

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

BRUNO LEONARDO DUBIELA

**CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS DE
TEMPERABILIDADE DO TIPO *JOMINY* EMPREGANDO O AÇO
SAE 1045 COMO OBJETO DE ESTUDO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Departamento Acadêmico de Engenharia de
Materiais
Coordenação de Engenharia de Materiais



TERMO DE APROVAÇÃO

CONSTRUÇÃO E DE UM EQUIPAMENTO DE ENSAIOS DE TEMPERABILIDADE DO TIPO *JOMINY* EMPREGANDO O AÇO SAE 1045 COMO OBJETO DE ESTUDO

Por

BRUNO LEONARDO DUBIELA

Monografia apresentada no dia 07 de novembro de 2016 ao Curso Superior de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino

(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais-DAEMA-LD)
Orientador

Prof. Me. Fellipe Roberto Biagi

(UTFPR - Coordenação de Engenharia Mecânica - COEME-LD)

Prof. Me. Diego Ruben Martin

(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais – DAEMA-LD)

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino

Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia de Materiais

Obs.: A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Materiais

BRUNO LEONARDO DUBIELA

**CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS DE
TEMPERABILIDADE DO TIPO *JOMINY* EMPREGANDO O AÇO SAE
1045 COMO OBJETO DE ESTUDO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus Londrina* para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Odney Carlos Brondino

LONDRINA

2016

RESUMO

DUBIELA, B. L.; 2016. 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Construção do equipamento para ensaios de temperabilidade do tipo *Jominy* empregando o aço SAE 1045 como objeto de estudo – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2016.

A necessidade de diminuir custos na indústria e reduzir o consumo dos recursos finitos faz com que a engenharia busque alternativas para a melhoria das propriedades mecânicas dos materiais. Uma alternativa a essas exigências é alterar a microestrutura através de tratamentos térmicos adequados, que possibilitem tais melhoras. Este trabalho aborda a construção de um aparato de ensaio *Jominy* focando em um equipamento de baixo custo e utilizando o aço SAE 1045 como objeto de estudo para verificar a temperabilidade e por consequência possíveis aplicações futuras para esse equipamento.

Palavras-chave: Dureza, *Jominy*, Temperabilidade, SAE1045

ABSTRACT

DUBIELA, B. L.; 2016.43 p. Construction of the Jominy end-quench test equipment using the SAE 1045 steel as the object of study- Trabalho de conclusão de curso. Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2016

The need to reduce costs in manufacturing and reduce the consumption of finite resources makes the engineering seek alternatives to improve the mechanical properties of the materials. An alternative to these requirements is to change the microstructure by appropriate heat treatments that enable such improvements. This paper discusses the construction of a test apparatus Jominy focusing on a low-cost equipment and using the SAE 1045 steel as the object of study to check the operation of the equipment and consequently possible future applications for it.

Key-words: Hardness; *Jominy*, Hardenability, SAE1045

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de fases para o sistema Fe-C.....	14
Figura 2: Região do diagrama Fe-C, mostrando um exemplo das transformações de fases em uma liga hipoeutetóide.	15
Figura 3 - Tempera em função do tempo e temperatura, onde, T_a , T_t e T_s são as temperaturas ambiente, de transformação e de solubilização respectivamente.	16
Figura 4 - Estruturas CCC e TCC	17
Figura 5 - Diagrama de transformação para uma liga Fe-C eutetóide, mostrando as zonas de Perlita, Martensita-Perlita e Martensita.....	18
Figura 6 - Perfil de dureza obtido através do método de <i>Grossman</i>	20
Figura 7 - Correlação entre diâmetro e dureza, representando o diâmetro crítico de um aço.....	21
Figura 8 - Tipos de indentadores e carga máxima aplicada conforme a escala utilizada no ensaio de dureza tipo <i>Rockwell</i>	22
Figura 9 - Desenho técnico do corpo de prova e posicionamento do jato de água.	25
Figura 10 - Vista em corte do aparato <i>Jominy</i> , mostrando como o jato de água deve estar posicionado sob o corpo de prova. Onde 1 é a caixa, 2 suporte do corpo de prova, 3 corpo de prova, 4 tubulação de entrada de água e 5 jato de água	25
Figura 11: Exemplo de distribuição da dureza em um ensaio <i>Jominy</i>	27
Figura 12: Diagrama esquemático do procedimento metodológico.	29
Figura 13: Suporte do corpo de prova	30
Figura 14: Aparato em construção e ajustes.....	31
Figura 15: Bocal de saída de água	32
Figura 16: Primeiro corpo de prova normalizado que apresentou carepas de descarbonetação.....	33
Figura 17: ambiente enclausurado.....	33
Figura 18: Receptáculo posicionado na mufla..	34
Figura 19: Perfil de dureza obtido nos corpos de prova	37
Figura 20: Comparativo entre o resultado obtido e a literatura.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de concentração dos elementos constituintes para a aplicabilidade do ensaio <i>Jominy</i>	24
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Taxa de resfriamento no corpo de prova <i>Jominy</i>	23
Quadro 2 - Dados de dureza obtidos.....	35
Quadro 3 - Cronograma das atividades desenvolvidas durante o projeto.	42

