



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

OTINIEL DE SOUSA VILA NOVA

**ANÁLISE DA TEMPERABILIDADE DE UM AÇO ABNT 1024
APLICADO EM VERGALHÃO DA EMPRESA SINOBRA S/A.**

MARABÁ
2013

OTINIEL DE SOUSA VILA NOVA

**ANÁLISE DA TEMPERABILIDADE DE UM AÇO ABNT 1024
APLICADO EM VERGALHÃO DA EMPRESA SINOBRÁS S/A.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus de Marabá, Universidade Federal
do Pará. Orientador: Prof. M.Sc. Luis
Fernando Nazaré Marques.

MARABÁ
2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Biblioteca II da UFPA. CAMAR, Marabá, PA

Vila Nova, Otiniel de Sousa

Análise da temperalidade de um aço ABNT 1024 aplicado em vergalhão da empresa SINOBRAS S/A / Otiniel de Sousa Vila Nova ; orientador, Luís Fernando Nazaré Marques. — 2013.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2013.

1. Aço - Metalurgia. 2. Aço - Tratamento térmico. 3. Martensita. I. Marques, Luís Fernando Nazaré, orient. II. Título.

OTINIEL DE SOUSA VILA NOVA

ANÁLISE DA TEMPERABILIDADE DE UM AÇO ABNT 1024 APLICADO EM VERGALHÃO DA EMPRESA SINOBRÁS S/A.

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus de Marabá, Universidade Federal
do Pará. Orientador: Prof. M.Sc. Luis
Fernando Nazaré Marques.

Data de aprovação: _____ de _____ de 2013.

Banca examinadora:

Prof. M.Sc. Luis Fernando Nazaré Marques – UFPA - Orientador

Prof. Esp. Márcio Paulo de Araújo Mafra – UFPA - Membro interno

Prof. M.Sc. Marcio Correa de Carvalho - Membro interno

Aos meus pais, pelo amor e apoio incondicional.
A DEUS, pela graça, misericórdias e bênçãos infinitas.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por me mostrar, em cada dia de minha vida, que não importa o quão pequeno eu seja, eu posso tudo, pois o maior está ao meu lado.

A minha mãe, Asmavete, pelas palavras de sabedoria, de amor, de incentivo, pelas lutas que travou ao meu lado, enfim pela imensa lista que só prova que ela é a melhor mãe do mundo.

Ao meu pai, pelo trabalho e suor derramado, pelo apoio e por me mostrar que não importa aonde chegemos ainda podemos preservar o espírito mágico de um menino.

A minha irmã, Desirée, por trazer uma alegria única aos meus dias.

A minha namorada, Keliane, por me fazer sonhar mais alto e mais longe.

Ao meu orientador professor Luis Fernando, pelo apoio acadêmico.

Aos meus amigos, Rayson Willber, Renata Monteiro e Lílian Carolina, por todos os bons momentos que compartilhamos juntos.

Ao professor Marcio Mafra, por sua amizade e companheirismo para com nossa turma.

A todos os Professores que contribuíram para a minha formação profissional.

A todos os alunos da turma de Engenharia de Materiais 2007, que fizeram essa turma ser única e especial.

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

Pense como um homem que age.
Aja como um homem que pensa.

(Henry Bergson)

RESUMO

O aço é o material metálico mais utilizado no mundo, fato este devido a sua grande versatilidade de propriedades e conseqüentemente de aplicações e ainda sua capacidade de adequação através dos tratamentos térmicos. A têmpera é o tratamento térmico que visa aumentar a dureza do aço através da formação da estrutura metaestável denominada martensita, sendo que a obtenção dessa fase depende de fatores como teor de carbono e elementos de liga, que é característica de cada tipo de aço. Como forma de analisar a capacidade de um aço em formar martensita adota-se ensaios tecnológicos que analisam a resposta do material ao tratamento de têmpera em condições controladas, sendo que um dos principais é o ensaio de temperabilidade Jominy, no qual a peça é resfriada em água corrente a partir de uma de suas extremidades e posteriormente tem sua dureza analisada ao longo do corpo de prova utilizado. Este trabalho buscou avaliar a temperabilidade de um aço ABNT 1024 e compara-lo com os valores obtidos para outro aço, o ABNT 1045 e obteve como resultados uma diferenciação nas durezas encontradas e a constatação de que este aço não adquire têmpera significativa, resultando apenas em uma pequena camada endurecida, característica essa que se perde rapidamente com o distanciamento da extremidade temperada da peça.

Palavras chaves: Aço 1024, Temperabilidade, Jominy, Comparação.

ABSTRACT

Steel is the metallic material most used in the world, a fact due to its great versatility of properties and applications and hence also their ability to fit through the heat treatments. Quenching is the heat treatment that aims to increase the hardness of the steel through the formation of metastable structure called martensite, and this treatment depends on factors such as carbon and alloying elements, and is characteristic for each type of steel. In order to examine the capability of a steel to form martensite is adopted technological tests which analyzes the response to treatment of the material in controlled conditions of temperature, being the most important is a Jominy hardenability test, in which the piece is cooled in water stream from one of its ends and its hardness is subsequently analyzed over the specimen used. This study aimed to assess the hardenability of a steel ABNT 1024 and compares it with the values obtained for other steel ABNT 1045 and the results obtained difference in hardness found and the realization that this steel does not acquire significant hardening, resulting only in a small hardened layer, a characteristic that is lost rapidly with distance from the quenched end of the piece.

Keywords: 1024 steel alloy, Hardenability, Jominy, Comparison.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Efeito de diferentes tratamentos térmicos sobre a resistência a tração de um aço 1040.....	18
Figura 2: Exemplo de diagrama TTT com as principais zonas de transformação.	19
Figura 3: Esquema da forma de disposição dos átomos na estrutura metaestável martensita.....	20
Figura 4: Apresentação da estrutura martensítica de um aço vista ao microscópio. .	21
Figura 5: Efeito do meio de resfriamento sobre a temperatura da superfície e do centro do material.....	22
Figura 6: Diagramas TTT para aços com (a) baixo teor de C e (b) médio teor de C.	23
Figura 7: Faixa de temperabilidade contendo as durezas máximas e mínimas a serem encontradas em um aço SAE 1045	24
Figura 8: Representação gráfica de um ensaio Grossman para um aço SAE 1090 .	26
Figura 9: Modelo simplificado de um aparato de ensaio Jominy	27
Figura 10: Gráfico Dureza x Distancia típico de um ensaio Jominy.	28
Figura 11: Corpo de prova Jominy padrão, medidas em milímetros.	28
Figura 12: Posição na curva Jominy versus diâmetro de barras redondas nos diversos meios de resfriamento.....	29
Figura 13: Fluxograma representativo da metodologia utilizada neste trabalho.....	34
Figura 14: Corpos de prova usinados prontos para serem ensaiados	35
Figura 15: Amostra para metalografia cortada e embutida a quente.....	35
Figura 16: Etapas de ajuste no aparato de ensaio Jominy, medida da altura do jato de água (a); Alinhamento do corpo de prova com o jato d'água (b e c); posição de abertura rápida dos registros (d)	36
Figura 17: Corpos de prova assim que inseridos no forno, na temperatura de austenitização	37

Figura 18: Corpo de prova em diferentes instantes do ensaio, com menos de um minuto (<i>a</i> e <i>b</i>), com aproximadamente cinco minutos (<i>c</i>) e com mais de oito minutos (<i>d</i>).....	38
Figura 19: Macrografia mostrando a presença do “anel martensítico” na extremidade da peça (Ataque Nital 2%).....	39
Figura 20: Micrografias para a) contendo fase martensítica e b) contendo perlita e ferrita. (Ataque Nital 2%)	39
Figura 21: Gráfico comparativo dos resultados Jominy nos três corpos de prova	41
Figura 22: Diagrama TTT para o aço 1024 (Adaptado).....	41
Figura 23: Gráfico comparativo entre valores de dureza para o aço ABNT 1045 e ABNT 1024.....	43
Figura 24: Diagramas TTT para os aços 1024 e 1045, mostrando o tempo de início de transformação da austenita e também a temperatura de início de formação da martensita.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Severidade H da têmpera para diversas condições de resfriamento	22
Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço 1024 encontradas na literatura (Para condição de peça trabalhada a quente)	30
Tabela 3: Faixa de composição química para o aço 1024	31
Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço 1045 encontradas na literatura (Para condição de peça trabalhada a quente)	31
Tabela 5: Faixa de composição química para o aço 1045	32
Tabela 6: Temperatura de austenitização para aços com temperabilidade garantida (adaptado)	36
Tabela 7: Resultados da medição de dureza na escala Vickers para os três corpos de prova	40
Tabela 8: Valores de dureza obtidos para o aço 1045.	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C	Carbono (Elemento químico)
D_c	Diâmetro crítico
H	Severidade de têmpera
Mn	Manganês
MPa	Mega Pascal
P	Fósforo
S	Enxofre
SAE	Society of Automotive Engineers
TTT	Tempo – Temperatura – Transformação
UFPA	Universidade Federal do Pará

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS.....	13
SUMÁRIO.....	14
1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS	17
2.1. Objetivo geral	17
2.2. Objetivos específicos.....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS	18
3.2. A TÊMPERA.....	19
3.2.1. Têmpera e velocidade de resfriamento	21
3.2.2. Temperabilidade dos aços	23
3.3 ENSAIOS DE TEMPERABILIDADE DOS AÇOS.	25
3.3.1. Ensaio Grossman.....	25
3.3.2. Ensaio Jominy	26
3.4. Aços hipoeutetóides	29
3.4.1. Aço ABNT 1024.....	30
3.4.2. Aço ABNT 1045.....	31
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
4.1. Materiais.....	33
4.2. Metodologia.....	33
4.2.1. Obtenção dos corpos de prova	34
4.2.2. O ensaio Jominy.....	35

4.2.3. Análise metalográfica.....	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
5.1. Metalografia.....	39
5.2. Ensaio Jominy para o aço ABNT 1024.....	39
5.3. Comparação ABNT 1024 / ABNT 1045.....	42
6. CONCLUSÃO.....	45
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

1. INTRODUÇÃO

O aço é um dos produtos mais versáteis do mundo, sendo utilizado desde embalagens de alimentos até na fabricação de grandes estruturas da construção civil ou naval. A vasta utilização desse material mundo afora se deve a sua versatilidade no que se refere as suas propriedades mecânicas, isso aliado ao seu baixo custo quando comparado a outros materiais metálicos. As propriedades dos aços estão ligadas a fatores como sua composição química e microestrutura, o que torna determinado aço propício para algumas aplicações e inadequado para outras [1].

