



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

TÁSSIA CAMILA DOS SANTOS

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO SAE 1312
MODIFICADO AO NIÓBIO**

Guaratinguetá
2011

TÁSSIA CAMILA DOS SANTOS

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO SAE 1312
MODIFICADO AO NIÓBIO

Trabalho de Graduação apresentado
ao Conselho de Curso de Graduação
em Engenharia de Materiais da
Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista,
como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Graduação
em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino P. do Nascimento

Guaratinguetá
2011

S237e	Santos, Tássia Camila dos Estudo das propriedades mecânicas do aço SAE 1312 modificado ao nióbio / Tássia Camila dos Santos – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 41 f. : il. Bibliografia: f. 41 Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. Marcelino P. do Nascimento 1. Aço – Propriedades mecânicas 2. Nióbrio I. Título CDU 669.14 018.2
-------	---

ESTUDOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO SAE 1312
MODIFICADO AO NIÓBIO

TÁSSIA CAMILA DOS SANTOS

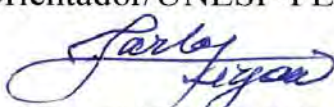
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

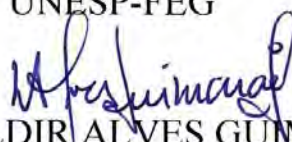
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS


Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCELINO P. DO NASCIMENTO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. CARLOS KIYAN
UNESP-FEG


Prof. Dr. VALDIR ALVES GUIMARÃES
UNESP-FEG

Novembro de 2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo, por me possibilitar cursar esta Universidade e por me dar a inteligência e o discernimento necessários para seguir até o fim. Agradeço pela minha família e meus amigos;

ao meu namorado *André*, por ter estado ao meu lado durante todo o decorrer da minha graduação, incentivando-me e me dando o suporte necessário para não desistir;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelino P. do Nascimento* pelo auxílio e pela orientação durante este ano;

à minha mãe *Elza*, que sempre incentivou meus estudos e me deu o suporte necessário para chegar até aqui;

à *Regina Célia Ferreira da Silva Souza*, funcionária da seção de graduação, pelo empenho em ajudar, pela dedicação e disponibilidade sempre demonstrados;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá, pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos técnicos dos laboratórios do DMT, pela disposição em ajudar na realização dos ensaios.

“Não precisamos de homens providenciais, com superpoderes para resolver as questões da vida e da morte. Precisamos de pequenos heróis com respostas para os problemas de todos os dias, mesmo porque a vida é feita de todos os dias.”

Veríssimo

SANTOS, T. C. **Estudo das propriedades mecânicas do aço SAE 1312 modificado ao nióbio**. 2011. 41 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

O estudo das propriedades mecânicas de aços especiais de alta liga é de grande interesse por parte das indústrias siderúrgicas pela grande procura das empresas que fabricam componentes automotivos de grande criticidade, e também por seu alto valor comercial. No entanto, o desenvolvimento deste tipo de liga demanda alto conhecimento técnico-metalúrgico. Entre esses aços de extrema importância, os de interesse neste estudo são os aços especiais modificados ao nióbio. O manganês e o nióbio são os principais elementos de liga presentes na composição desses aços, ambos aumentam a região de estabilidade da austenita. O manganês aumenta a temperabilidade e o limite de resistência à tração; já o nióbio eleva a resistência mecânica e promove o refino do grão. A caracterização mecânica do aço SAE 1312 modificado ao nióbio foi feita a fim de se ter um melhor entendimento da influência nas propriedades mecânicas causada pelo envelhecimento em diferentes temperaturas e por diferentes reduções de bitola na trefilação do material. Essa caracterização foi feita por intermédio dos ensaios mecânicos de tração e dureza. Esse material apresentou um aumento no limite de resistência e na dureza quando com grandes reduções de bitola durante a trefilação. Porém, quando submetido a temperaturas de envelhecimento maiores que 300 °C, obteve-se uma ligeira perda destas propriedades.

PALAVRAS-CHAVE: Aços Especiais. Nióbio. Envelhecimento. Propriedades Mecânicas.

SANTOS, T. C. **Study of mechanical properties of steel SAE 1312 changed to niobium.** 2011. 41 f. Graduate work (Graduate in Materials of Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

The study of mechanical properties of high-alloy special steels is of great interest of the steel industry due to the great demand by companies that manufacture automotive components of high criticality, and also because of its high commercial value. However, the development of this type of alloy metals demand highly technical knowledge. Among these extremely important kinds of steel, the subject which is the interest of this study is the special steel modified by niobium. The manganese and niobium are the main alloying elements in the composition of these steels, both of them increase the stability of the austenite region, however, manganese increases the hardenability and tensile yield strength, and niobium increases the mechanical strength and promotes refining the grain. The mechanical characterization of steel SAE 1312 modified the niobium was made in order to gain a better understanding of the influence on the mechanical properties caused by aging at different temperatures and for different reductions in the drawing of gauge material. This characterization was made by means of tensile test and hardness. This material showed an increase in yield strength and hardness when gauge with large reductions during the wiredrawing, but when subjected to aging temperatures higher than 300 ° C had a slight loss of these properties.

KEYWORDS: Special Steel. Niobium. Aging. Mechanical Properties.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – O valor da produção mundial (em dólares americanos, em 2000) de alguns dos materiais mais importantes na engenharia.....	19
FIGURA 2 – Corpo de prova para o ensaio Jominy, possibilidade de se obter larga gama de velocidades de resfriamento do aço	21
FIGURA 3 – Principais etapas no processo de seleção de aços por temperabilidade, empregando curvas Jominy	23
FIGURA 4 – Efeito do Nb na microestrutura do aço microligado em vários processos.....	27
FIGURA 5 – Diagrama e expressão de solubilidade para determinadas temperaturas para NbC	28
FIGURA 6 – Deformação durante a penetração no ensaio de dureza	30
FIGURA 7 – Método Brinell para medida de dureza: P, carga aplicada em kgf; D, diâmetro da esfera em mm; L e d, altura e diâmetro da impressão, respectivamente, em mm	31
FIGURA 8 – Micrografia do aço estudado com ampliação de 500x	35
FIGURA 9 – Influência da redução na trefilação sobre o limite de resistência do material sem tratamento térmico	36
FIGURA 10 – Influência da redução na trefilação na dureza do material sem tratamento térmico	36
FIGURA 11 – Influência das altas temperaturas de envelhecimento no limite de resistência do material	37
FIGURA 12 – Influência das altas temperaturas de envelhecimento na dureza do material	38
FIGURA 13 – Comparação do efeito da temperatura de envelhecimento em cada redução na trefilação sobre o limite de resistência do material	38
FIGURA 14 – Comparação do efeito da temperatura de envelhecimento em cada redução na trefilação sobre a dureza do material	39

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Sistema de codificação SAE/AISI.....	20
TABELA 2 – Efeitos específicos dos elementos de liga nos aços.....	23
TABELA 3 – Composição química do aço estudado.....	32
TABELA 4 – Descrição das amostras utilizadas	32
TABELA 5 – Resultados dos ensaios mecânicos para amostras na condição bruta e na condição envelhecida para diferentes bitolas.....	34

SUMÁRIO

FOLHA DE ROSTO	2
FICHA CATALOGRÁFICA	3
FOLHA DE APROVAÇÃO.....	4
AGRADECIMENTOS	5
EPÍGRAFE	6
RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Aços	14
2.2 Aços especiais.....	16
2.3 Classificações dos aços especiais	16
2.4 Seleção de aços.....	18
2.4.1 Seleção empregando as curvas Jominy	21
2.5 Influência dos elementos de liga	23
2.6 Influência dos parâmetros de laminação	25
2.7 Trefilação.....	28
2.8 Ensaio mecânicos, normas e especificações	28
2.8.1 Ensaio de tração.....	28
2.8.2 Ensaio de dureza.....	29
2.8.2.1 Ensaio de dureza Brinell.....	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Materiais	31
3.2 Métodos	32
3.2.1 Envelhecimento	32
3.2.2 Ensaio de tração.....	32
3.2.3 Ensaio de dureza Brinell.....	33

3.2.4 Microscopia óptica com ataque químico	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 Microestrutura	35
4.2 Resultados Gráficos.....	35
5 CONCLUSÕES.....	40
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

Os aços especiais de alta liga e as ligas especiais são objeto de grande interesse por parte de empresas, uma vez que apresentam alto valor agregado; por esse motivo, demandam um conhecimento profundo da sua metalurgia. Os aços especiais de alta liga são os aços com teor de elementos de liga maior que 8%, cujas características e propriedades finais são fortemente condicionadas pelo processo de fabricação. Já as ligas especiais são, em sua maioria, constituídas por ligas à base de manganês e possuem características especiais [10].

Os efeitos dos elementos de liga nos aços e ligas especiais envolvem não apenas alterações nas fases ou constituintes presentes em equilíbrio, mas também na maneira e velocidade com que essas fases se formam. Naturalmente, a presença de elementos de liga pode, além disso, alterar as próprias características das fases presentes [1].