LISTA DE SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CCC	Estrutura cúbica de corpo centrado
TCC	Estrutura tetragonal de corpo centrado
TTT	Diagrama de Transformação-Tempo-Temperatura
HRC	Dureza <i>Rockwell</i> escala C
mín.	Mínimo
máx.	Máximo
CNC	Comando numérico computadorizado
LTDA	Sociedade Limitada

LISTA DE SÍMBOLOS

Fe	Ferro
C	Carbono
J_p	Distância <i>Jominy</i>
$^{\circ}$	Grau
s	Segundo
α	Ferrita
γ	Austenita

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 MOTIVAÇÃO.....	13
1.2 OBJETIVO	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivo Específico.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO DE FASE DO SISTEMA FE-C	14
2.2 TRANSFORMAÇÕES DE FASE FORA DO EQUILÍBRIO	16
2.3 TEMPERABILIDADE	18
2.4 MEIO DE TÊMPERA E SEVERIDADE.....	19
2.5 DUREZA	21
2.6 ENSAIO <i>JOMINY</i>	23
2.6.1 Curvas de Temperabilidade.....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 MATERIAIS	28
3.2 MÉTODOS.....	28
3.2.1 Projeto e Construção	29
3.2.2 Execução do Experimento	32
4 RESULTADOS	37
5 CONCLUSÃO	39
6 REFERÊNCIAS	40
APÊNDICE	42

1 INTRODUÇÃO

Diante das exigências do mercado e dos atuais estágios de desenvolvimento tecnológico e econômico impostos às empresas, considerando os elevados níveis de competitividade industrial, um fator de grande relevância para o sucesso de novos projetos de produtos, e das próprias empresas, é a questão da inovação tecnológica. As inovações podem ser tratadas de diferentes formas, bem como impactos distintos sobre produtos e sistemas de produção, podendo ser incrementais e radicais. As inovações incrementais estão relacionadas com a melhoria do produto ou dos processos para a sua obtenção, seja através do aperfeiçoamento de uma tecnologia já existente ou de uma nova rota de processo. Já as inovações radicais são o desenvolvimento de novos produtos ou processos, que apresentam melhoria em relação aos existentes (FILHO, E. R. et al., 2011)

Ao longo das últimas décadas a indústria vem buscando por alternativas de baixar custos e garantir a viabilidade econômica de seus produtos frente à competitividade do mercado. Uma das formas de se fazer isso é reduzindo a densidade através do aumento de resistência mecânica e, por consequência o preço dos produtos que essa disponibiliza no mercado. Essa redução do peso pode ser alcançada alterando as propriedades mecânicas do material, onde uma das formas é através dos tratamentos térmicos. Atualmente esse é um fator importante, do ponto de vista ambiental e econômico, pois dessa forma se torna possível reduzir o consumo de matéria prima e os impactos ambientais. No entanto, a melhoria de algumas propriedades, como sua resistência mecânica e dureza não devem degradar significativamente outras propriedades como a resistência à fadiga do componente, que, dependendo da aplicação é essencial ao seu bom funcionamento.

Dessa forma, ao se projetar um componente, deve-se buscar no material microestruturas apropriadas para que o mesmo apresente as melhores propriedades possíveis ao longo de sua vida útil, quer seja ela de curto ou longo prazo. Uma das formas de se chegar a esses parâmetros envolvendo dureza é o ensaio de temperabilidade seguido do ensaio de dureza, pois através dele podem-se obter os valores dessa propriedade ao longo do perfil do corpo de prova, cujos resultados podem auxiliar o projeto de uma peça aplicada.

Neste trabalho será abordada a construção de um equipamento para ensaios de temperabilidade baseado na norma ASTM-A255 para a realização de estudo de profundidade de têmpera dos materiais que estão englobados nessa norma, especificamente o aço SAE 1045 e possivelmente a abertura para materiais que a norma ASTM-A255 não garante sua aplicabilidade. Através de estudos futuros, se verificará uma alternativa para a realização de ensaios em novos materiais ferrosos, visando a aplicação de tratamentos térmicos em materiais empregados na construção mecânica de forma a obter melhores propriedades mecânicas.

1.1 MOTIVAÇÃO

Partindo da necessidade de se obter melhores propriedades em materiais empregados na indústria ou em ambiente doméstico, este trabalho tem como motivação a construção de um equipamento que permita a realização do ensaio *Jominy* para outros materiais, como: aços ao carbono, aços ferramenta, aços ligados entre outros. Isto permitirá uma melhor compreensão dos tratamentos térmicos, mais precisamente, na severidade do tratamento térmico de têmpera, contribuindo desta forma, com a economia dos recursos materiais finitos.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo projetar e construir um equipamento para realização de ensaios de temperabilidade *Jominy*. Seu foco está na redução de custos de investimento na compra de equipamentos, quando comparado aos similares disponíveis no mercado. Testar-se-á sua funcionalidade e operacionalidade, empregando um aço carbono SAE 1045 tendo como base a norma ASTM-A255.