As operações de tratamento térmico consistem em ciclos de aquecimento resfriamento controlado que tem por objetivo provocar alterações na microestrutura das ligas de aço e assim melhorar suas propriedades físicas, adequando estas a determinadas aplicações sem que seja necessário gerar qualquer mudança na sua composição química [2]. A têmpera é um tratamento térmico que visa obter nos aços a estrutura metaestável martensita, que tem por característica a elevada dureza e resistência a abrasão [3].

Para avaliar as possibilidades de utilização de um determinado aço em aplicações que exijam elevada dureza e que para tal sejam submetidos a operações de têmpera pode-se utilizar o ensaio Jominy como forma de obter dados concretos sobre a microestrutura e dureza do material ensaiado e assim definir a temperabilidade do mesmo, conhecendo quais as respostas que se pode esperar na peça após o tratamento em função do tamanho ou mesmo de geometria da peça. A temperabilidade de um aço pode ser influenciado por diversos fatores porém o mais determinante é o teor de carbono presente no material, sendo maior tanto quanto maior o teor de C presente no mesmo [4].

Estudar a capacidade de adequação dos aços a determinadas aplicações através de tratamentos térmicos mostra-se importante pois permite determinar em quais situações este aço pode ser ou não aplicado, permitindo a escolha de materiais que tenham baixo custo e ainda sim propiciem segurança na aplicação prática da peça em questão.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Analisar as características do aço ABNT 1024 quanto a sua temperabilidade no que se refere a dureza máxima obtida e profundidade de têmpera.

2.2. Objetivos específicos

Realizar ensaio de temperabilidade Jominy em uma amostra de aço 1024.

Realizar análise da microestrutura do material como obtido buscando vestígios de tratamentos térmicos prévios e modo de fabricação;

Medição da dureza resultante no corpo de prova após o tratamento térmico;

Análise dos resultados obtidos em confronto com o gráfico TTT do material;

Comparação dos resultados obtidos para o aço 1024 com os obtidos por Lima (2012) para o aço 1045.

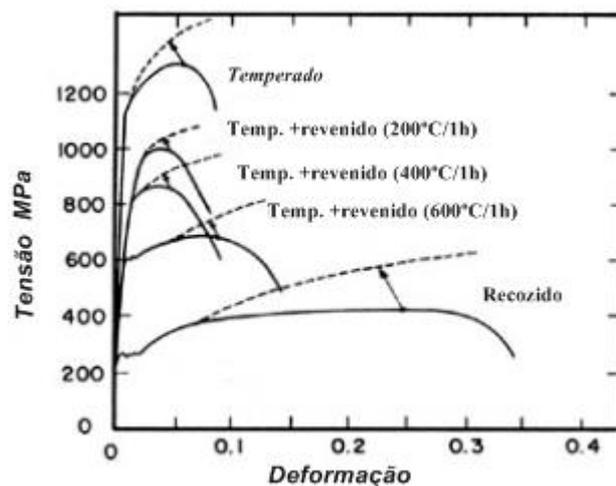
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. TRATAMENTO TÉRMICO DOS AÇOS

O aço é um material que pode ser utilizado nas mais diversas aplicações, uma das características que permitem essa versatilidade é a possibilidade de adequação de suas propriedades através dos processos de tratamentos térmicos.

Tratamento térmico pode ser descrito como um ciclo controlado de aquecimento e resfriamento do metal, objetivando a modificação de sua microestrutura e conseqüentemente a mudança nas propriedades mecânicas do mesmo [5]. A Figura 1 mostra a influencia dos tratamentos térmicos sobre a resistência a tração de um aço.

Figura 1: Efeito de diferentes tratamentos térmicos sobre a resistência a tração de um aço 1040

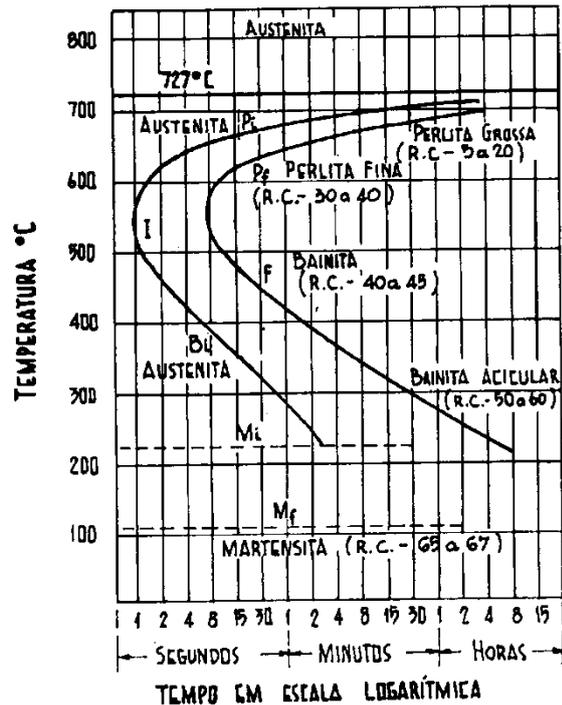


Fonte: Machado.

As operações de tratamento térmico dependem principalmente do processo de resfriamento do material. De acordo com o tempo em que esse resfriamento leva para ocorrer tem-se como resultado diferentes transformações microestruturais. Para compreender melhor os processos que ocorrem no tratamento térmico utiliza-se o

diagrama denominado TTT (Tempo, Temperatura e Transformação), que relaciona as transformações que ocorrem no material em decorrência da variação de temperatura ao longo do tempo de tratamento [4]. A Figura 2 mostra um exemplo de diagrama TTT.

Figura 2: Exemplo de diagrama TTT com as principais zonas de transformação.



Fonte: Chiaverini (2008)

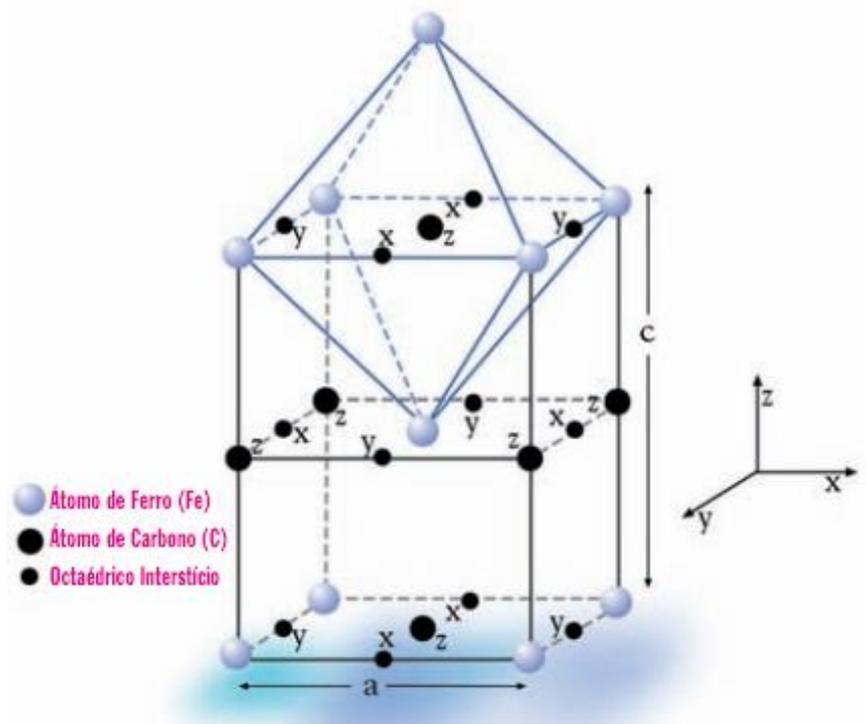
3.2. A TÊMPERA

O tratamento térmico de têmpera consiste no aquecimento do metal acima da temperatura de austenitização seguido de um resfriamento rápido. A velocidade de resfriamento é necessária para evitar a transformação da austenita em ferrita ou cementita mais perlita, com isso obtém-se a estrutura metaestável denominada martensita [6].