Em resumo, a metalurgia desses aços microligados baseia-se:

- i) No incremento no limite de resistência e tenacidade pelo refinamento de grão;
- ii) No teor relativamente baixo de carbono (0,03 – 0,15%) para aumento da tenacidade e soldabilidade;
- iii) Na solução sólida, apesar de esta técnica ser bastante limitada já que os elementos mais efetivos têm efeito deletério na tenacidade.
- iv) Endurecimento pela diminuição da temperatura de transformação formando ferrita acicular, bainita ou mesmo martensita e
- v) No endurecimento por precipitação feito por uma normalização ou durante o resfriamento pós laminação (precipitação interfásica) ou durante um tratamento de envelhecimento (precipitação na ferrita) [8].

Entre esses aços de extrema importância, os de interesse neste estudo são os aços especiais modificados ao nióbio.

O manganês e o nióbio são os elementos de liga principais presentes na composição química desses aços e ambos aumentam a região de estabilidade da

austenita: o manganês aumenta a temperabilidade e o limite de resistência à tração, já o nióbio eleva a resistência mecânica e promove o refino do grão.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho foi de se fazer a caracterização mecânica do aço SAE 1312 modificado ao nióbio a fim de se entender a influência causada pelo envelhecimento em diferentes temperaturas e também a influência de diferentes reduções na trefilação do material.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços

Aços são ligas ferro-carbono com teor de carbono de até 2% em peso. É de longe o material mais amplamente empregado na fabricação de bens de consumo e bens de produção, nas indústrias, na fabricação de máquinas, nos veículos automotores, na construção civil, etc. O aço é utilizado para fabricar quase tudo, desde uma agulha de costura até tanques de armazenamento de óleo. Além disso, as ferramentas, necessárias para construir e fabricar esses artigos, são também fabricadas em aço [2].

Como indicação da importância relativa deste material, a produção mundial de aço em 2009 foi de 1, 220 bilhão de toneladas, enquanto a produção de alumínio (segundo metal mais importante na engenharia) foi de somente 38 milhões de toneladas. O Brasil produz hoje, entre produtos planos e não planos, a cifra de 30 milhões de toneladas e é o nono produtor mundial de aço [2].

As principais razões da popularidade do aço, comparativamente às outras ligas, são seu baixo custo de fabricação, de conformação e de processamento e a abundância das matérias primas (minério de ferro e sucata), além da possibilidade de se ter uma faixa sem paralelo de variação de propriedades

mecânicas, para aços com diferentes composições químicas ou para um mesmo aço com diferentes tratamentos termomecânicos [2].

Existem, no mundo inteiro, milhares de tipos de aços, com composições químicas registradas e patenteadas ou definidas por normas, classificados segundo sistemas de numeração e codificação desenvolvidos em diferentes países, dando cobertura ao enorme número de ligas existentes. Além disso, o número de opções para o consumidor de aço é enorme, pois os aços podem ser oferecidos com diferentes tratamentos térmicos, microestruturas, condições de conformação, geometrias e acabamento superficial [2].

Entretanto, os aços podem ser classificados em uns poucos grupos maiores, de acordo com sua composição química, aplicações, formas e acabamentos superficiais [2].

Com base na composição química os aços podem ser agrupados em três categorias principais: aços carbono, aços de baixa-liga e aços de alta-liga [2].

Os aços carbono são de longe os mais produzidos, constituindo cerca de 90% da produção mundial. Eles são geralmente agrupados em: aços alto carbono $C > 0,5\%$; médio carbono $0,2\% < \%C < 0,49\%$; aços de baixo-carbono com teores entre 0,05% e 0,19%; aços de carbono extra-baixo com $0,015\% < \%C < 0,05\%$ e aços de ultrabaixo carbono com $\%C < 0,015\%$. Os aços carbono são também definidos como contendo menos que 1,65% Mn, 0,6% Si e 0,6% Cu, com o teor total dos outros elementos não excedendo 2% [2].

As inúmeras aplicações do aço mostram sua enorme versatilidade. Na maior parte das vezes as necessidades do consumidor são atendidas por aços ao carbono não ligados. Como exemplo, temos chapas para estampagem de carrocerias de veículos automotores, utensílios fabricados em aço baixo carbono ou em aços estruturais de médio teor de carbono, placas empregadas na indústria da construção civil e da construção mecânica, trilhos e arames de alta resistência fabricados em aços de alto carbono [2].

A adição de elementos de liga mais caros começa quando se deseja combinação de propriedades impossíveis de se atingir utilizando aços carbono [2].

Os aços de baixa-liga contêm elementos de liga (Cr, Ni, Mn, V, Mo, etc.) em teores totais menores que 5%. Aços com teores totais de elementos de liga, além do carbono, são utilizados na composição química dos aços com o intuito de melhorar suas propriedades. São eles: manganês, silício, alumínio, níquel, cromo, cobalto, molibdênio, vanádio, tungstênio, nióbio, titânio, chumbo e outros. Muitos desses elementos são adicionados simultaneamente para alcançar propriedades específicas [2].

2.2 Aços especiais

Os aços chamados especiais são os aços com adição de um ou mais elementos de liga que totalizem no mínimo 8%. Esses aços são normalmente utilizados em aplicações que necessitam de um controle maior que os outros.

2.3 Classificações dos aços especiais

A importância de especificações bem elaboradas para produtos industriais não pode ser subestimada. Especificações corretas conduzem à economia por parte dos produtores e dos compradores, a prazos mais curtos de entrega e, principalmente, ao melhor entendimento entre produtor e cliente. Uma especificação bem elaborada deve deixar claro o que se espera e o que se aceita do produto. Por esse motivo, muito esforço é dedicado por diversas entidades, privadas ou não, tanto nacional como internacional, no sentido de padronizar as especificações de produtos industriais, especialmente os materiais [1].

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

- Classificação baseada em características do aço ou liga. Exemplo: propriedades mecânicas, composição química, etc.;
- Classificação baseada no emprego do aço ou liga. Exemplo: aços para ferramentas, para construção mecânica, etc. [1].

Essas classificações não são excludentes, e um dos problemas que são encontrados ao tentar compreendê-las e aplicá-las decorre da frequente superposição entre as classificações. Dois aspectos importantes devem ser ressaltados: em primeiro lugar, tais classificações não constituem critérios definitivos e imutáveis e são estabelecidas visando a ajudar o processo de seleção. Aços classificados como “para ferramenta”, por exemplo, podem ser a melhor solução em determinadas aplicações em peças de equipamentos mecânicos. Em segundo lugar, determinados aços podem estar incluídos, simultaneamente, em mais de uma classificação, em especial quando os critérios de classificação são diferentes: por exemplo, aços baixo carbono freqüentemente classificados como “aços para conformação mecânica” e aços de “alta resistência baixa liga” (ARBL), tanto podem ser classificados como “aços estruturais” ou “aços para caldeiras e vasos de pressão” [1].

É importante ter em mente, entretanto, que as propriedades e características apresentadas em manuais e especificações são médias de universos de amostras, sendo sempre recomendável um contato com o produtor de aço para definir, com maior exatidão, o que se pode esperar do material produzido segundo determinada especificação. Normalmente, o fabricante fornecerá um julgamento equilibrado sobre a adequação do material selecionado pelo projetista e poderá, inclusive, opinar quanto à possibilidade de o aço ter suas propriedades em uma faixa mais estreita que a citada nos manuais. Ele também pode fornecer garantias sobre propriedades ou características não constantes da especificação. No entanto, normalmente o material é garantido apenas no que tange à especificação segundo a qual foi comprado [1].

Entre as propriedades que podem ser especificadas para um aço ou liga, além das características dimensionais (forma, dimensões e tolerâncias), estão:

- composição química;
- propriedades mecânicas e/ou tecnológicas;
- tamanho de grão;
- temperabilidade;
- nível de inclusões não metálicas;

- resistência ao impacto; e
- propriedades físicas [1].

Entretanto, como o custo do material varia diretamente com o número de propriedades especificadas, uma determinada especificação deve ser aceitável economicamente, tanto para o fornecedor como para o cliente. Além disso, há diversas falhas que podem estar presentes em uma especificação:

- Ser muito geral – causando aceitação do material inferior ao desejado;
- Ser muito restritiva – causando a recusa de material que seria adequado para a aplicação;
- Ser baseada em critérios impróprios ou inadequados – por exemplo, especificar a composição química quando se deseja, realmente, a garantia de propriedades mecânicas, ou exigir propriedades mecânicas elevadas de um material, cuja principal característica necessária na aplicação é a resistência à corrosão;
- Ser impraticável, por exigir material ideal – por exemplo, especificar ausência total de fósforo e enxofre no aço, ou especificar isenção completa de inclusões não metálicas.

É importante, então, que o projetista tenha um espírito permanentemente crítico, perguntando-se sempre se está especificado realmente o que é importante, se não está sendo excessivamente restritivo, encarecendo o produto; em suma, se está sendo razoável [1].

2.4 Seleção de aços

Há quase um século, os aços são os materiais industriais mais amplamente empregados. A figura 1 mostra o valor da produção de diferentes materiais em 2000. O papel de destaque do aço é evidente. Possivelmente, o principal fator que levou o aço a ocupar este papel preponderante na engenharia é o amplo espectro de propriedades e características de desempenho que pode ser obtido a custos baixos, especialmente devido à disponibilidade do ferro na crosta terrestre e à extrema otimização dos processos de fabricação do aço [1].