1.2.2 Objetivo Específico

Como objetivo específico, este trabalho apresenta a obtenção do perfil de dureza nos corpos de prova fabricados em aço carbono SAE 1045, nos quais, foi realizado o ensaio *Jominy*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DIAGRAMA DE EQUILÍBRIO DE FASE DO SISTEMA FE-C

Diagramas de fases apresentam muitas informações sobre a microestrutura de um sistema de ligas, como por exemplo, o sistema Ferro-Carbono (Fe-C) mostrado na Figura 1. Tais diagramas são úteis para prever transformações de fase e microestruturas que resultam dessas transformações (CALLISTER, 2002), muito embora, os processos de transformações de fases realizados pelo homem no início de suas aplicações eram realizados através do empirismo. Existem diversos tipos de diagramas que podem ser utilizados, porém neste trabalho, os diagramas utilizados representam relações entre temperatura e composição do material SAE 1045.

Parte do diagrama do Fe-C está representado na Figura 1, que mostra as fases presentes em um sistema, onde a linha vertical representa a composição do aço SAE 1045.

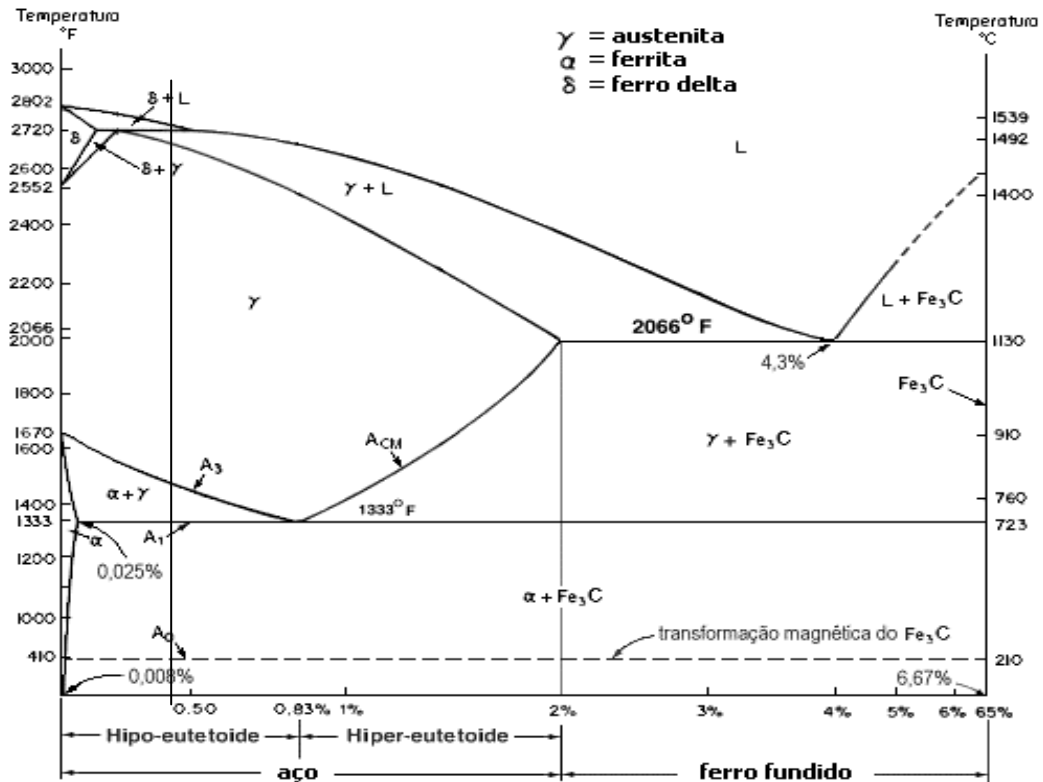


Figura 1: Diagrama de fases para o sistema Fe-C
 Fonte: (CIMM, 2016).

A Figura 2, ilustra como as transformações de fases ocorrem. Normalmente a representação dessa ilustração ocorre da temperatura mais alta para a mais baixa, assim, no ponto **c**, onde a temperatura é próxima dos 900°C e a estrutura cristalina do material se apresenta na forma de austenita (γ), onde as linhas internas do círculo apontado representam os contornos de grãos. Diminuindo a temperatura e observando o ponto **d**, nota-se que a austenita passa a sofrer mudança de fase, para a ferrita (α), essa nucleação da mudança de fase ocorre na interface dos contornos de grãos devido a sua instabilidade energética. Descendo para uma temperatura inferior como o ponto **e** nota-se que proporção de ferrita no sistema aumenta. Passando pela linha horizontal **NO** ocorre a transformação completa da austenita em ferrita e cementita (Fe_3C) de forma intercalada, que é denominada perlita.