A martensita caracteriza-se por ser uma solução sólida supersaturada de carbono resultante da retenção dos átomos de C em uma estrutura tetragonal de corpo centrado, que surge como resultado da não difusão do carbono no material e

sua consequente retenção dentro da estrutura. O carbono retido na martensita provoca intensas deformações na rede cristalina do material e, por esse motivo, gera elevados graus de dureza na peça temperada [6]. A Figura 3 mostra uma representação esquemática da forma como os átomos se arranjam dentro da estrutura martensítica.

Figura 3: Esquema da forma de disposição dos átomos na estrutura metaestável martensita



Fonte: Armco (2004)

Vista ao microscópio a martensita apresenta o aspecto de placas finas que se destacam do fundo composto por austenita retida, como mostra a Figura 4.

Figura 4: Apresentação da estrutura martensítica de um aço vista ao microscópio.



Fonte: cimm.com.br

3.2.1. Têmpera e velocidade de resfriamento

A velocidade de resfriamento é um fator preponderante no processo de têmpera, por isso adota-se o valor de Velocidade crítica que corresponde a velocidade necessária para que toda a estrutura obtida na peça seja martensítica [4]. A velocidade de resfriamento depende do meio utilizado para a realização da têmpera, que pode ser Óleo, Água ou Salmoura, na sequência da menor para a maior taxa de resfriamento, sendo que estas taxas ainda podem ser ampliadas ao promover a agitação do meio.

Quanto maior a severidade da têmpera tanto maior será a obtenção de martensita na peça e maior também será a tensão residual, podendo resultar em trincas ou empenamentos [4;7]. Para medir a severidade da têmpera toma-se como base a água a 18°C, atribuindo-se a ela o valor 1, representado por H=1, atribuindo-se aos outros meios valores comparativos a esse [4] como mostra a Tabela 1.

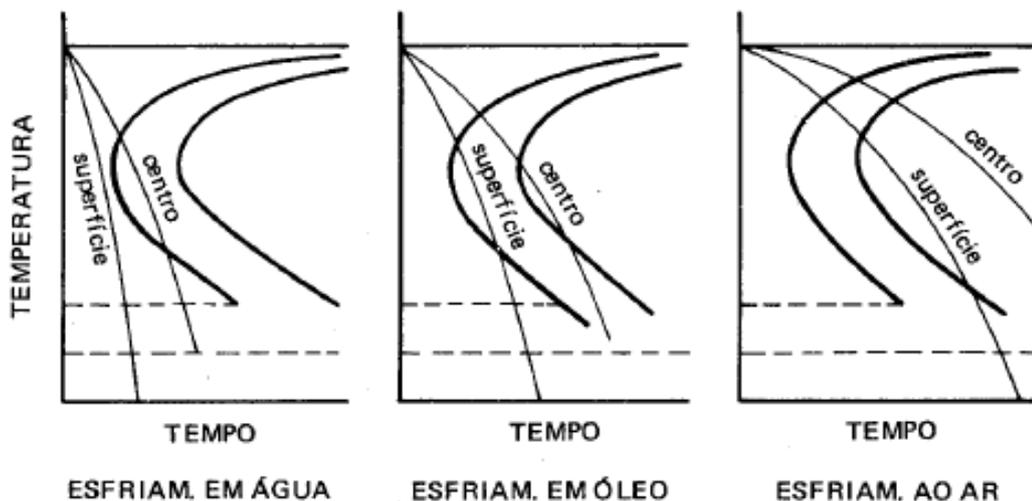
Tabela 1: Severidade H da têmpera para diversas condições de resfriamento

Estado de agitação do meio de resfriamento	Óleo	Água	Salmoura
Nenhuma	0,25 a 0,30	1,0	2,0
Pouca	0,30 a 0,35	1,0 a 1,1	2,0 a 2,2
Moderada	0,35 a 0,40	1,2 a 1,3	-
Boa	0,4 a 0,5	1,4 a 1,5	-
Forte	0,5 a 0,8	1,6 a 2,0	-
Violenta	0,8 a 1,1	4,0	5

Fonte: ASM METALS HANDBOOK Vol. 4

Valores de H mais brandos são preferíveis para aços com melhor capacidade de formar martensita, pois previnem os defeitos da têmpera, restando as condições mais severas para aços com baixa temperabilidade ou em peças no qual se busque uma profundidade de têmpera maior [4]. A Figura 5 mostra a diferença entre o resfriamento no centro e na superfície para três diferentes meios.

Figura 5: Efeito do meio de resfriamento sobre a temperatura da superfície e do centro do material.



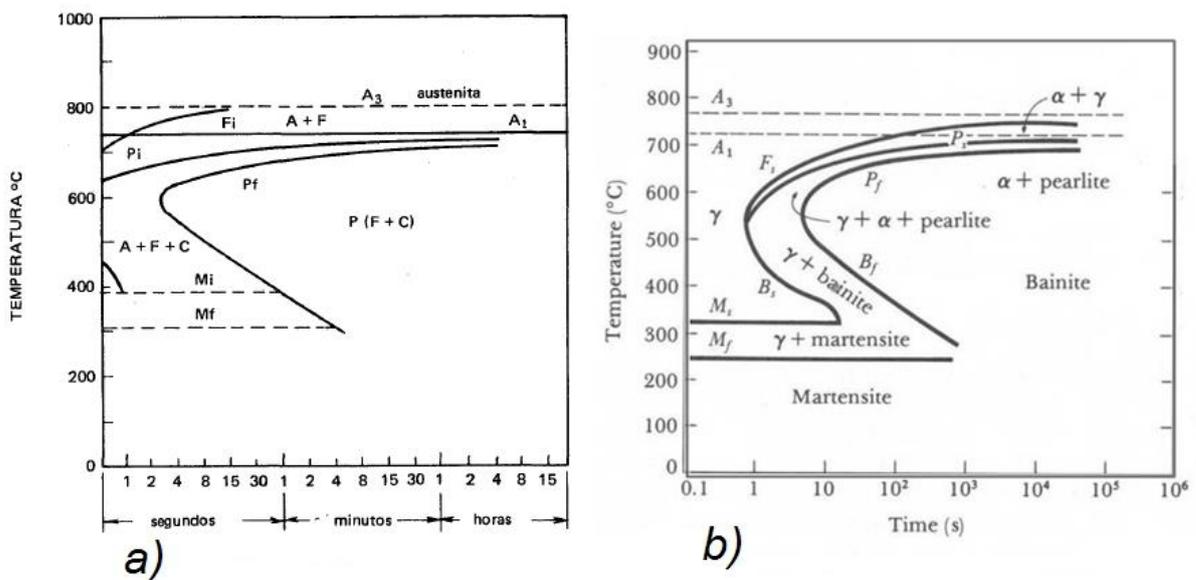
Fonte: Chiaverini (2008)

3.2.2. Temperabilidade dos aços

A capacidade de um aço formar martensita ao longo de uma peça quando submetido ao tratamento térmico de têmpera é denominada de temperabilidade, diz-se portanto que um aço tem boa temperabilidade quando este forma martensita não apenas na superfície, onde as taxas de resfriamento são maiores, mas também em toda sua extensão, de forma profunda [8].

Há diversos fatores que influenciam na temperabilidade de um aço sendo que o principal é o teor de carbono, sendo que a temperabilidade é tanto maior quanto maior for a quantidade de C no material. Dessa forma aços de alto C adquirem têmpera mais facilmente do que os de médio C, e aqueles de baixo teor de carbono quase não sofrem endurecimento considerável no processo de têmpera [4]. Ainda assim para teores elevados de carbono ocorre um aumento no volume de austenita retida, o que provoca uma diminuição na dureza final. A Figura 6 mostra o exemplo simplificado de curvas TTT para aços hipoeutetoides de baixo e médio teor de carbono.

Figura 6: Diagramas TTT para aços com (a) baixo teor de C e (b) médio teor de C.



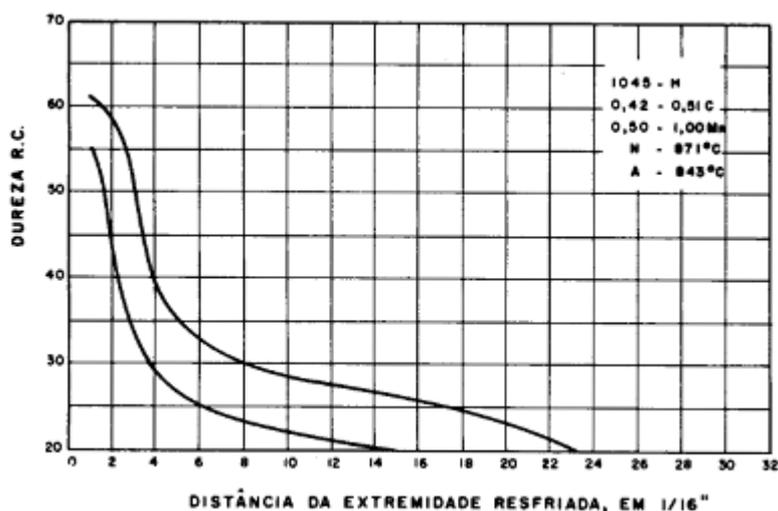
Fonte: feng.pucrs.br

Além dos teores de C, também tem influencia positiva sobre a temperabilidade dos aços a homogeneidade da austenita, a granulação grosseira

desse componente e também a presença de elementos de liga até um determinado valor. Esses fatores favorecem a obtenção da martensita porque retardam a nucleação e o crescimento dos produtos da transformação da austenita [4;9]. A temperabilidade dos aços é aumentada pela presença de níquel, silício, manganês, cromo, molibdênio, vanádio e boro (em ordem crescente de influência). De forma negativa sobre o material agem a granulação fina da austenita e as inclusões não metálicas e carbonetos não dissolvidos no material que facilitam a nucleação dos constituintes da transformação da austenita [9]. O efeito desses elementos pode ser visualizado nas curvas TTT que se deslocam para a direita, aumentando a temperabilidade do material, ou para a esquerda, diminuindo-a.