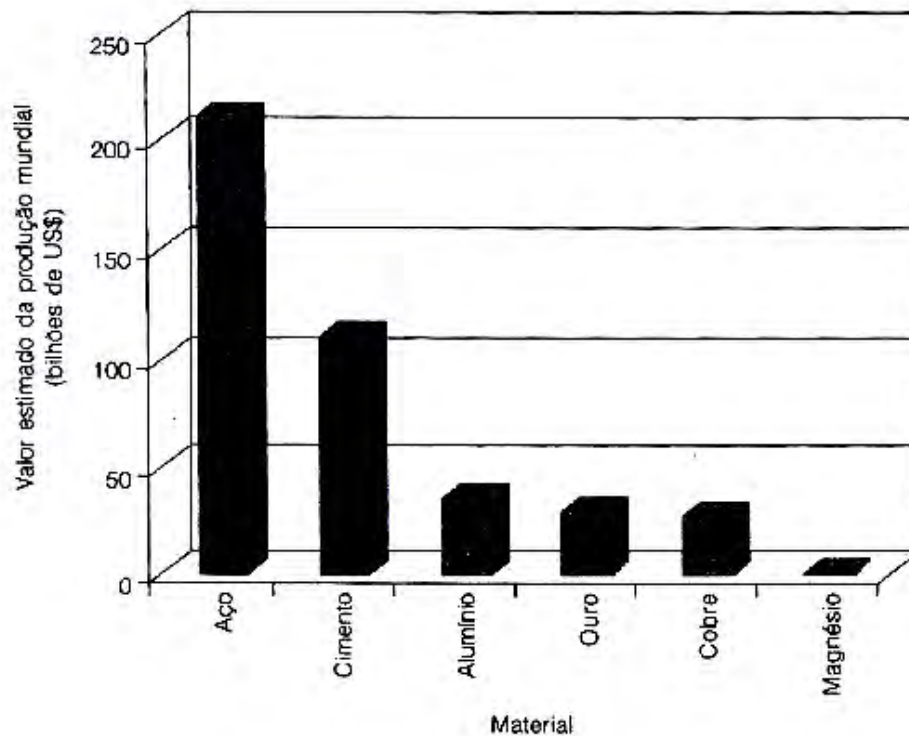


Figura 1: O valor da produção mundial (em dólares americanos, em 2000) de alguns dos materiais mais importantes na engenharia [2].

Naturalmente, o aço é um material em constante evolução, e os padrões de qualidade, bem como os níveis de propriedades que podem ser atingidos hoje, com aços convencionais, superam, em muito, as características de aços que eram considerados “especiais” há poucas décadas. O processo de seleção de aços para determinada aplicação deve levar em conta, então, não somente as propriedades dos aços presentemente disponíveis em comparação com os materiais alternativos, como as tendências de desenvolvimento na própria indústria do aço. A seleção é, portanto, um processo dinâmico e deve ser revista periodicamente, se os melhores resultados são desejados [1].

Em função das infinitas possibilidades é necessário para uma correta caracterização de um aço que a respectiva composição química seja conhecida; esta vulgarmente exprime-se através de classificações ou códigos definidos por intuições. As mais relevantes são: a *American Iron and Steel Institute* (AISI), a

Associação Brasileira de Norma Técnicas (ABNT) e a *Deutsches Institut für Normung* (DIN), de origem alemã [11].

O sistema de classificação da AISI é freqüentemente adotado pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), pelo que é referido abreviadamente por AISI-SAE; consiste num sistema numérico de quatro ou cinco algarismos indicando, os dois (ou três) últimos, o teor em carbono do aço em centésimos; os dois primeiros indicam se o aço é ou não ligado e qual o tipo de liga [11].

Tabela 1:Sistema de Codificação SAE/AISI [2].

Designação		Tipos de Aço
SAE	AISI	
10XX	C10XX	Aços carbono comuns
11XX	C11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil, com alto S
13XX	13XX	Aços manganês com 1,75% de Mn
23XX	23XX	Aços níquel com 3,5% de Ni
25XX	25XX	Aços níquel com 5,0% de Ni
31XX	31XX	Aços níquel cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	E33XX	Aços níquel cromo com 3,5% de Ni e 1,55% de Cr
40XX	40XX	Aços molibdênio com 0,25% de Mo
41XX	41XX	Aços cromo molibdênio com 0,50% ou 0,90% de Cr, 0,12% ou 0,20% de Mo
43XX	43XX	Aços níquel cromo molibdênio com 1,80% de Ni, 0,50% ou 0,80% de Cr e 0,25% de Mo
46XX	46XX	Aços níquel molibdênio com 1,55% ou 1,80% de Ni e 0,20% ou 0,25% de Mo
47XX	47XX	Aços níquel cromo molibdênio com 1,05% de Ni, 0,45% de Cr e 0,20% de Mo
48XX	48XX	Aços níquel molibdênio com 3,50% de Ni e 0,25% de Mo
50XX	50XX	Aços cromo com 0,28% ou 0,65% de Cr
50BXX	50BXX	Aços cromo boro com baixo teor de Cr e no mínimo 0,0005% de B
51XX	51XX	Aços cromo com 0,80% a 1,05% de Cr
61XX	61XX	Aços cromo vanádio com 0,80% ou 0,95% de Cr e 0,10% ou 0,15% de V
86XX	86XX	Aços níquel molibdênio com baixos teores de Ni, Cr e Mo
87XX	87XX	Idem
92XX	92XX	Aços silício manganês com 0,85% de Mn e 2,0% de Si
93XX	93XX	Aços níquel cromo molibdênio com 3,25% de Ni, 1,20% de Cr e 0,12% de Mo
94BXX	94BXX	Aços níquel cromo molibdênio com baixos teores de Ni, Mo e no mínimo 0,0005% de B
98XX	98XX	Aços níquel cromo molibdênio com 1,0% de Ni, 0,80% de Cr e 0,25% de Mo

O sistema de classificação SAE/AISI pode também conter a letra H depois da numeração, significando que a especificação do aço é feita pela sua

temperabilidade e não por sua composição química. Isso quer dizer que a aceitação ou não de um lote deste material está sujeita a uma medida de sua temperabilidade, obtida por meio de ensaio específico, e o não atendimento da composição química dentro da faixa especificada não significa que o material possa ser rejeitado. Assim um aço 5160H pode ter um teor de cromo menor que o mínimo especificado desde que atenda às especificações de temperabilidade [2].

2.4.1 Seleção empregando as curvas Jominy

O ensaio Jominy (figura 2) foi desenvolvido de modo a obter, de forma simples e rápida, informação sobre o efeito de ampla gama de velocidades de resfriamento na têmpera (ASTM A255). As curvas produzidas a partir desse ensaio dão uma visão bastante completa sobre a temperabilidade de determinado aço [1].

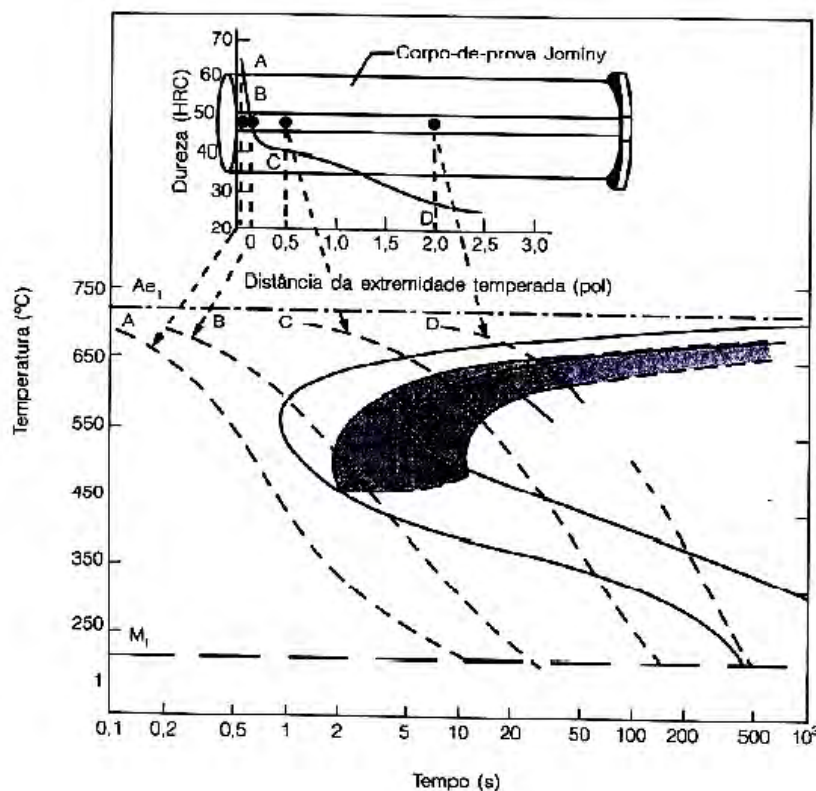


Figura 2: Corpo de prova para o ensaio Jominy, possibilidade de se obter larga gama de velocidades de resfriamento do aço [1- modificado].