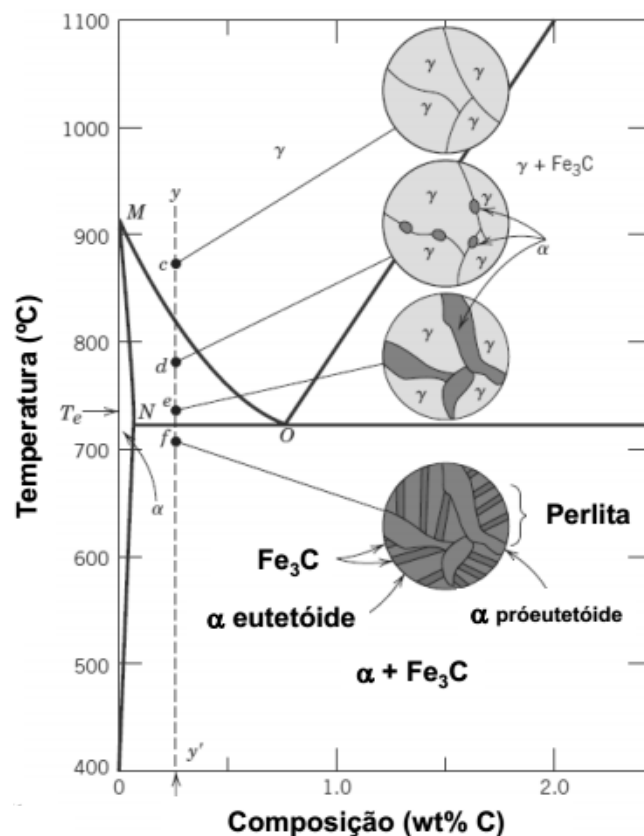


Figura 2: Região do diagrama Fe-C, mostrando um exemplo das transformações de fases em uma liga hipoeutetóide. Fonte: (CALLISTER, 2002). Adaptado.

Vale ressaltar que essas transformações de fases ocorrem em condições de equilíbrio, ou seja, em gradientes de temperatura que apresentam variação lenta.

Assim, saindo dessas condições, as microestruturas geradas são modificadas alterando as propriedades mecânicas do material (NUNES e KREISCHER, 2010).

2.2 TRANSFORMAÇÕES DE FASE FORA DO EQUILÍBRIO

O processo de têmpera é um exemplo de transformação de fase fora do equilíbrio, pois nela o material é aquecido lentamente até uma determinada temperatura seguida de um patamar de forma a garantir a homogeneidade de temperatura na peça e em seguida, a mesma sofre um rápido resfriamento. A Figura 3 mostra um exemplo característico do processo de têmpera.

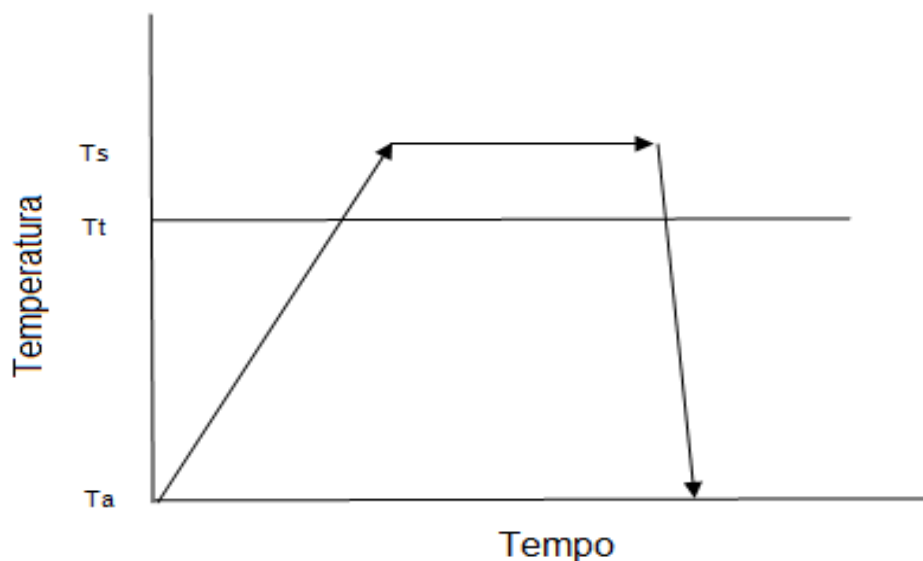


Figura 3 - Tempera em função do tempo e temperatura, onde, T_a , T_t e T_s são as temperaturas ambiente, de transformação e de solubilização respectivamente.

Fonte: (NUNES e KREISCHER, 2010). Adaptado.

Na têmpera, a estrutura que se obtém é denominada de martensita. A martensita apresenta austenita não transformada e de grãos alongados sob a forma de agulhas, onde o carbono é retido como impureza intersticial em uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), cuja combinação resulta em uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), onde os parâmetros de rede **a**, **b** e **c** são de

mesmo tamanho na estrutura CCC e na estrutura TCC **a** é diferente de **b** e **c** como mostrados na Figura 4 (NUNES e KREISCHER, 2010).