O conhecimento da profundidade de adquirir têmpera pelos aços é de fundamental importância para sua aplicação prática, motivo pelo qual foram admitidos limites mínimos e máximos para a temperabilidade dos aços, denominados faixas de temperabilidade [4]. A Figura 7 mostra a faixa de temperabilidade para o aço SAE 1045.

Figura 7: Faixa de temperabilidade contendo as durezas máximas e mínimas a serem encontradas em um aço SAE 1045



Fonte: Chiaverini (2008)

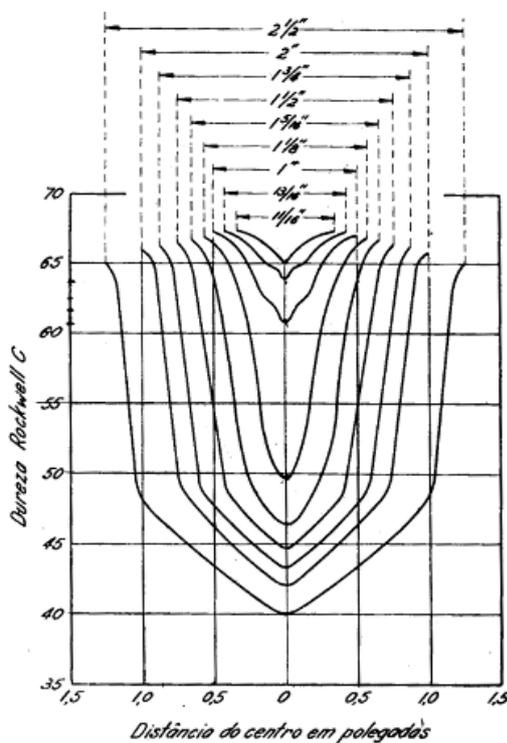
3.3. ENSAIOS DE TEMPERABILIDADE DOS AÇOS.

A temperabilidade dos aços pode ser determinada através de ensaios tecnológicos que permitem obter informações sobre o comportamento do material quando submetido ao processo de têmpera, os principais são o Grossman e o ensaio Jominy [10].

3.3.1. Ensaio Grossman

O método Grossman de determinação da temperabilidade consiste em promover a têmpera de diversos corpos de prova de diâmetro crescente e ao final realizar a determinação da dureza no interior da peça, juntamente com a análise microestrutural. Através do método Grossman é possível delimitar o diâmetro crítico (D_c) [10], assim denominado o diâmetro da peça onde o centro possui 50% de martensita, assim qualquer peça com diâmetro maior que D_c terá valores inferiores de dureza e para diâmetros menores espera-se a formação plena de estrutura martensítica. No método Grossman quanto maior o D_c maior é a temperabilidade do material[4] [10]. A Figura 8 mostra o gráfico resultante do ensaio Grossman para o aço SAE 1090, nota-se o aumento da dureza no centro das peças a medida que o diâmetro das mesmas diminui.

Figura 8: Representação gráfica de um ensaio Grossman para um aço SAE 1090



Fonte: Chiaverini (2008)

A necessidade de um número elevado de corpos de prova, aliado ao tempo gasto para a realização dos ensaios e análise microestrutural dos mesmos torna o método Grossman oneroso e desvantajoso quando o objetivo é ter resultados rápidos e generalizados sobre o material, já que este tipo de análise também exige que os teste sejam feitos para cada tipo de meio de resfriamento que seja utilizado[10].

3.3.2. Ensaio Jominy

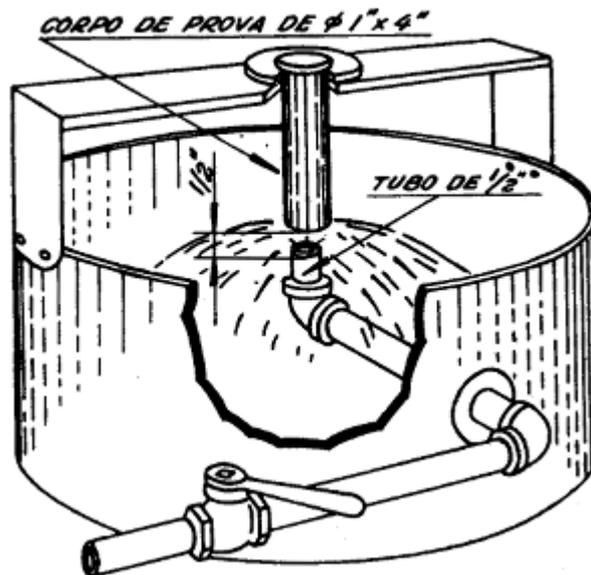
O ensaio de temperabilidade Jominy consiste no resfriamento do material em temperatura de austenitização a partir de uma de suas extremidades, motivo pelo qual também é conhecido como ensaio de resfriamento da extremidade [4, 5, 10]. A grande vantagem do Jominy em relação ao Grossman é permitir a análise generalizada sobre a temperabilidade utilizando apenas um corpo de prova, motivo

pelo qual este vem sendo largamente utilizado em todo o mundo e gerado faixas de temperabilidade para diversos tipos de aços [4], como visto na figura 4, que servem para aferição das propriedades de temperados materiais testados.

O ensaio Jominy segue a norma ABNT NBR 6339/89 e consiste nas seguintes etapas:

- Confecção de um corpo de prova com medidas padrão;
- Aquecimento do corpo de prova até a temperatura de austenitização e permanência nessa temperatura por pelo menos uma hora;
- Retirada do corpo de prova do forno e resfriamento do mesmo a partir da extremidade, por dez minutos, em equipamento apropriado para tal operação (Figura 9).

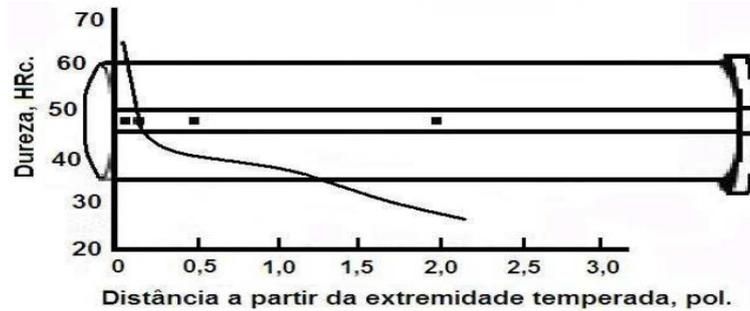
Figura 9: Modelo simplificado de um aparato de ensaio Jominy



Fonte: Chiaverini (2008)

Após o resfriamento retifica-se duas superfícies paralelas no corpo de prova e então realiza-se a medição da dureza obtida a partir da extremidade resfriada nas distâncias especificadas pela norma. Os resultados são lançados na forma de gráfico onde a abscissa representa a distância da extremidade temperada e a ordenada a dureza obtida, que deve estar na escala Rokwell C (Figura 10).

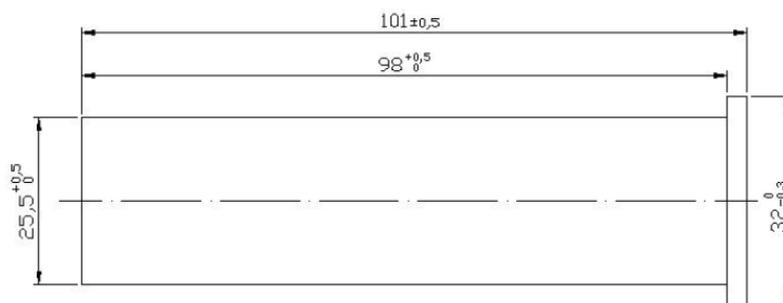
Figura 10: Gráfico Dureza x Distancia típico de um ensaio Jominy.



Fonte: Costa e Mei, 2006

O corpo de prova padrão é obtido pelo processo de usinagem e deve ter uma polegada de diâmetro por quatro de comprimento, porém para casos específicos em que não haja material suficiente pode ser utilizado o corpo de prova reduzido onde o diâmetro passa a ser de 19, 12,7 ou 6,4 mm. Outra opção é a utilização de um corpo de prova fundido, mas isso deve ocorrer apenas quando não for possível sua obtenção por usinagem [5]. A Figura 11 mostra o desenho esquemático de um corpo de prova Jominy padrão.

Figura 11: Corpo de prova Jominy padrão, medidas em milímetros.