As principais etapas no processo de seleção empregando curvas Jominy (figura 3) são:

- a) Estabelecer a resistência mecânica desejada em determinada posição da peça a ser fabricada (critério de projeto);
- b) Determinar a dureza (na peça acabada) que corresponde àquela resistência mecânica;
- c) Escolher o teor de martensita necessário, naquela posição da peça, em função do tipo de solicitações (cargas dinâmicas – fadiga ou cargas essencialmente estáticas). Como a dureza da martensita depende do teor de carbono, observar que se deve escolher o menor teor de carbono possível, visando à melhor tenacidade;
- d) Estabelecer a dureza após têmpera que resultará nessa dureza após revenido;
- e) Escolher um meio de têmpera compatível com a complexidade da peça (peças muito complexas ou que não devem sofrer distorções no tratamento térmico devem ser temperadas em meios menos drásticos do que água, como o óleo);
- f) Determinar, por meio de correlações de transmissão de calor, qual a posição do ensaio Jominy que sofre a mesma velocidade de resfriamento que a posição desejada na peça, quando temperada no meio selecionado;
- g) Verificar, por meio das análises das curvas Jominy, qual(is) aço(s) atinge(m) a dureza determinada no item d;
- h) Selecionar o aço em função de disponibilidade, do preço, etc. [1].

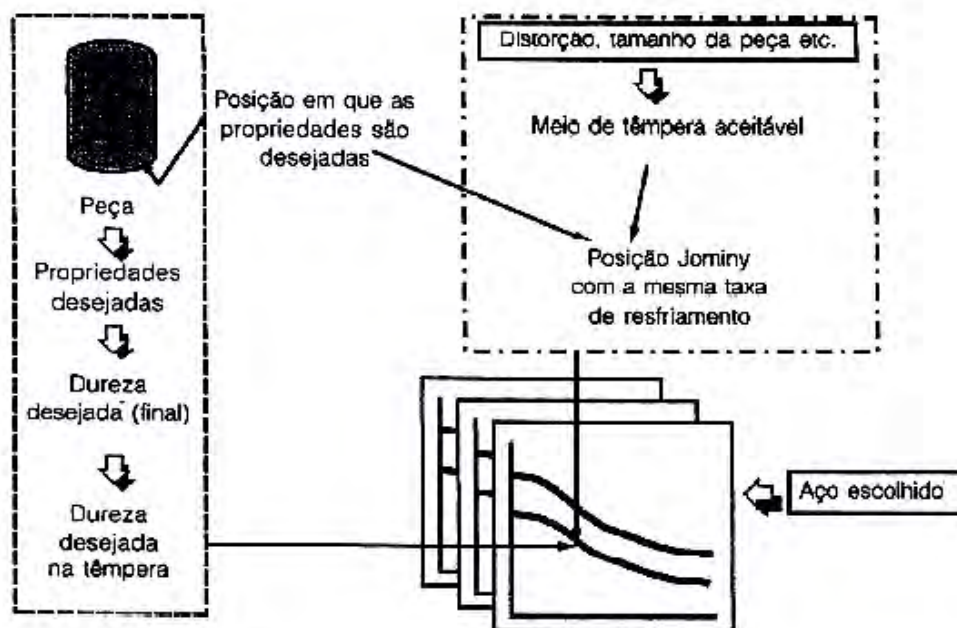


Figura 3: Principais etapas no processo de seleção de aços por temperabilidade, empregando curvas Jominy [1].

2.5 Influência dos elementos de liga

Os efeitos dos elementos de liga nos aços e nas ligas especiais envolvem não apenas alterações nas fases ou constituintes presentes em equilíbrio, mas também na maneira e velocidade com que essas fases se formam. Naturalmente, a presença de elementos de liga pode, além disso, alterar as próprias características das fases presentes [1]. A Tabela 2 mostra com mais detalhes a influência de alguns elementos de liga presentes no aço estudado.

Tabela 2: Efeitos específicos dos elementos de liga nos aços [4].

Elemento	Principais Funções
Al	1) Desoxidante eficiente; 2) Em pequenas quantidades, restringe o crescimento do grão (pela formação de óxidos ou nitretos dispersos); 3) Elemento de liga nos aços para nitretação; 4) Ponto de Fusão: 660°C; 5) Combina com o nitrogênio, reduzindo a suscetibilidade do aço ao envelhecimento pela deformação; 6) Endurece a ferrita.
Cr	1) Aumenta a resistência à corrosão e à oxidação;

	2) Aumenta a endurecibilidade; 3) Melhora a resistência a altas temperaturas; 4) Ponto de Fusão: 1920 °C; 5) Favorece a formação de carbonetos no aço; 6) Aumenta a temperabilidade; 7) Diminui um pouco a tenacidade, a resistência ao impacto e a soldabilidade.
Mn	1) Contrabalança a fragilidade devida ao S; 2) Aumenta a endurecibilidade economicamente; 3) Ponto de fusão: 1244 °C; 4) Aumenta a temperabilidade, a soldabilidade e o limite de resistência à tração, com diminuição insignificante na tenacidade; 5) Poderoso desoxidante.
Si	1) Desoxidante; 2) Aumenta a resistência de aços de baixo teor de liga; 3) Ponto de Fusão: 1410 °C; 4) Eleva o limite de escoamento; 5) Prejudica alongamento, tenacidade e usinabilidade; 6) Reduz a formação de carbonetos, pois auxilia a decomposição de cementita em ferrita.
Ti	1) Reduz a dureza martensítica e a endurecibilidade em aços ao Cr de médio Cr; 2) Impede a formação de austenita em aços de alto Cr; 3) Ponto de fusão: 1812 °C; 4) Em pequenas quantidades, refina o grão.
Mo	1) Eleva a temperatura de crescimento de grão de austenita; 2) Produz maior profundidade de endurecimento; 3) Contrabalança a tendência à fragilidade de revenido; 4) Eleva a dureza a quente, a resistência a quente e a fluência; 5) Melhora a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis; 6) Forma partículas resistentes à abrasão.
Ni	1) Aumenta a resistência de aços recozidos; 2) Aumenta a tenacidade de aços ferríticos-perlíticos (sobretudo a baixas temperaturas); 3) Torna austeníticas ligas Fe-Cr altas em Cr; 4) Ponto de fusão: 1453 °C; 5) Diminui a velocidade crítica de resfriamento, tendo assim uma maior penetração de têmpera.
Cu	1) Em quantidades até 1,5%, dissolve-se na ferrita, aumentando a resistência à corrosão atmosférica e a temperabilidade. Acima desse limite, começa a produzir endurecimento por precipitação; 2) Teores elevados reduzem a ductilidade a quente; 3) Ponto de fusão: 1084 °C; 4) Melhora o limite de resistência à tração e o limite de

	escoamento dos aços; 5) Em pequenas quantidades torna o aço resistente à ferrugem.
Nb	1) Em aços inoxidáveis evita a sensitização; 2) Em aços ferramenta para trabalho em altas temperaturas; 3) Em aços de alta resistência com baixa liga é utilizado em porcentagens de 0,001 até 1%, substituindo, às vezes, o vanádio ou outros elementos de liga; 4) Teores baixos aumentam o limite de resistência e o limite de escoamento; 5) Promove o refino do grão; 6) Melhora soldabilidade e tenacidade.

2.6 Influência dos parâmetros de laminação

Um típico sistema de laminação a quente consiste em duas principais regiões com faixas de temperaturas de deformação. Na primeira região, para temperaturas acima da temperatura de recristalização, ocorre uma completa recristalização, resultando em refinamento de grão austenítico. Na segunda região, para temperaturas menores que a temperatura de recristalização, não existe recristalização e a tensão é acumulada com o aumento dos passes, levando ao alongamento da austenita [12].

Ocorre posteriormente a tensão induzida por transformação, a qual leva à ferrita fina [13].

A temperatura de recristalização é um dos parâmetros mais importantes no controle da laminação do aço porque ela determina o nível de tensão que pode ser aplicado [12].

A retardação da recristalização da austenita em aços microligados ao Nb é devida à fixação dos grãos de austenita por carbonitreto [14].

A temperatura de recristalização é dependente de vários fatores, como: tensão, taxa de deformação, tempo entre passes e composição do aço [7].

Em termos de composição química, a relação empírica puramente baseada na composição química é dada por:

$$T_{nr} = 887 + 64C + 890Ti + 363Al - 357Si + 644Nb - 644\sqrt{Nb} + 732V - 230\sqrt{V} \quad [6].$$

Observações das etapas de laminação:

Do passe 1 (desbaste) até o passo 7, o limite de escoamento é bem próximo um do outro, com um modesto aumento e pouca mudança na força. Isso é explicado pela alta estática de recristalização [9].

Já no passe 8, que é o início da fase de acabamento, o escoamento não apresenta grandes alterações, porém a força é muito maior. Isso ocorre por já ter ocorrido recristalização total, e o aumento significativo ocorre devido à precipitação dinâmica [9].

No passe 9, além da força maior, o limite de escoamento aumenta significativamente indicando que não há recristalização, provavelmente devido à precipitação dinâmica ocorrida anteriormente [9].