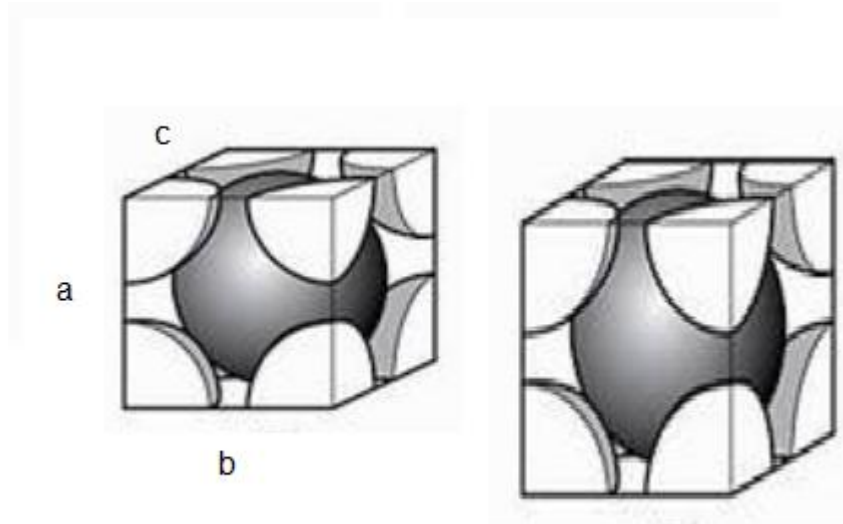


Figura 4 - Estruturas CCC e TCC
Fonte: (SHACKELFORD, 2008). **Adaptado**

Dessa forma, como a condição de equilíbrio não é satisfeita devido a rápida mudança de temperatura, se faz necessário, o uso de outros diagramas de transformação para a realização do estudo, como é o caso das curvas TTT (Tempo-Temperatura-Transformação).

As curvas TTT são assim denominadas devido ao tipo de resfriamento que essa representa, ou seja, a partir da temperatura eutetóide que é o ponto **O** mostrado na Figura 1. Este ponto é o de menor temperatura de equilíbrio entre a ferrita e a austenita.

Partindo da região austenítica, quando o material é resfriado rapidamente até uma determinada temperatura e constante, ocorrerá uma transformação da austenita de forma isotérmica. Na Figura 5, as famílias de curvas representam os limites percentuais de transformação de fase, o eixo vertical representa a temperatura e o eixo horizontal representa o tempo em escala logarítmica. (SHACKELFORD, 2008)