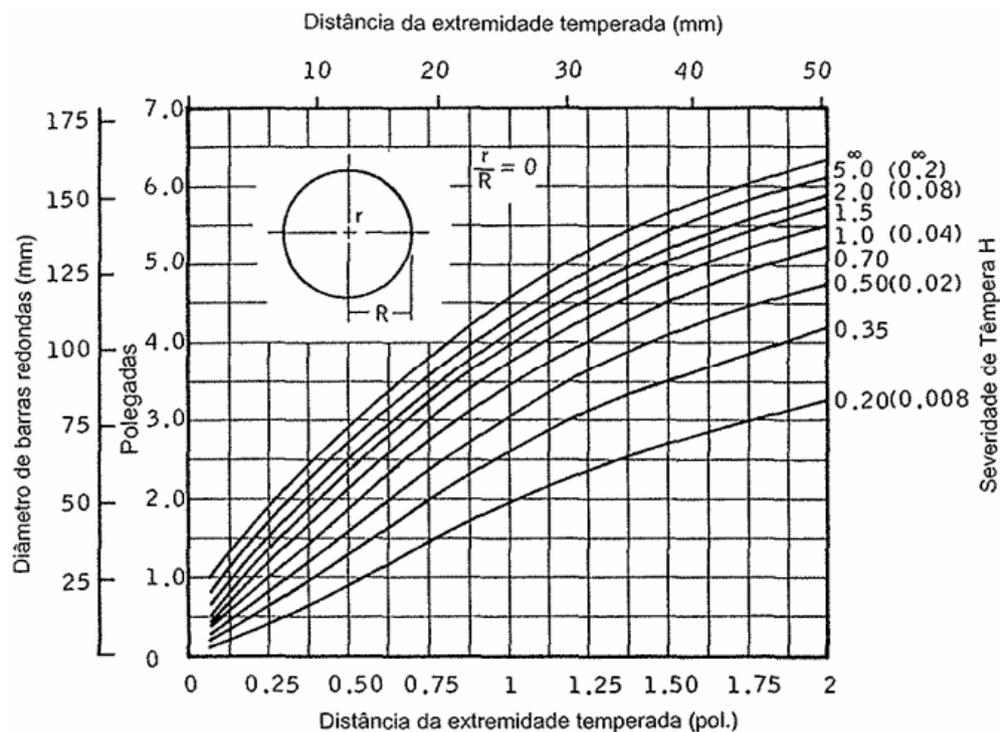
Fonte: ABNT NBR NM 6339/89

Para o ensaio Jominy considera-se que o material tem boa temperabilidade quando a dureza da peça não sofre grandes decréscimos ao se afastar da extremidade temperada. Como a velocidade de resfriamento na base do corpo de prova é bem maior e vai diminuindo a medida em que a distancia dessa base

aumenta pode-se considerar que um aço que mantenha elevada a dureza ao longo de todo o corpo de prova após o ensaio possui facilidade de formar martensita mesmo a taxas de resfriamento menores e, portanto, uma alta temperabilidade. Se ao contrário houver um decréscimo acentuado nos valores de dureza ao longo do corpo de prova este é um indicativo de que o aço tem uma baixa temperabilidade [4].

A relação entre a dureza encontrada nos diversos pontos do corpo de prova Jominy e a profundidade de têmpera em uma peça qualquer, submetida a meios diversos de resfriamento, pode ser feita utilizando o gráfico apresentado na Figura 12, chamado gráfico de Lamont, que indica em qual distância Jominy encontra-se a dureza esperada para a posição no interior da peça [11].

Figura 12: Posição na curva Jominy versus diâmetro de barras redondas nos diversos meios de resfriamento.



Fonte: Siebert et al., 1977.

3.4. Aços hipoeutetóides

Por definição os aços são ligas de ferro carbono contendo de 0,08 até 2% de C em peso, sendo que no geral esses limites não são utilizados em ligas comerciais.

Os aços hipoeutetóides são aqueles cujo teor de C não ultrapassa o valor de 0,77% e que quando resfriados lentamente até a temperatura ambiente tem *ferrita + perlita* como constituinte microestrutural. O teor de *ferrita* vai desde 0%, para o ferro puro, e vai até 100% para o aço eutetóide [12].

Os aços com teor de C inferior ou igual a 0,3% são considerados de baixo carbono, enquanto que aqueles que ultrapassam esse limite e ainda ficam abaixo de 0,5% são considerados de médio C. A classificação de um aço quanto em baixo ou médio carbono já fornece informações importantes quanto a sua utilização e propriedades [4].

3.4.1. Aço ABNT 1024

O aço ABNT 1024 é um aço de baixo teor de C, utilizado comercialmente em parafusos, peças forjadas, tubos soldados entre outras aplicações sem muita exigência, também pode ser submetido ao processo de cementação. Dentre as suas características de trabalho pode-se destacar [13]:

- Excelente forjabilidade;
- Excelente soldabilidade;
- Usinagem fácil, porém pobre em acabamento;
- Baixa temperabilidade, devido ao baixo teor de C;

O bom desempenho em operações de forja e usinagem deve-se as suas propriedades mecânicas, algumas das quais encontradas na literatura e mostradas na Tabela 2:

Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço 1024 encontradas na literatura (Para condição de peça trabalhada a quente)

Propriedades	Resistência a tração (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Dureza (HB)	Usinabilidade (%)
ABNT 1024	380	205	111	96

Fonte: ASM METALS HANDBOOK Vol. 1 e 4

O acabamento pobre que surge com o processo de usinagem se deve a aderência do cavaco a ferramenta de corte, resultado da ductilidade do material

aliada a sua boa soldabilidade. Essas características além de resultarem em um acabamento grosseiro também diminui a vida útil da ferramenta.

A Tabela 3 mostra a faixa de composição para o aço 1024

Tabela 3: Faixa de composição química para o aço 1024

COMPOSIÇÃO QUÍMICA				
	C	Mn	P	S
1024	0.18-0.25	1.30-1.65	0.040	0.050

Fonte: steeltalk.com

3.4.2. Aço ABNT 1045

O aço ABNT 1045 é um aço hipoeutetóide de médio teor de carbono utilizado comercialmente em componentes estruturais, peças forjadas, eixos, entre outras aplicações que necessitem de boa resistência mecânica. Suas principais características são:

- Ótima forjabilidade;
- Boa soldabilidade;
- Baixa usinabilidade;
- Baixa temperabilidade.

Algumas das propriedades mecânicas do aço 1045 encontradas na literatura estão listadas na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço 1045 encontradas na literatura (Para condição de peça trabalhada a quente)

Propriedades	Resistência a tração (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Dureza (HB)	Usinabilidade (%)
ABNT 1045	565	310	165	NE

Fonte: ASM METALS HANDBOOK Vol. 1 e 4

Na Tabela 5 está descrita a faixa de composição química para o aço 1045.

Tabela 5: Faixa de composição química para o aço 1045

COMPOSIÇÃO QUÍMICA				
	C	Mn	P	S
1045	0.42-0.50	0.60-0.90	0.040	0.050

Fonte: steeltalk.com

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Para a realização dos ensaios comparativos foi utilizado uma amostra de vergalhão constituído de aço 1024, proveniente da empresa Sinobrás S.A e os seguintes equipamentos:

- Máquina de policorte com disco;
- Torno convencional (Usinagem solicitada a terceiros);
- Forno mufla para tratamento térmico;
- Dispositivo Jominy para ensaios de temperabilidade;
- Retificadora plana (Usinagem solicitada a terceiros);
- Durômetro;

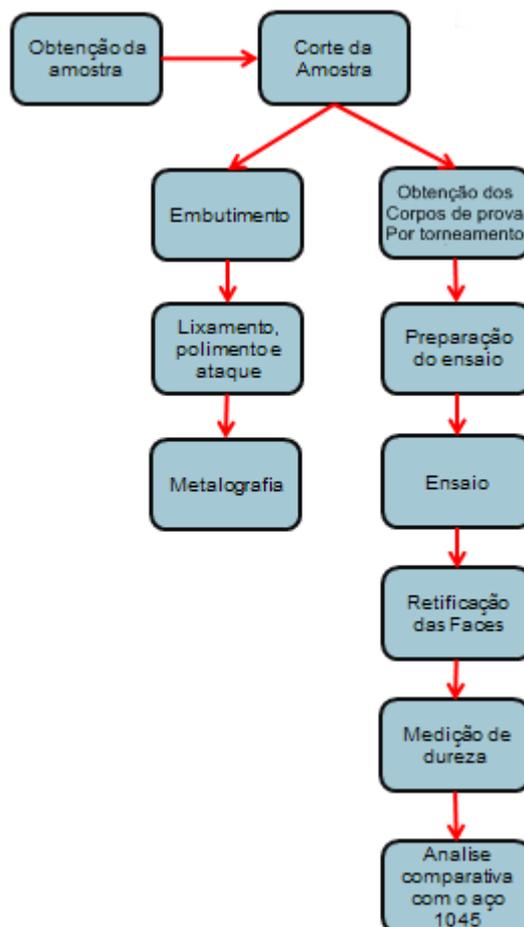
Para a análise metalográfica do material foi utilizado além da policorte os seguintes materiais e equipamentos:

- Máquina para embutimento de amostras a quente;
- Jogo de lixas d'água com granulometria crescente (nº 80, 100, 220, 320, 400, 600, 1200);
- Lixadeira e politriz;
- Solução nital 2%;
- Microscópio ótico;

4.2. Metodologia

Este trabalho consiste basicamente em comparar os resultados do ensaio de temperabilidade de um aço 1045, realizado previamente por Lima (2012), com os valores obtidos no mesmo ensaio para uma amostra de aço 1024 proveniente da empresa Sinobrás S/A, avaliando as diferenças entre os dois e suas possíveis causas. Uma visão geral da metodologia utilizada neste trabalho é apresentada no fluxograma da Figura 13.