Nos passes subseqüentes de acabamento, a força de rendimento começa a aumentar continuamente de passe em passe, indicando que não há mais recristalização estática e validação da obtenção de austenita alongada com deformação [9].

Na temperatura mais alta houve precipitação de Ti (N, C) e Nb (C, N), e que esses precipitados foram observados antes da execução do passe 8 (início do acabamento) [9].

No entanto, após a execução do passe 8 foram observados precipitados abaixo de 5 nm. A maioria desses precipitados é de Nb, embora os precipitados de Ti também causem o mesmo efeito. Dada a maior quantidade de Nb, bem como a formação de precipitados de Ti a altas temperaturas, é bem mais provável que os precipitados dinâmicos formados são baseados em Nb. Assim, a presença do Nb aumenta consideravelmente o limite de escoamento [9].

A dissolução de carbeto e nitreto de microligantes a altas temperaturas na austenita oferece um número de opções para subsequente re-precipitação a menores temperaturas, são eles:

- i) precipitação na austenita, permitida pela redução de temperatura, sob algum tipo de trabalho mecânico;
- ii) precipitação durante a transformação austenita-ferrita, processo onde a solubilidade é descontínua no contorno destas fases; e

iii) precipitação na ferrita, usualmente como resultado de um reaquecimento em temperaturas no *range* da ferrita, formando os precipitados alocados junto às discordâncias. Este último mecanismo tem seus efeitos equivalentes à precipitação de segunda fase martensítica [7].

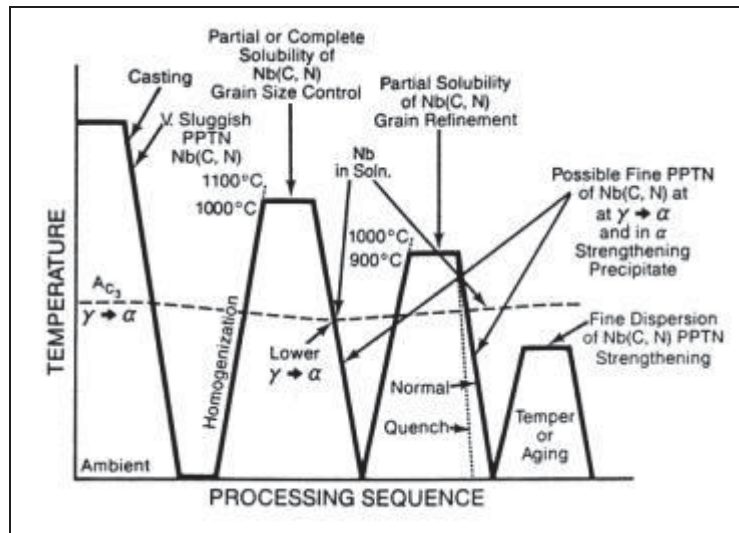


Figura 4: Efeito do Nb na microestrutura do aço microligado em vários processos [8].

Para o estudo de aços microligados, é de suma importância o conhecimento das relações de solubilidade dos microligantes. Na figura 5 é possível entender o diagrama de solubilidade do NbC, que é o precipitado de interesse neste trabalho.

Pela figura 5, pode-se notar que o NbC é resultante em quase todas as temperaturas em questão, sendo a partir daí definida algumas temperaturas para o tratamento de envelhecimento nos corpos-de-prova.

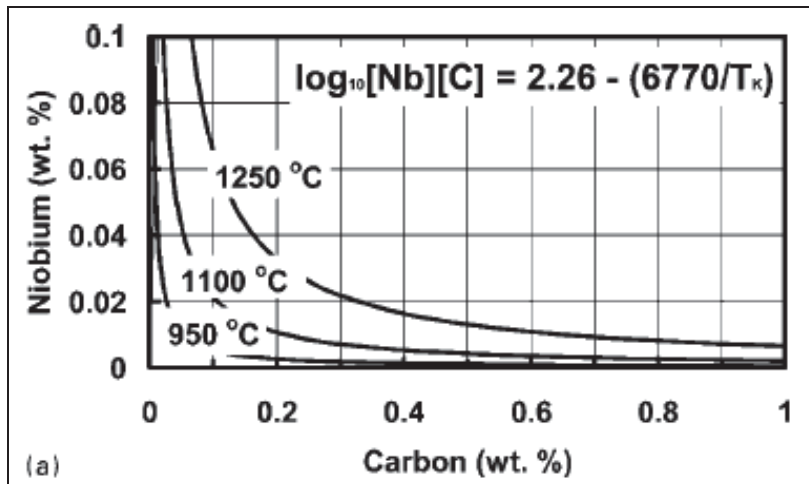


Figura 5: Diagrama e expressão de solubilidade para determinadas temperaturas para NbC [8].

2.7 Trefilação

Processo em que se obtêm produtos com seções de geométricas diversas pela tração desses produtos por uma matriz que define o perfil do trefilado [15].

Características:

- Comumente realizado a frio: encruamento;
- Pequenas reduções de seção por passe;
- Excelente qualidade superficial e dimensional;
- Propriedades mecânicas controladas [15].

2.8 Ensaios mecânicos, normas e especificações

A determinação das propriedades dos materiais é feita por intermédio de “ensaios”, assim, “ensaios mecânicos” têm por objetivo determinar as propriedades mecânicas [3].

2.8.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração é realizado seguindo as seguintes normas:

- ASTM A 370 – Método de teste padrão e definições para ensaios mecânicos de produtos siderúrgicos.

- ASTM E 8 – Métodos de teste padrão para ensaio de tração de materiais metálicos.

- EN 10002 – Materiais metálicos – ensaios de tração – parte 1.

- NBR - NM - ISO 7500 - 1 – Calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial – calibração do sistema de medição de força tração/compressão.

O teste de tração fornece informações sobre a resistência e plasticidade dos materiais sob cargas axiais [3].

Estas informações podem ser usadas nas comparações de materiais, em projetos, em controle de qualidade e outras circunstâncias [3].

Os resultados dos testes em amostras usinadas de uma parte do material podem não ser totalmente representativos das propriedades do produto inteiro ou de região diversa da que foi testada. Os resultados representam a condição de fornecimento indicada no certificado de qualidade [3].

O método é considerado satisfatório e usado extensivamente para aceitação de propósitos comerciais, nas verificações das seguintes características usualmente especificadas:

- Limite de escoamento (LE);
- Limite de resistência (LR);
- Alongamento (AL);
- Redução de área (RA) [3].

2.8.2 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza são, em resumo, baseados no princípio de penetração na superfície do metal, pela aplicação de uma carga por intermédio de um “penetrador”.

A determinação da dureza dos metais constitui um método rápido e não-destrutivo que permite avaliar as condições de fabricação e tratamento das ligas metálicas, as diferenças estruturais locais e a influência de elementos de liga e,

embora não sirva como parâmetro para o projeto de peças, correlaciona-se com razoável aproximação com algumas propriedades mecânicas, como a resistência a tração, particularmente no caso dos aços [3].

A existência da mencionada correlação pode ser explicada pela geometria das impressões obtidas nos ensaios de dureza. A figura 6, correspondente a uma impressão esférica, permite compreender melhor esse fato [3].

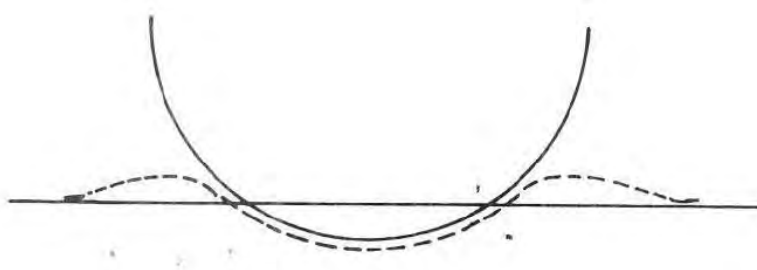


Figura 6: Deformação durante a penetração no ensaio de dureza [3].

Na figura, a linha cheia indica a impressão original obtida e a linha pontilhada a forma da impressão final, o que revela que houve uma região de deformação elástica, dentro da deformação total de natureza plástica [3].

Isso significa que o esforço necessário para produzir a impressão dependerá da tensão de escoamento e da velocidade de encruamento após ter sido ultrapassado o limite de escoamento [3].

2.8.2.1 Ensaio de dureza Brinell

O ensaio de dureza Brinell é realizado segundo as seguintes normas:

- ASTM E10 – Método de teste padrão para dureza Brinell em materiais metálicos.
- NBR NM 187-1 – Medição de dureza Brinell.

É o primeiro ensaio grandemente aceito e padronizado. Devido a J. A. BRINELL, que o divulgou em 1901, rapidamente tornou-se popular em razão da relação entre os valores resultantes e a resistência à tração [3].

A figura 7 representa esquematicamente o sistema de penetração pelo método Brinell [3].