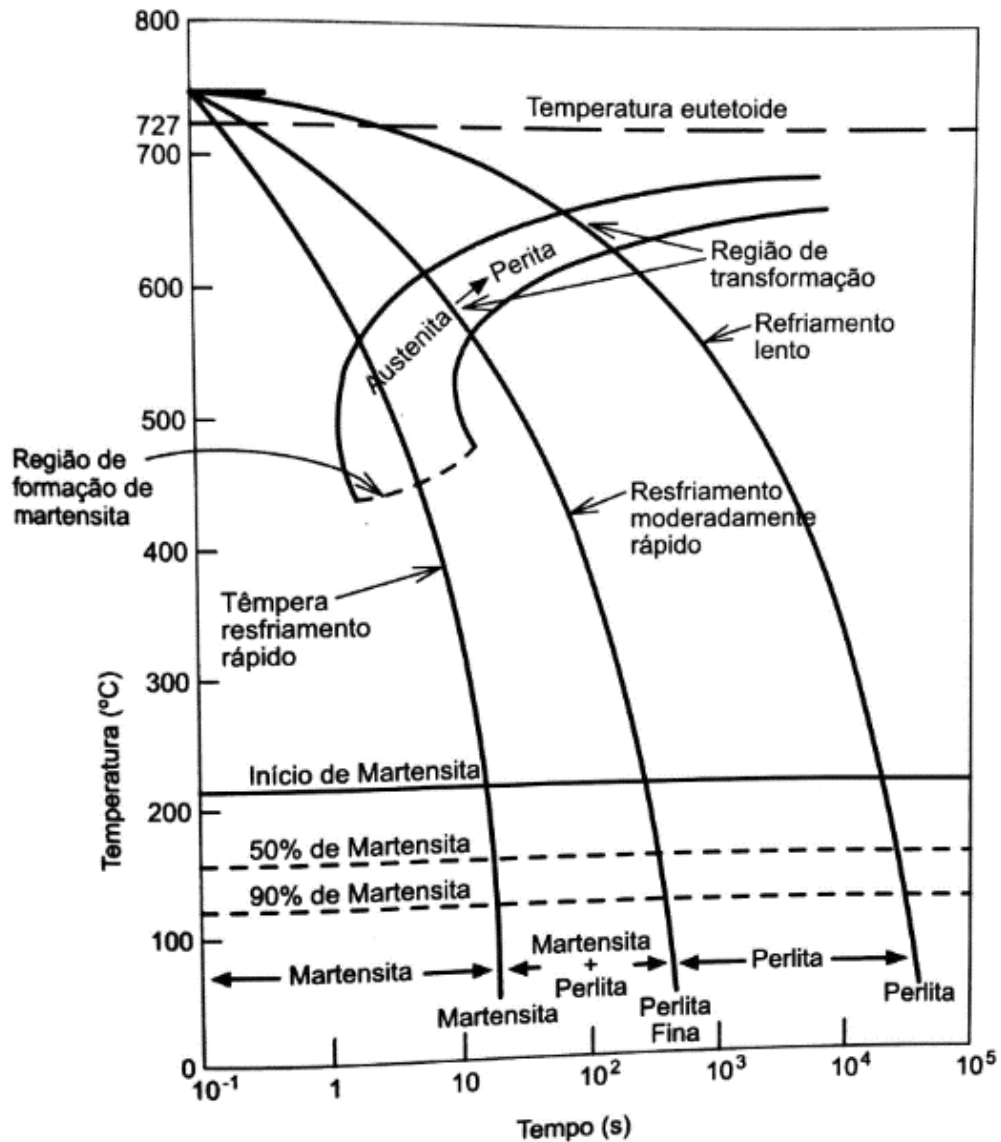


Figura 5 - Diagrama de transformação para uma liga Fe-C eutetoide, mostrando as zonas de Perlita, Martensita-Perlita e Martensita. Fonte: (NUNES e KREISCHER, 2010)

2.3 TEMPERABILIDADE

O termo temperabilidade é a característica que define a variação de dureza do material, desde a superfície até o seu núcleo e está relacionado com a capacidade desse material de formar martensita (COLPAERT, 2008).

Dessa forma, há alguns fatores a serem considerados nesse fenômeno, tais como, o teor de carbono, os elementos de liga presentes, os meios de têmpera (taxa

de resfriamento), a severidade de têmpera, a geometria da peça e sua transferência de calor. (SCHEIDEMANTEL, 2014).

Ressaltando os fatores ditos anteriormente, vale lembrar que o teor de carbono e os elementos de liga deslocam o cotovelo das curvas de transformação da austenita para a direita, representado pela curva de transformação austenita-perlita representada na Figura 5.

2.4 MEIO DE TÊMPERA E SEVERIDADE

Quando se trata de endurecimento de ligas metálicas através de tratamento térmico, o objetivo de forma geral é consegui-lo de forma uniforme durante toda a seção da peça. Para isso, o método de *Grossmann* foi desenvolvido de forma a definir a profundidade de endurecimento do material, onde barras cilíndricas de aço, com diâmetros crescentes, são austenitizadas e resfriadas rapidamente, em um sistema controlado, sofrendo transformações martensíticas. Após esse processo, as seções transversais das barras têm seu perfil de dureza determinado do centro até a superfície e então um gráfico dessas propriedades é traçado, como mostra a Figura 6 (CHIAVERINI, 2008).

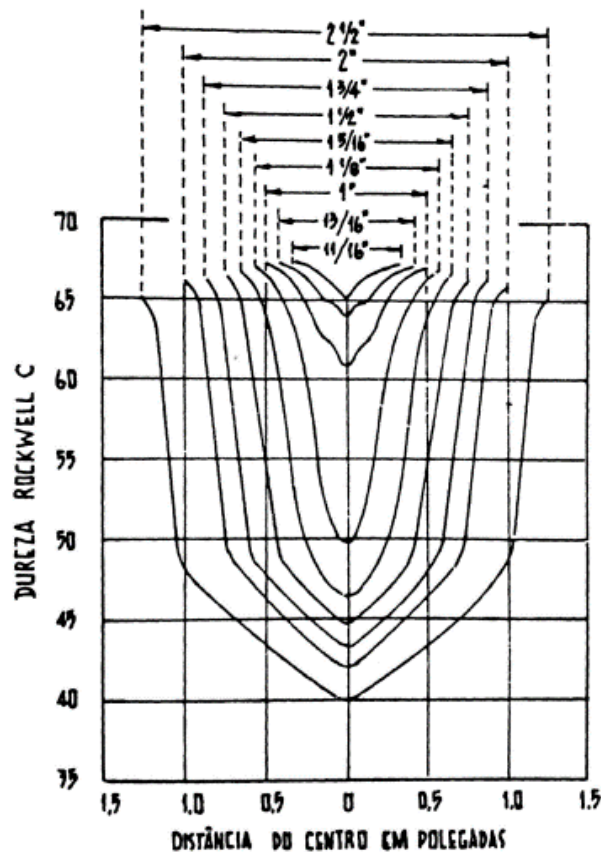


Figura 6 - Perfil de dureza obtido através dométodo de *Grossman*
 Fonte: (CHIAVERINI, 2008)