Figura 13: Fluxograma representativo da metodologia utilizada neste trabalho



Fonte: Autor

4.2.1. Obtenção dos corpos de prova

A amostra de aço utilizada no ensaio Jominy foi obtida através de doação da empresa Sinobrás S/A, e veio na forma de vergalhão com diâmetro de 25 mm (1 pol). A barra de inteira foi cortada em quatro para facilitar o transporte. Após a chegada a UFPA a amostra foi novamente cortada em pedaços menores para facilitar a usinagem, além da retirada de uma amostra para análise metalográfica.

Devido ao diâmetro da amostra não ser o suficiente para a confecção de um corpo de prova com dimensões convencionais, optou-se pela utilização de um corpo de prova com medidas reduzidas, na ordem de 19 mm, sendo necessário a utilização de um suporte específico no aparato Jominy. A Figura 14 mostra os corpos de prova obtidos por usinagem.

Figura 14: Corpos de prova usinados prontos para serem ensaiados



Fonte: Autor

Na Figura 15 observa-se a imagem da amostra embutida para a metalografia.

Figura 15: Amostra para metalografia cortada e embutida a quente



Fonte: Autor

4.2.2. O ensaio Jominy

O procedimento para realização do ensaio seguiu as recomendações da norma NBR 6339/89, iniciando com o aquecimento do forno a temperatura de austenitização descrita para o tipo de aço conforme disposto na Tabela 6. Enquanto o forno aquecia o suporte do corpo de prova, assim como a altura do jato de água e

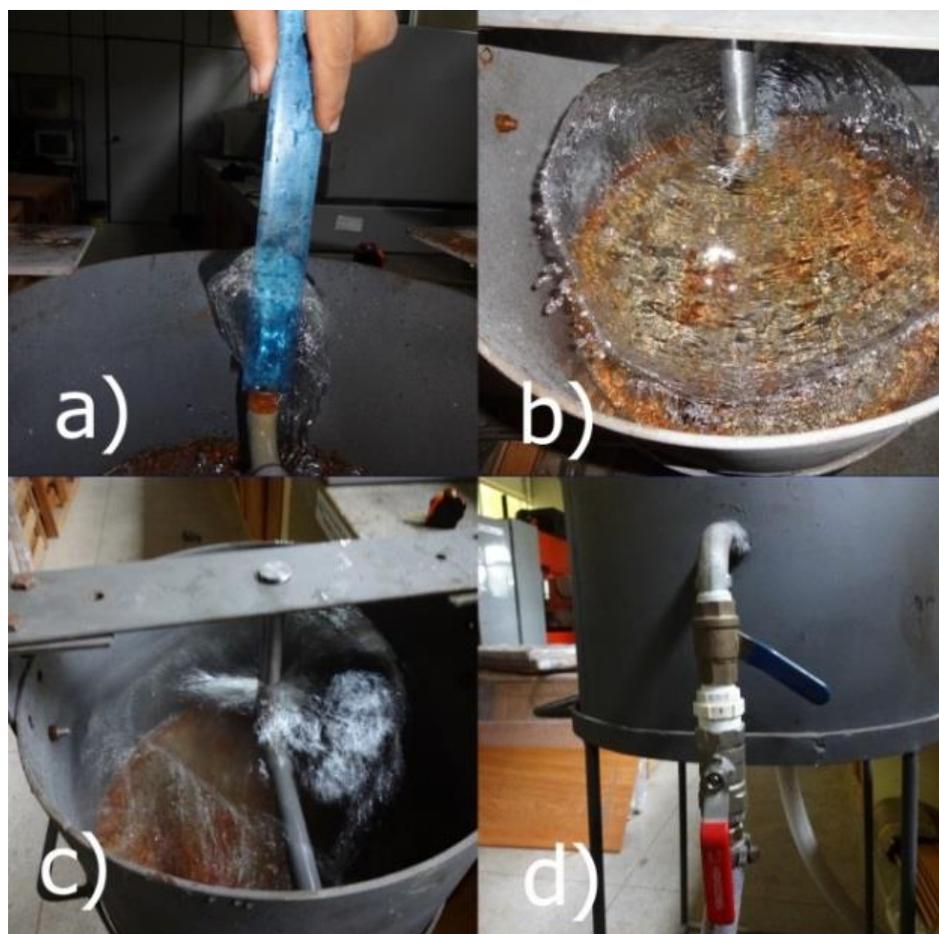
o alinhamento deste com o corpo de prova foram ajustados como mostra a Figura 16.

Tabela 6: Temperatura de austenitização para aços com temperabilidade garantida (adaptado)

Série "H"	Composição	Temperatura de austenitização para têmpera (°C)
10XX- 13XX- 15XX	$C \leq 0,25$	925
32XX- 41XX- 43XX	$0,25 < C < 0,36$	870
51XX- 61XX- 86XX	$C \geq 0,36$	845
87XX	$C \leq 0,25$	845
48XX	$0,25 < C < 0,36$	815
92XX	$0,36 < C < 0,50$	800
	$C \geq 0,50$	870

Fonte: ABNT NBR 6339/89

Figura 16: Etapas de ajuste no aparato de ensaio Jominy, medida da altura do jato de água (a); Alinhamento do corpo de prova com o jato d'água (b e c); posição de abertura rápida dos registros (d)



Fonte: Autor

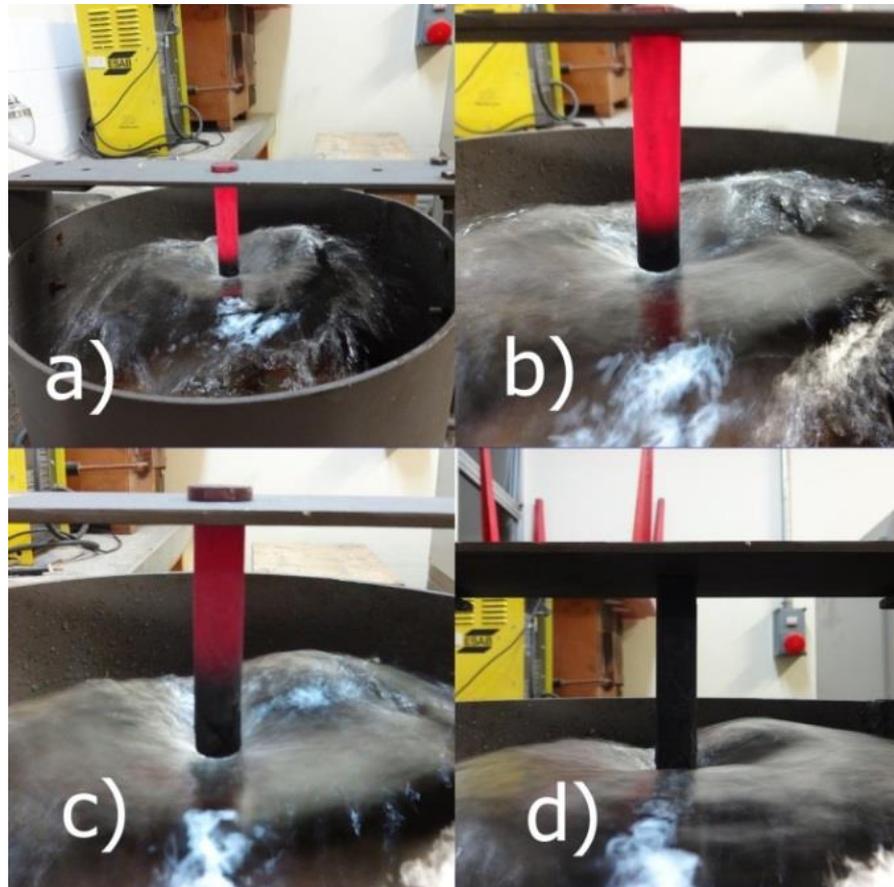
Após alcançar a temperatura de austenitização os corpos de prova foram introduzidos no forno (Figura 17), permanecendo nessa temperatura por uma hora. Após decorrido o tempo necessário para a austenitização efetuou-se a retirada do corpo de prova do forno e seu resfriamento a partir da extremidade inferior do corpo de prova durante dez minutos. A Figura 18 mostra o corpo de prova em diferentes momentos do resfriamento.

Figura 17: Corpos de prova assim que inseridos no forno, na temperatura de austenitização



Fonte: Autor

Figura 18: Corpo de prova em diferentes instantes do ensaio, com menos de um minuto (a e b), com aproximadamente cinco minutos (c) e com mais de oito minutos (d)



Fonte: Autor

Ao terminar o período de dez minutos do ensaio o corpo de prova teve seu resfriamento concluído em água a temperatura ambiente. O mesmo procedimento foi repetido para os outros dois corpos de prova. Após ensaiados os corpos de prova tiveram sua superfície retificada na profundidade de 0,4mm em lados opostos. Depois de retificados os corpos de prova foram enviados ao campus UFPA de Belém para medição da dureza.