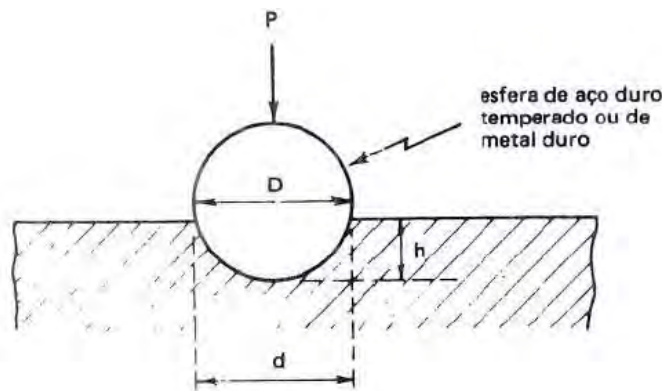


Figura 7: Método Brinell para medida de dureza: P, carga aplicada em kgf; D, diâmetro da esfera em mm; L e d, altura e diâmetro da impressão, respectivamente, em mm [3].

Uma esfera de aço, ou de outra liga, de diâmetro D, é forçada, pela aplicação de uma carga P, a penetrar no material, resultando numa “impressão” em forma de calota esférica, de diâmetro d, a qual serve para determinar um número que corresponde ao valor da “dureza Brinell” [3].

A dureza Brinell, representada por HB, corresponde ao quociente da carga aplicada pela área da impressão obtida e é expressa por:

$$H = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ (kgf/mm}^2\text{)} \quad [3]$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

As ligas utilizadas nesse trabalho foram produzidas por uma siderúrgica da região, cuja composição química encontram-se na tabela 3.

Tabela 3: Composição química do aço estudado.

C	SI	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	Sn	Cu	Nb	N
0,12	0,25	1,71	0,015	0,009	0,09	0,11	0,03	0,031	0,025	0,012	0,15	0,034	0,104

A partir do aço vazado utilizou-se como matéria-teste o fio-máquina de 12,70 mm e a partir dele algumas reduções no material trefilado conforme tabela 4.

Tabela 4: Descrição das amostras utilizadas.

Condição	Bitola (mm)		Condição	Bitola (mm)
Laminado	10,5		Laminado	12,7
Trefilado 10%	9,96		Trefilado 8%	11,7
Trefilado 15%	9,68		Trefilado 11%	11,28
Trefilado 20%	9,39		Trefilado 13%	11
Trefilado 25%	9,09		Trefilado 16%	10,65
Trefilado 30%	8,78			

3.2 Métodos

3.2.1 Envelhecimento

O envelhecimento do material foi realizado em laboratório, apenas em alguns corpos-de-prova escolhidos.

O corpo-de-prova foi colocado no forno e deixado até a temperatura determinada por 60 minutos, em seguida desligou-se o forno e o corpo-de-prova permaneceu dentro do mesmo até que chegasse a temperatura ambiente.

3.2.2 Ensaio de tração

Não houve a necessidade de se confeccionar corpos-de-prova devido às dimensões das amostras. Para a realização do ensaio de tração, as amostras foram apenas desempenadas em um martelo de borracha.

O ensaio de tração foi realizado em todas as amostras.

Os ensaios foram realizados no equipamento universal INSTRON - modelo 8801 de 100 kN de capacidade, com velocidade de deformação de 0,5 mm/min e pré-carga de 0,1 kN para ajuste do corpo-de-prova. Para a determinação da tensão de escoamento foi aplicado o procedimento 02% *offset*.

3.2.3 Ensaio de dureza Brinell

Os corpos-de-prova utilizados para a realização do ensaio de dureza Brinell foram confeccionados na forma de “bolacha” com 20 mm de altura.

O ensaio de dureza Brinell foi realizado em todas as amostras.

Este ensaio foi realizado no equipamento de dureza da marca WOLPERT, com carga de 187,5 kgf (1875 MPa) e esfera de aço com diâmetro de 2,5 mm.

3.2.4 Microscopia óptica com ataque químico

A análise das amostras por microscopia óptica com ataque químico foi realizada com o objetivo de se observar a microestrutura do aço em análise, e foi realizado em apenas duas amostras a título de conhecimento.

Não houve necessidade de embutimento das amostras. As mesmas foram cortadas com aproximadamente 200 mm de altura e, posteriormente, lixadas em lixas d’água de granulometria decrescente (de #100 até #1000) e polidas com alumina e uma solução de sílica coloidal em suspensão, tipo OPU, em pano tipo DP PLUS. O reagente químico utilizado para revelação da microestrutura do material foi Nital a 2%, aplicado de três a cinco segundos.

As imagens foram capturadas por meio de um microscópio óptico de marca NIKON, modelo EPIPHOT 200 e uma câmera do tipo SPOT Insight QE, utilizando o programa SPOT.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios mecânicos realizados, nas condições bruta e envelhecida.

Tabela 5: Resultados dos ensaios mecânicos para amostras na condição bruta e na condição envelhecida para diferentes bitolas.

Condição	Bitola	T. E.	LR (MPa)	LE (MPa)	AL (%)	RA (%)	DR (HB)
Laminado	10,50 mm	Bruto	656,0	462,0	30,5	69,4	201,0
		150°C	671,0	479,0	29,1	69,6	198,0
		200°C	682,1	481,2	28,4	69,9	195,0
		250°C	688,0	512,5	25,7	70,8	195,0
		300°C	664,4	490,0	26,9	74,0	191,0
Tefilado 10%	9,96 mm	Bruto	772,0	724,5	11,4	65,0	244,0
		150°C	772,0	708,3	12,8	60,4	255,0
		200°C	799,3	749,0	12,9	65,0	241,5
		250°C	807,7	771,3	14,7	66,4	254,5
		300°C	815,7	766,3	17,6	66,2	269,0
Tefilado 15%	9,68 mm	Bruto	802,7	752,7	11,6	61,7	257,5
		150°C	794,0	740,7	11,9	64,4	249,0
		200°C	832,0	777,3	13,1	65,7	263,0
		250°C	763,7	663,7	12,7	63,3	288,5
		300°C	842,7	824,0	14,6	66,4	285,0
Tefilado 20%	9,39 mm	Bruto	835,3	765,3	12,9	60,1	252,0
		150°C	838,7	773,0	11,7	63,8	257,5
		200°C	856,0	778,0	12,6	63,2	269,0
		250°C	874,3	827,3	15,1	64,1	285,0
		300°C	882,3	818,7	15,9	63,8	309,5
Tefilado 25%	9,09 mm	Bruto	785,0	742,7	12,2	66,0	272,0
		150°C	828,0	761,3	12,6	62,0	260,0
		200°C	843,7	794,3	11,9	62,4	263,0
		250°C	855,0	741,7	10,7	61,8	302,0
		300°C	790,7	637,7	12,8	63,2	298,0
Tefilado 30%	8,78 mm	Bruto	847,0	788,7	10,4	62,7	272,0
		150°C	848,7	784,7	11,3	61,2	266,0
		200°C	821,0	716,7	11,3	63,6	275,0
		250°C	717,3	627,7	9,4	58,1	302,0
		300°C	890,3	808,3	13,1	63,3	302,0
Laminado	12,70 mm	Bruto	688,6	423,0	30,5	56,1	212,0
Trefilado 8%	11,70 mm	Bruto	878,4	712,8	14,5	50,4	230,0
Trefilado 11%	11,28 mm	Bruto	914,3	774,2	14,9	50,2	234,0
Trefilado 13%	11,00 mm	Bruto	953,6	799,2	11,8	50,5	244,0
		300°C	1013,4	884,9	14,9	58,7	300,0
		400°C	872,8	801,5	17,2	58,2	276,0
		500°C	845,6	670,0	20,7	61,7	258,0
		600°C	547,7	438,2	31,5	80,6	232,0
Trefilado 16%	10,65 mm	Bruto	983,9	844,1	11,9	45,3	244,0

4.1 Microestrutura

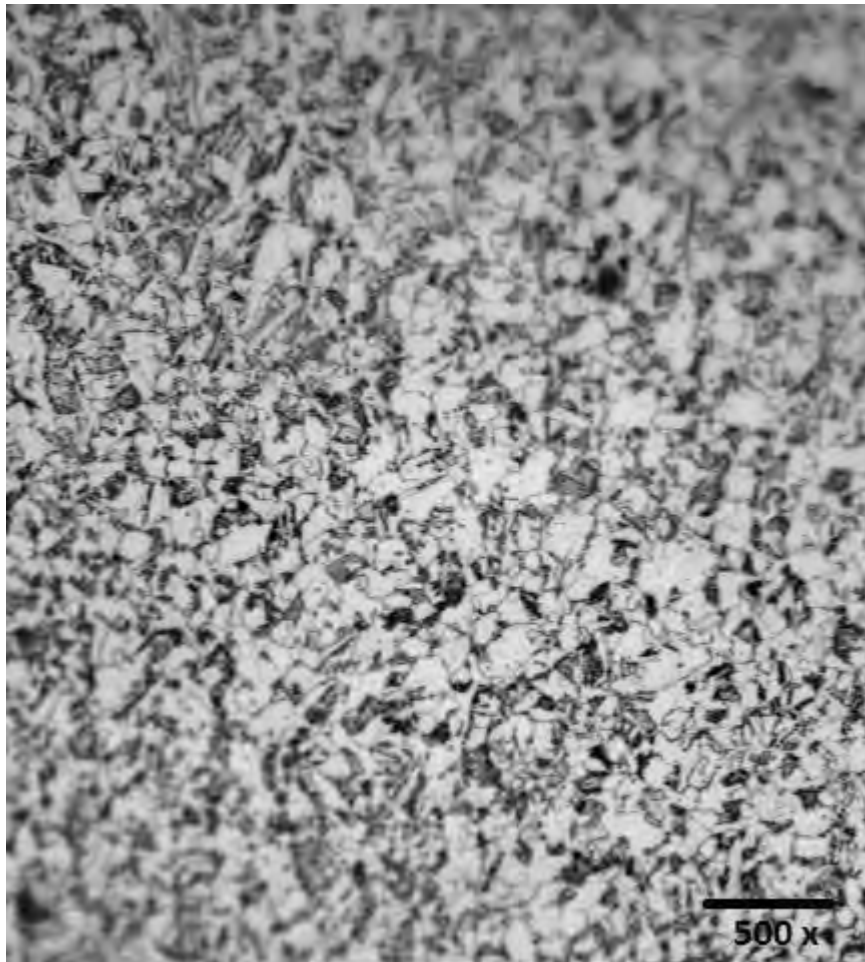


Figura 8: Micrografia do aço estudado com ampliação de 500x.