Diante dessa figura, é possível perceber que quanto menor o diâmetro da barra, mais uniforme será o perfil de dureza. Como, é praticamente impossível de se conseguir uma estrutura martensítica total durante toda a seção da peça, foi convencionado que quando um aço for endurecido por têmpera até uma distância de 50% do seu centro (diâmetro crítico) apresentará microestrutura martensítica. A partir disso, é possível então determinar o seu diâmetro crítico, onde se pode determinar graficamente, através da correlação entre as durezas do centro das barras e o seu diâmetro, como mostra a Figura 7 (CHIAVERINI, 2008)

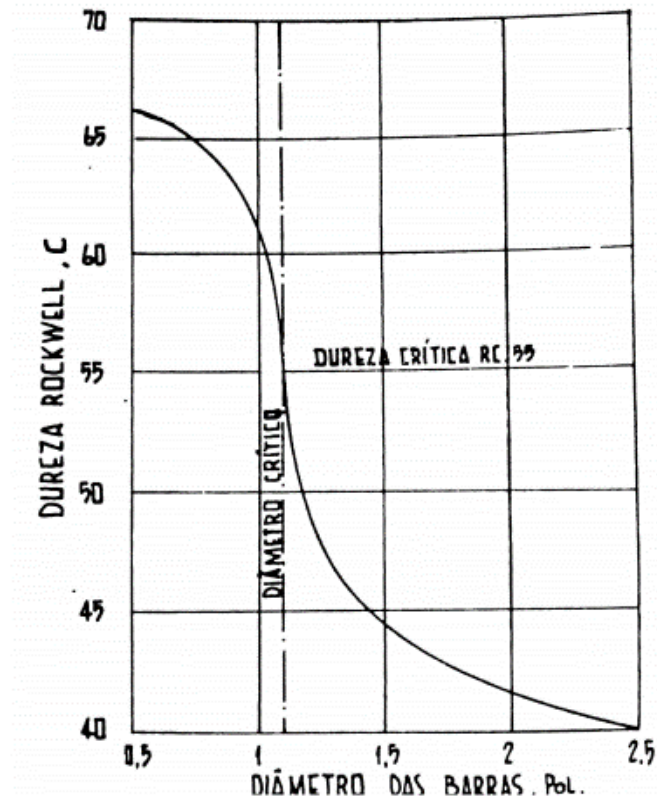


Figura 7 - Correlação entre diâmetro e dureza, representando o diâmetro crítico de um aço.
Fonte: (CHIAVERINI, 2008)

A severidade de têmpera influencia diretamente esses valores devido a velocidade com que o calor da peça é trocado com o meio, influenciando no seu diâmetro ideal (CHIAVERINI, 2008). Este processo também mede a temperabilidade de um aço, mas é relativamente mais demorado e oneroso quando comparado ao ensaio *Jominy*, pois necessita empregar aços de mesma composição em diversos diâmetros.

2.5 DUREZA

A dureza é uma propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta risco ou a formação de uma marca permanente. O ensaio de dureza consiste na impressão de uma pequena marca feita na superfície da peça pela aplicação de pressão com uma ponta de penetração. A medida da dureza do

material ou da dureza superficial é dada como função das características da marca de impressão e da carga aplicada para cada tipo de ensaio de dureza empregado. (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2000)

Dentre os ensaios de dureza mais utilizados (*Brinell, Vickers, Rockwell, Knoop*), o mais utilizado é o método *Rockwell*, devido à sua simplicidade e gama de escalas, através de diferentes penetradores e cargas aplicadas. Os valores de cada escala variam de 0 a 130, e conforme esses valores se aproximam de seus limites superior ou inferior, sendo prudente mudar a escala (tipo de indentador) devido a imprecisões que podem vir a ocorrer. A Figura 8 ilustra as escalas empregadas (A, C, D, B, F e G), tipo de indentador e carga aplicada para cada escala em uso. (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2000)

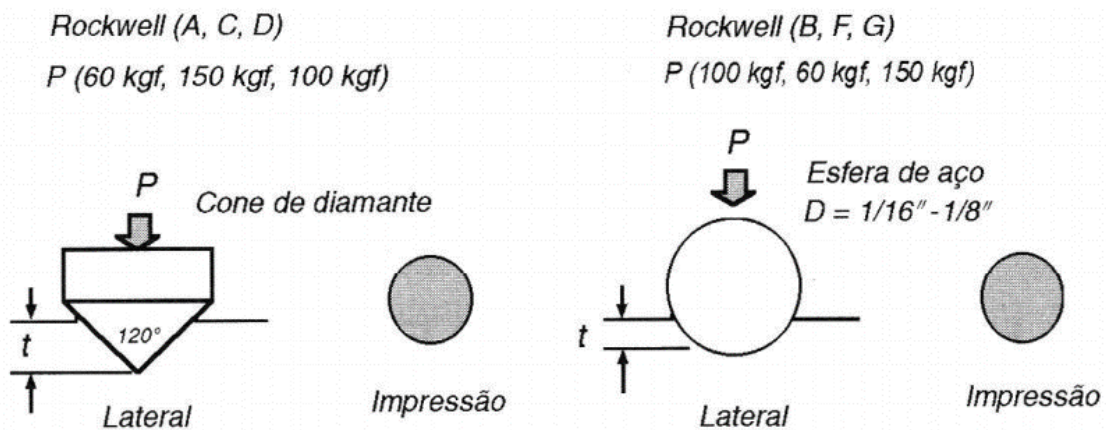


Figura 8 - Tipos de indentadores e carga máxima aplicada conforme a escala utilizada no ensaio de dureza tipo *Rockwell*.