4.2.3. Análise metalográfica.

A análise metalográfica foi realizada no laboratório de preparação de amostras e metalografia da UFPA campus Marabá, seguindo as etapas de lixamento, polimento, ataque e análise em microscópio ótico.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Metalografia

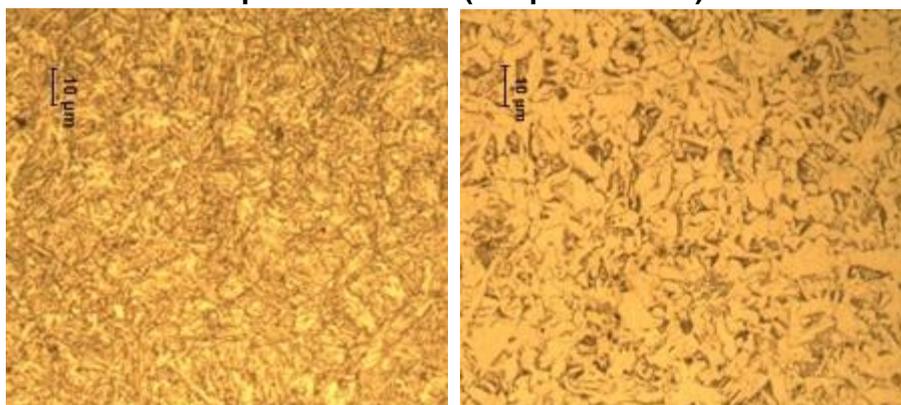
A análise da metalografia do material permitiu observar que o mesmo da maneira como obtido apresenta uma pequena porção de estrutura martensítica, uma fina camada que logo se dissipa quando se avança em direção ao interior da peça, Figura . Essa espécie de anel martensítico demonstra que o vergalhão passou por um tratamento térmico na sua etapa de fabricação, logo após ele observa-se a presença das fazes perlita e ferrita formadas no interior da peça que possui resfriamento mais lento, essas características são mostradas Figura .

Figura 19: Macrografia mostrando a presença do “anel martensítico” na extremidade da peça (Ataque Nital 2%)



Fonte: Autor

Figura 20: Micrografias para a) contendo fase martensítica e b) contendo perlita e ferrita. (Ataque Nital 2%)



Fonte: Autor.

5.2. Ensaio Jominy para o aço ABNT 1024

O ensaio Jominy para o aço ABNT 1024 mostrou um decréscimo quase que instantâneo nos valores de dureza de tal forma que já nas primeiras medidas

alcança valores abaixo dos 20 HRc, sendo que para uma melhor visualização foi necessário expressar a dureza em escala vickers (HV). Os valores para os três corpos de prova, juntamente com os resultados da média aritmética e o desvio padrão para ambas as faces de cada um, são apresentados na Tabela 7:

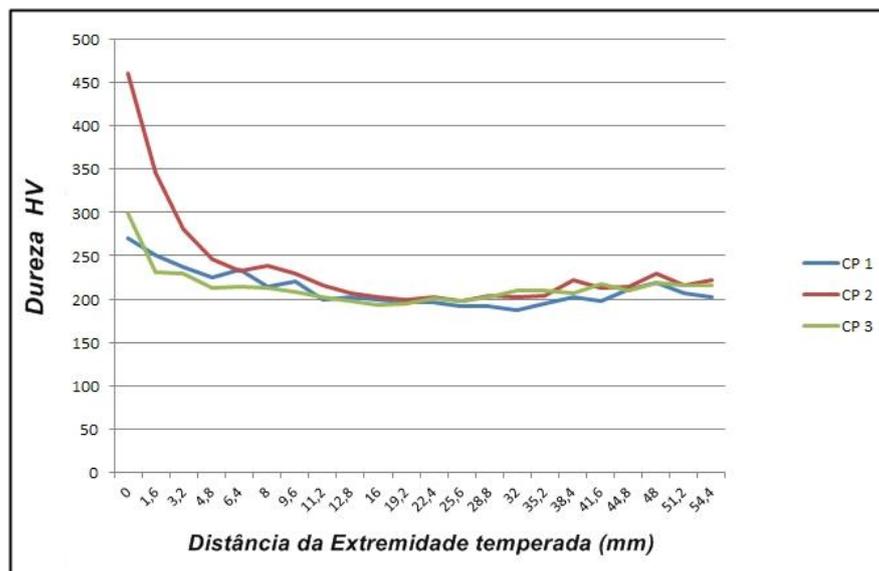
Tabela 7: Resultados da medição de dureza na escala Vickers para os três corpos de prova

DISTÂNCIA (mm)	DUREZA (HV)								
	CP 1			CP 2			CP 3		
	Face 1	Face 2	Média	Face 1	Face 2	Média	Face 1	Face 2	Média
0	265,3	276,4	270,85	454,7	465,5	460,1	357,9	241,3	299,6
1,6	238,2	263,6	250,9	345,6	346,6	346,1	247,7	213,7	230,7
3,2	223,2	250,3	236,75	269,1	293,1	281,1	226,4	233,5	229,95
4,8	226,7	224,8	225,75	236,9	256,1	246,5	215,3	211,3	213,3
6,4	231,1	237,1	234,1	244,6	220,8	232,7	227	203,2	215,1
8	201,8	227,1	214,45	230,6	246,3	238,45	225,5	200,1	212,8
9,6	207,8	234,2	221	221	237,5	229,25	219,1	197,6	208,35
11,2	195	204,9	199,95	210,4	222,3	216,35	205,1	198,7	201,9
12,8	201,6	202,8	202,2	199,5	213,5	206,5	207,5	186,6	197,05
16	205,3	193,5	199,4	195,8	208,8	202,3	202,7	184,1	193,4
19,2	202	191,9	196,95	193,3	206,4	199,85	205	184	194,5
22,4	192,4	199,6	196	200,1	205	202,55	217,8	184	200,9
25,6	187,8	196,8	192,3	196,9	198,8	197,85	213,1	183,4	198,25
28,8	193,3	189,6	191,45	197	212,1	204,55	215,4	188,3	201,85
32	181,9	194	187,95	196,5	209,5	203	220,6	198,7	209,65
35,2	192,8	195,5	194,15	193,7	212,5	203,1	218,7	200,1	209,4
38,4	197,1	206,6	201,85	198,5	244,5	221,5	215,5	198,7	207,1
41,6	189,8	207,1	198,45	198,7	227,6	213,15	223,9	211,7	217,8
44,8	201,3	221,6	211,45	209,2	218,4	213,8	214,1	206	210,05
48	207,8	230,9	219,35	210,5	249,2	229,85	225,5	211,1	218,3
51,2	196,2	217,4	206,8	201,1	232,2	216,65	225,2	206,6	215,9
54,4	189,9	215,2	202,55	213	231,3	222,15	201,2	230,9	216,05

Fonte: Autor

Os dados da média dos três corpos de prova são mostrados no gráfico da Figura 19.

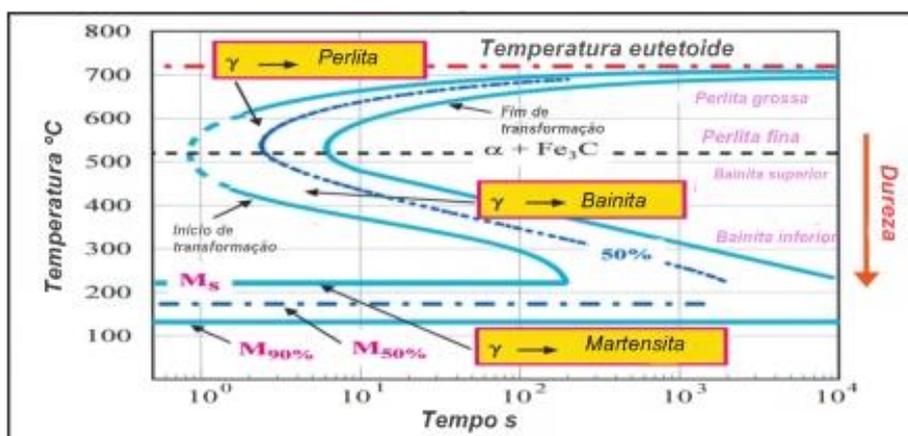
Figura 21: Gráfico comparativo dos resultados Jominy nos três corpos de prova



Fonte: Autor

Nota-se que houve uma variação nos três resultados, em especial logo na extremidade temperada. Tal fator deve-se ao fato de que para o aço ABNT 1024 o tempo de início das transformações da austenita é quase nulo, o que pode ser observado pelo diagrama TTT do mesmo mostrado na Figura 20, sendo que uma mínima variação no tempo entre a retirada do forno e o início do resfriamento pode provocar resultados visíveis. Pressupõe-se que o CP 2 foi aquele cujo espaço de tempo entre a saída do forno e a abertura da válvula do aparato Jominy foi a menor de todas.

Figura 22: Diagrama TTT para o aço 1024 (Adaptado)



Fonte: Rudnev (2007)

Além do rápido início de transformação a austenita duas outras informações podem ser auferidas da análise do gráfico TTT para o aço: 1) a baixa temperatura de início da formação de martensita, o que dificulta ainda mais sua obtenção, e 2) a incapacidade de formação de uma estrutura 100% martensítica, em decorrência do baixo teor de C, já que esta é uma fase supersaturada de carbono.