A microestrutura do aço estudado é constituída de ferrita, perlita e constituinte acicular.

4.2 Resultados Gráficos

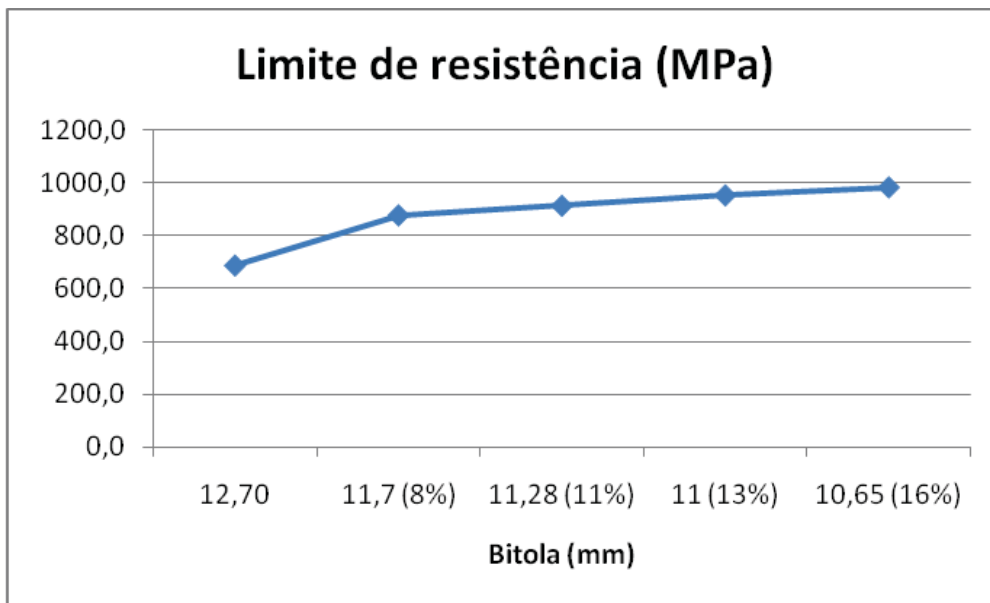


Figura 9: Influência da redução na trefilação sobre o limite de resistência do material sem tratamento térmico.

Utilizando-se uma amostra bruta (sem tratamento térmico) variando apenas a sua bitola através da trefilação, percebe-se que, quanto maior a redução da bitola maior o limite de resistência.

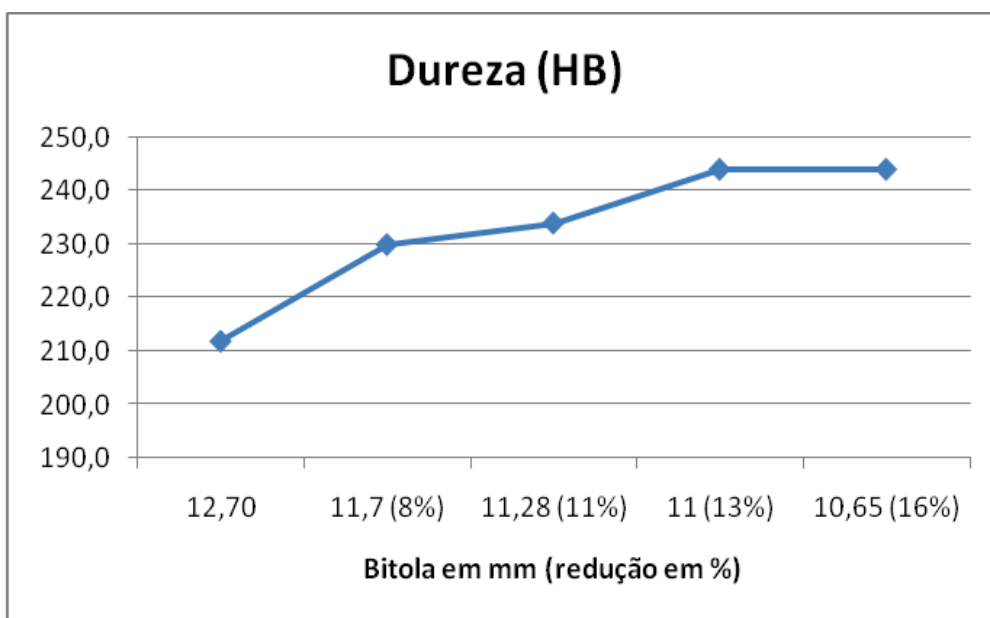


Figura 10: Influência da redução na trefilação na dureza do material sem tratamento térmico.

Para as mesmas condições da figura anterior, percebe-se um aumento significativo da dureza a medida que se tem a redução da bitola pela trefilação.

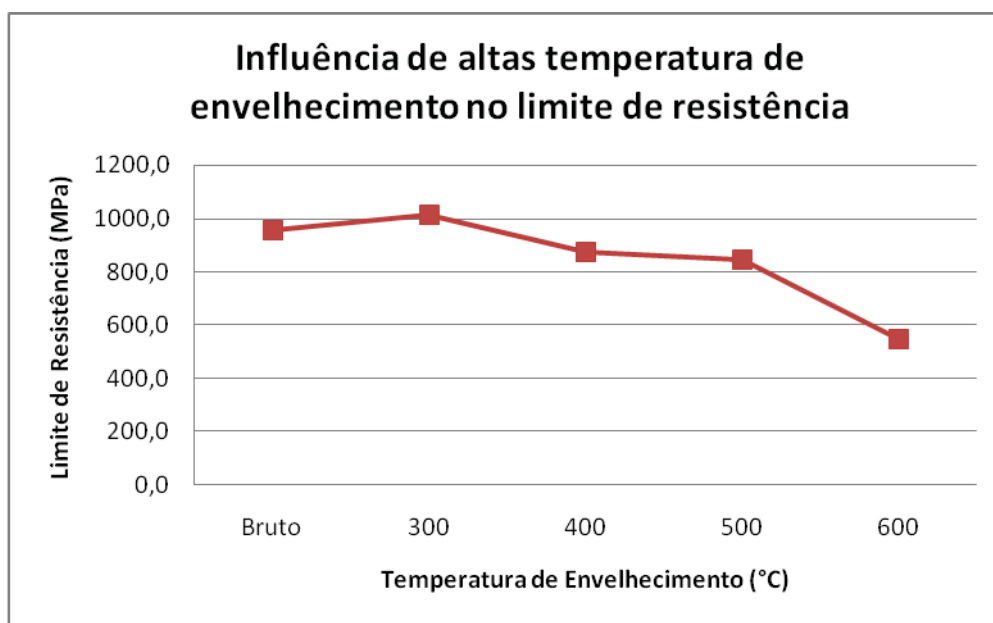


Figura 11: Influência das altas temperaturas de envelhecimento no limite de resistência do material.

Utilizando-se uma amostra na condição de fio-máquina (laminada, sem trefilar) variando apenas as temperaturas de envelhecimento no corpo-de-prova, percebe-se que, quanto maior a temperatura de envelhecimento pior são as propriedades do material. Observa-se uma grande queda do limite de resistência a tração.

