAIA, 2011

A seguir, um gráfico de barras que compara o comportamento dos três fabricantes na microdureza Vickers.

**Figura 25** - Gráfico de microdureza de amostras dos fabricantes A, B e C.



**Fonte:** ALFAIA, 2011

## 6 CONCLUSÃO

A partir da investigação das propriedades obtidas com os ensaios realizados puderam-se apresentar as seguintes considerações:

- Verificou-se que houve diferenças significativas entre as amostras dos três fabricantes, sob as mesmas condições estudadas, no tocante ao seu comportamento mecânico frente à solicitação na tração e na microdureza.
- No alongamento, obtido no ensaio de tração, os três fabricantes apresentaram valores percentuais acima de 8%, valor esse sendo o mínimo determinado pela norma NBR 7480.
- Em relação aos valores máximos e mínimos dos resultados atingidos no ensaio de tração, das amostras dos três fabricantes investigados, percebeu-se que apenas o produto do fabricante B apresentou desempenho abaixo dos patamares prescritos na norma NBR 7480. Em contrapartida, o fabricante C alcançou valores superiores aos outros dois fabricantes.
- Após ter tido o melhor desempenho no ensaio de tração, verificou-se que a amostra do fabricante C apresentou também melhor desempenho no ensaio de microdureza Vickers.
- O melhor desempenho na microdureza Vickers para o fabricante C em relação ao fabricante A e B deve-se ao fato de que a variação entre a dureza apresentada no centro em relação às bordas foi maior para a amostra daquele fabricante do que para os outros dois. Tal fato revela um maior sucesso no processo pós-laminação, o auto-revenimento, o que é um indicativo de um vergalhão de melhor qualidade.



## REFERÊNCIAS

- CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª. Edição. Trad. Sérgio Murilo Stamile Soares, Rio de Janeiro, 2002.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005
- SOUZA, Sergio Augusto. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5ª Edição, São Paulo, 1982.
- GARCIA, Amauri, JAIME, Alvares Spim, SANTOS, Alexandre dos Santos. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Barras e fios de aço destinado a armadura para concreto armado; especificação**; NBR 7480. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais Metálicos – Ensaio de tração à temperatura Ambiente**. NBR ISO 6892. Rio de Janeiro, 2002.
- SILVA, André Luiz V. da Costa, MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 3ª Edição. Editora blucher. São Paulo, 2010.
- FERRAZ, Henrique. **Aço na construção Civil**. Artigo. Estudante de Arquitetura e Urbanismo da EESC-USP, 2005.
- BARRETO, Matheus de Farias e Oliveira. **Características Mecânicas de Aços Auto-revenido**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Engenharia, 2009.
- CARVALHO, Thaís Hortensi de, BACHA, Carlos José Caetano. **Análise da Evolução e de Estrutura da Siderurgia Brasileira e do Uso do Carvão Vegetal no Período de 1980 à 2006**. XLVI CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL. Anais. Rio Branco, AC. 2008.
- TAMM, H. **Manual Técnico Themex – HSE**. Henngsdorfer Stahl Engineering, 2003
- RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Introdução aos Processos Siderurgicos**. ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais). São Paulo, 2005.
- SIMON, P; ECONOMOPOULOS, M.; NELLS, P. **Tempcore: A New Process for the Production of High-Quality Reinforcing Bars**. Iron and Steel Engineering, mar. 1984.