5.3. Comparação ABNT 1024 / ABNT 1045

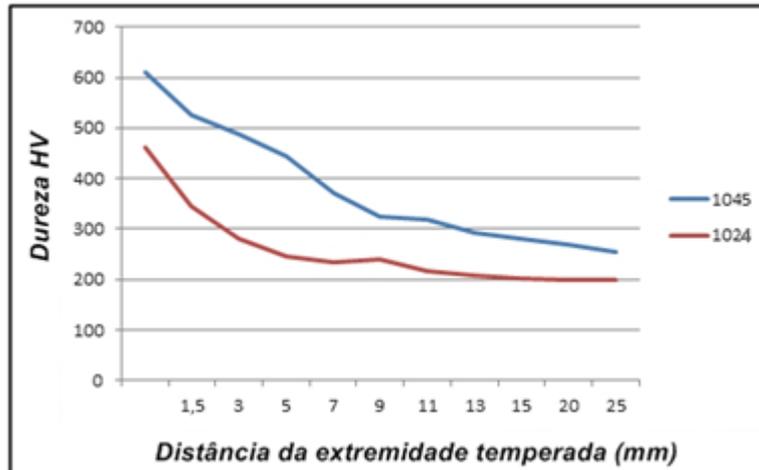
Para comparar as propriedades de temperabilidade dos aços 1045 com 1024 foram utilizados os dados obtidos em ensaio de temperabilidade realizado por Lima (2012), mostrados na Tabela 6, que com as devidas adaptações e conversões de unidade resultou no gráfico da Figura 21.

Tabela 8: Valores de dureza obtidos para o aço 1045.

DISTÂNCIA (mm)	DUREZA PEÇA (HRC)		
	1° MÉDIA	2° MÉDIA	MÉDIA GERAL
1,5	50,9	50,4	50,65
3	47,6	48,2	47,9
5	44,1	45,4	44,75
7	37	37,8	37,4
9	33,7	32,9	33,3
11	32,8	32,1	32,45
13	29,1	28,7	28,9
15	27,3	27,6	27,45
20	25,8	26,2	26
25	24,2	23,9	24,05
30	—	—	—
35	—	—	—
40	—	—	—
45	—	—	—
50	—	—	—

Fonte: Lima (2012)

Figura 23: Gráfico comparativo entre valores de dureza para o aço ABNT 1045 e ABNT 1024

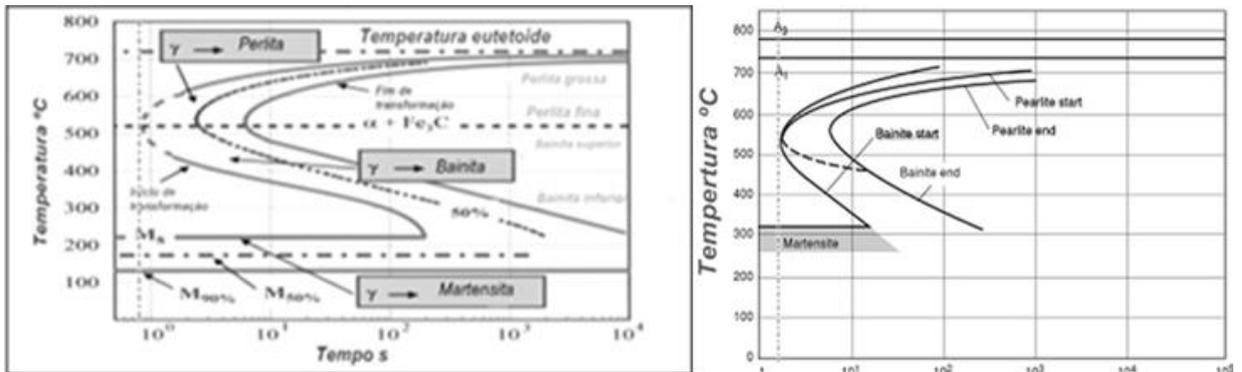


Fonte: Autor

Pela análise do gráfico resultante observa-se que ambos os materiais tem a mesma tendência de queda nos valores de dureza ao longo das distâncias Jominy, porém fica evidente que para o aço ABNT 1024 os valores de dureza são sempre inferiores, inclusive no início da peça. Como comentado anteriormente isso se deve ao baixo teor de carbono que impede a formação de uma estrutura 100% martensítica mesmo na região onde a retirada de calor foi mais intensa. Outro fator importante é a estabilização dos valores de dureza na proximidade de 11 mm da extremidade temperada, o que indica não haver mais nenhuma transformação que possa influenciar na dureza da peça a partir dessa distância, o que não ocorre para o aço 1045 que ainda continua decaindo, o que indica que ainda há teores residuais de martensita formada na estrutura do material, e que esta está decrescendo.

Uma comparação entre os diagramas TTT de ambos os aço, apresentados na Figura nos mostras as diferenças no processo de transformação desses aços:

Figura 24: Diagramas TTT para os aços 1024 e 1045, mostrando o tempo de início de transformação da austenita e também a temperatura de início de formação da martensita



Fonte: Toten (2002); Rudnev (2007)

Observa-se que o início de transformação da austenita ocorre em um tempo superior para o aço 1045 e também que a temperatura de início de formação da martensita deste é superior a do aço 1024. Isso ocorre devido ao fato de que o teor de C desloca a curva TTT para a direita quanto maior este for tendo também efeito direto sobre o início da formação de martensita no material, dessa forma aços de médio carbono apresentarão maior temperabilidade do que aços de baixo carbono.

6. CONCLUSÃO

Através da análise dos resultados obtidos com no ensaio de temperabilidade Jominy realizado com o aço ABNT 1024 foi possível concluir que o mesmo não adquire dureza significativa quando submetido ao endurecimento por têmpera. É possível afirmar que o material pode sofrer um pequeno acréscimo na dureza porém apenas em uma profundidade muito pequena como forma de endurecimento puramente superficial, este processo foi observado na micrografia onde constatou-se a presença de uma espécie de coroa de martensita na amostra, indicando que o vergalhão utilizado passou por um processamento térmico na sua etapa de fabricação.

A comparação com os resultados obtidos para o aço 1045, juntamente com a análise dos diagramas TTT de ambos os materiais, permitiu observar a relevância do teor de carbono para a temperabilidade dos aços. Da mesma forma com a análise do diagrama TTT do aço 1024 foi possível concluir os motivos da discrepância nos resultados dos três corpos de prova submetidos a mesma condição de ensaio.

Os resultados obtidos permitiram uma melhor compreensão dos fatores que influenciam no processo de tempera, permitindo assim o desenvolvimento de novos trabalhos na mesma linha, seja com o aço 1024, objeto principal deste estudo, ou com outro tipo de material, o qual seja desejável um melhor conhecimento de suas propriedades no tocante aos tratamentos térmicos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando o objeto principal do estudo, o aço ABNT 1024, e suas propriedades descritas bem como as constatadas sugere-se a realização de um tratamento superficial de cementação em diferentes fontes de carbono e/ou tempos de cementação.

Em outra etapa de estudo pode-se verificar a resposta do material frente a condições diversas de fabricação, como encruado, por exemplo, e as propriedades mecânicas deste.

Seguindo a linha de determinação de temperabilidade sugere-se o estudo da temperabilidade de outros aços, dando preferencia aqueles fabricados na região, como o ABNT 1140, também produzido pela empresa Sinobrás S/A.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Centro universitário Padre Anchieta. **Ciência dos materiais – Aços carbono**. Unianchieta, Jundiá-São Paulo, 2007.
- [2] COSTA, **Fernando F. Tecnologia mecânica – I**. Centro de educação Profissional Paula Souza- São Paulo, 2000.
- [3] Spectrus instrumental científico. **Tratamento térmico dos aços**: recozimento, normalização, têmperae revenido. Rio de Janeiro - 2001
- [4] CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7.ed. São Paulo: Editora ABM, 2008
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6339. **Aço – Determinação da temperabilidade (Jominy)**. ABNT, 1989.
- [6] Armco Brasil. **Tratamentos térmicos**: têmperae revenimento. Informativo quadrimestral “AÇÃO”, ano 1- nº 4. 2004.
- [7] AMERICAN society for metals. **Metals Handbook**. 16ª Edição. ASM, Metals Park, 1990.
- [8] KRAUSS, G. Hardness and Hardenability. In: KRAUSS, G. **Steels: Heat treatment and processing principles**. 2nd ed. Ohio: ASM International, 1990. Chap. 6, pp. 145-178.
- [9] UNTERWIESER, P. M.; HOWARD E. B., JAMES J. K, **Heat Treaters Guide: Standard Practices and procedures for Steel**, ASM International, ISBN 0-87170-141-3, 493 Pages, 1982.
- [10] MARTINS, Marcelo. **Temperabilidade e influência de revenido sobre a dureza – um estudo em aços estruturais nacionais**. UFSC, Florianópolis - 2002
- [11] SIEBERT, C. A., DOANE, D. V., AND BREEN, D. H. **The Hardenability of Steels: Concepts, Metallurgical Influences and Industrial Applications**. ASM, Metals Park, Ohio, 1977. 218p.
- [12] CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª Edição, LTC, São Paulo, 2002.
- [13] Site: gerdau.com.br, acesso em 25/030/2013

[14] RUDNEV, Valery I. **Metallurgical insights for induction heat treaters:** limitations of ttt and cct diagrams. Heat treating progress, Nov/Dez 2007

[15] TOTEN, George E. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel.** ASM International, 2002 – Pg 298-299.

[16] Site: www.sinobras.com.br; Acesso em 20/03/2013

[17] AMERICAN society for metals. **Metals Handbook.** 4ª Edição. ASM, Metals Park, 1990.

[18] LIMA, Andréa dos S. **CONSTRUÇÃO E AFERIÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA A REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE TEMPERABILIDADE.** UFPA – Marabá, 2012'