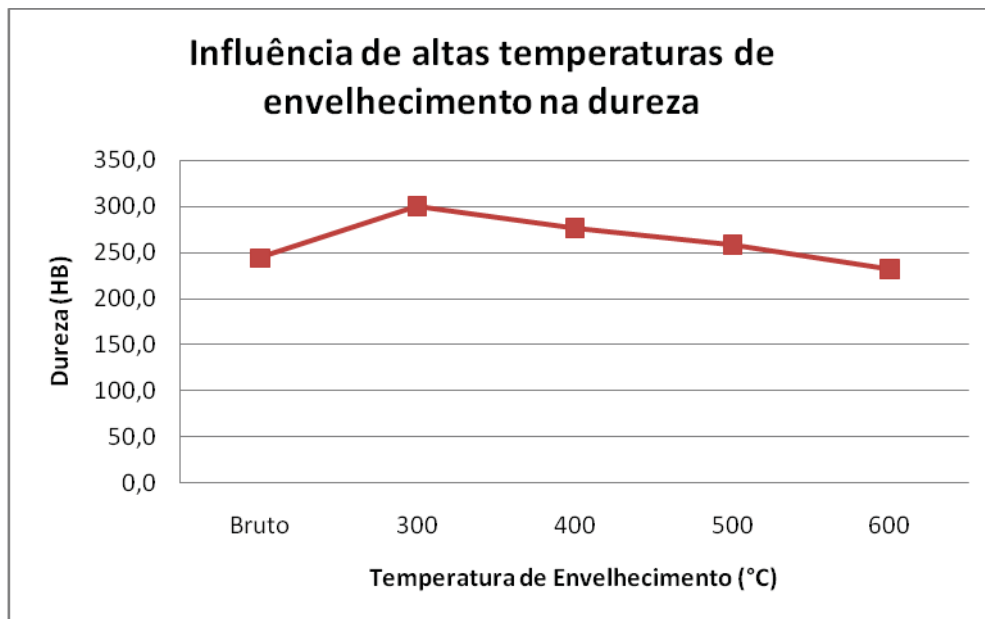


Figura 12: Influência das altas temperaturas de envelhecimento na dureza do material.

Ainda variando as temperaturas de envelhecimento e utilizando-se da mesma bitola, percebe-se que há uma grande queda dos valores de dureza para altas temperaturas de envelhecimento.

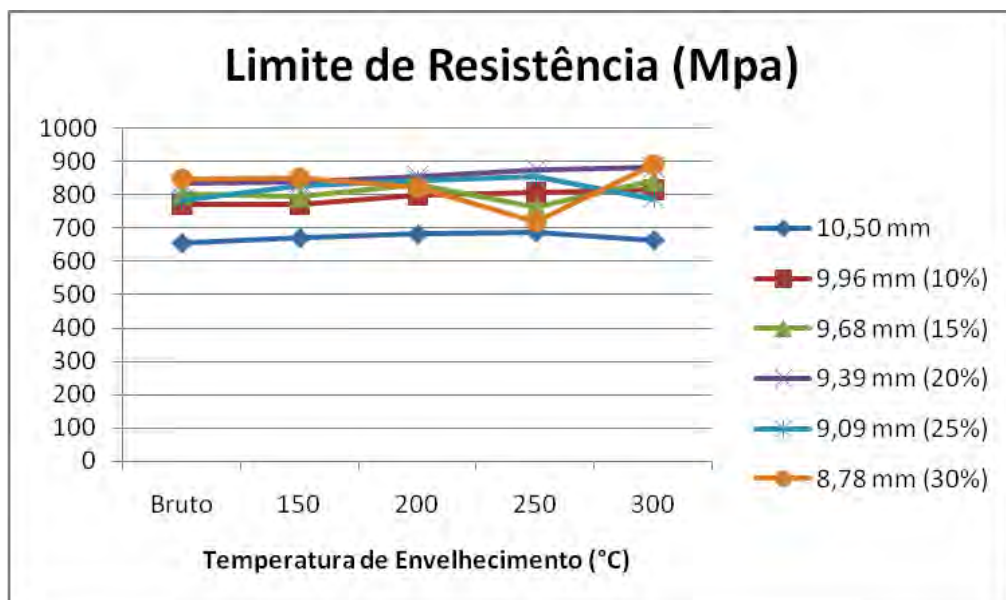


Figura 13: Comparação do efeito da temperatura de envelhecimento e da redução na trefilação sobre o limite de resistência do material.

Comparando-se reduções de bitola através da trefilação e diferentes temperaturas de envelhecimento, percebe-se que, na maioria das reduções houve

um leve aumento do limite de resistência com o aumento da temperatura de envelhecimento, porém na temperatura de 250 °C houve uma queda brusca do limite de resistência, que voltou a elevar-se um pouco na temperatura de 300 °C.

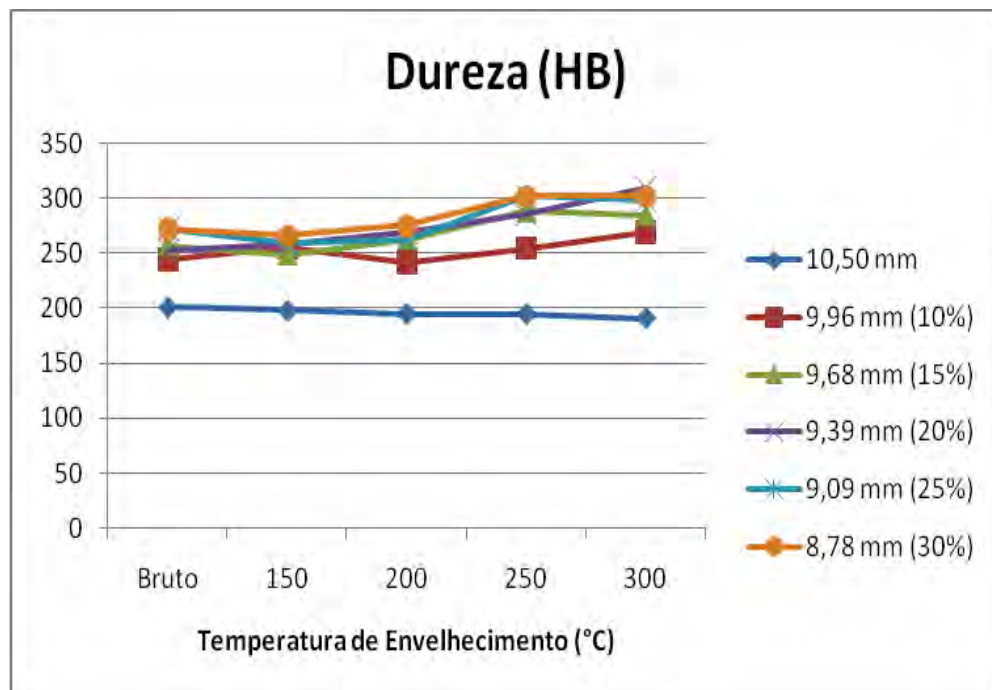


Figura 14: Comparação do efeito da temperatura de envelhecimento e da redução na trefilação sobre a dureza do material.

No caso da dureza, para todas as reduções o valor se manteve praticamente estável até a temperatura de 200 °C. Em seguida, houve um aumento brusco da dureza na temperatura de 250 °C que praticamente se manteve na temperatura de 300 °C.

Já para o material na condição laminado (bitola de 10,5 mm) a dureza se manteve constante em praticamente todas as temperaturas de envelhecimento, mas apresentou uma leve queda a 300 °C.

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos percebe-se que, à medida que se têm a redução do material na trefilação, tanto o limite de resistência quanto a dureza do material aumentam.

Foram feitos testes também em dois materiais com bitolas iguais, variando apenas a temperatura de envelhecimento. Para estes materiais observou-se um primeiro pico na temperatura de 300 °C, onde se tem um aumento do limite de resistência e da dureza. Porém, à medida que se obtém um aumento desta temperatura de envelhecimento, obtém-se a diminuição destes valores também.

A partir destas observações pode-se concluir que para maiores reduções de bitola obtêm-se maiores valores de limite de resistência e de dureza; porém a temperaturas mais altas de envelhecimento perde-se um pouco destas propriedades.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SILVA, André Luiz V. da Costa e, Paulo Roberto Mei. **Aços e ligas especiais**. 3.Ed. revista. São Paulo: Editora Blucher, 2010.
- [2] TSCHIPTSCHIN, Prof. Dr. André Paulo. **Mundo dos Aços Especiais – Módulo I – Processos de Fabricação**. São Paulo. 2011.
- [3] CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2. Ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [4] CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 4. Ed. São Paulo: ABM, 1979.
- [5] REMY, A. et al. **Materiais**. 2. Ed. Paraná. 2002.
- [6] T.M.Maccagno, J.J. Jonas, S. Yue, B.J. McCrady, R. Slobodian, D. Deeks, **ISIJ International** 34 (1994) 917.
- [7] GLADMAN, T. **The physical metallurgy of microalloyed steels**. The Institute of Materials, University Press, Cambridge, 1997.
- [8] TITHER, G. **Niobium in steel casting and forgings**.
- [9] ANIJAN, S. H. M., Yue, S. **The necessity of dynamic precipitation for the occurrence of no-recrystallization temperature in Nb-microalloyed steel**. **Materials Science and Engineering A** 528 (2011) 803-807.
- [10] WARBURTON, P. **Iron and Steel Institute Special Report**, n. 94, p. 161, 1965.
- [11] ANDRADE, A. S. **Notas de Aula. Elementos Orgânicos de Máquinas I At-096**. UFPR. 2011.
- [12] R. Priestner, A.K. Ibraheem, **Materials Science and Technology** 16 (2000) 1267.
- [13] P.D. Hodgson, R.K. Gibbs, **ISIJ International** 32 (1992) 1329.
- [14] O. Kwon, A.J. DeArdo, **Acta Metallurgica et Materialia** 39 (1991) 529.
- [15] <http://www.joinville.ifsc.edu.br/~valterv/Processos%20de%20Fabrica%C3%A7%C3%A3o/aula%204%20Trefilacao.pdf> acessado em 05 de novembro de 2011.