Fonte: (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2000, p. 66). Adaptado.

Cabe ressaltar que nesse tipo de ensaio aplica-se previamente uma pré-carga no material de 10kgf, com a finalidade de eliminar eventuais defeitos superficiais, melhorar na fixação do corpo de prova no suporte e causar uma pequena deformação plástica no material, visando eliminar os efeitos elásticos no mesmo. (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2000, p. 77)

Como os valores de dureza da escala *Rockwell*, são dependentes do equipamento, a correta seleção do indentador e da carga aplicada deve ser observada para atingir resultados satisfatórios. Dessa forma, como exemplo, ao analisar um material temperado, deve-se escolher a escala C e o indentador de diamante, com carga de 150kgf e na escala B o indentador de esfera de aço com

carga de 100kgf. (DIETER, 1981, p. 339). A norma que padroniza os ensaios de dureza *Rockwell*, é a ASTM E 18.

2.6 ENSAIO *JOMINY*

A vantagem do ensaio *Jominy*, em relação ao método de *Grossman*, é que ele utiliza apenas um corpo de prova para a caracterização, enquanto o método de *Grossman* utiliza vários corpos de prova de diferentes diâmetros, o que vem a causar um tempo de ensaio mais longo e com maior custo.

O corpo de prova *Jominy*, apresenta taxa de resfriamento conhecida ao longo de seu comprimento, independentemente do tipo de aço utilizado, porém é dependente da temperatura em que se inicia o resfriamento do corpo de prova. Segue no Quadro 1 os valores de suas taxas conforme o comprimento, partindo da temperatura de 704°C. Essa taxa de resfriamento pode ser obtida através de simulações computacionais por análise de elementos finitos englobando a transferência de calor.

Distância J (1/16")	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
°C/s	272	170	108	69	43	31	23	18	14	12
Distância J (1/16")	11	12	13	14	15	16	20	24	28	32
°C/s	11	9	8	7	6	5,5	4	3	2	2

Quadro 1 - Taxa de resfriamento no corpo de prova *Jominy*.
Fonte - (CRUZ, 2005)

A norma ASTM A255, que rege o ensaio *Jominy* e estabelece limites de concentrações de elementos de liga, os quais estão listados na Tabela 1.

Elemento	Variação em massa %
Carbono	0,10 - 0,70
Manganês	0,50 - 1,65
Silício	0,15 – 60
Níquel	0 - 1,35
Cromo	0 - 1,50
Molibdênio	0 - 0,55

Tabela 1 - Limites de concentração dos elementos constituintes para a aplicabilidade do ensaio *Jominy*
Fonte - (ASTM, 2004)

O teste consiste em resfriar uma extremidade de um espécime cilíndrico de 1,0" de diâmetro e 4,0" de comprimento com água e medir a resposta de endurecimento em função da distância a partir da extremidade temperada. Esse é o modelo preferencial de uso para ensaio, pois a norma ainda remete a outros modelos, onde se pode alterar, tanto o comprimento como o diâmetro e com isso se altera o diâmetro de jato de água e sua velocidade (ASTM, 2004).

O aparato de ensaio consiste em um suporte onde o corpo de prova é encaixado e sua extremidade é submetida a um jato de água bombeado de forma vertical para cima (temperatura entre 5°C e 30°C) com diâmetro de 1/2", a uma distância de 1/2" abaixo do corpo de prova, que deve subir a uma altura de 2 1/2" quando livre de obstáculos. O controle desse jato pode ser feito através de uma válvula. A Figura 9 mostra as cotas do corpo de prova e do orifício de saída de água e a Figura 10 explica como funciona o dispositivo. Vale ressaltar que o suporte onde o corpo de prova será posicionado deve estar totalmente seco no início do teste, e que o tempo para que o corpo de prova seja retirado do forno e posicionado não seja superior a 5 segundos pois, mesmo que o ar não tenha uma capacidade de troca térmica muito alta, o mesmo resfria a peça e altera a estrutura presente influenciando nos resultados de dureza, além disso o teste deve durar no mínimo 10 minutos e correntes de ar em torno do corpo devem ser evitados. Após esse tempo, caso o corpo ainda esteja quente deve-se mergulhá-lo em água para o resfriamento completo (ASTM, 2004).

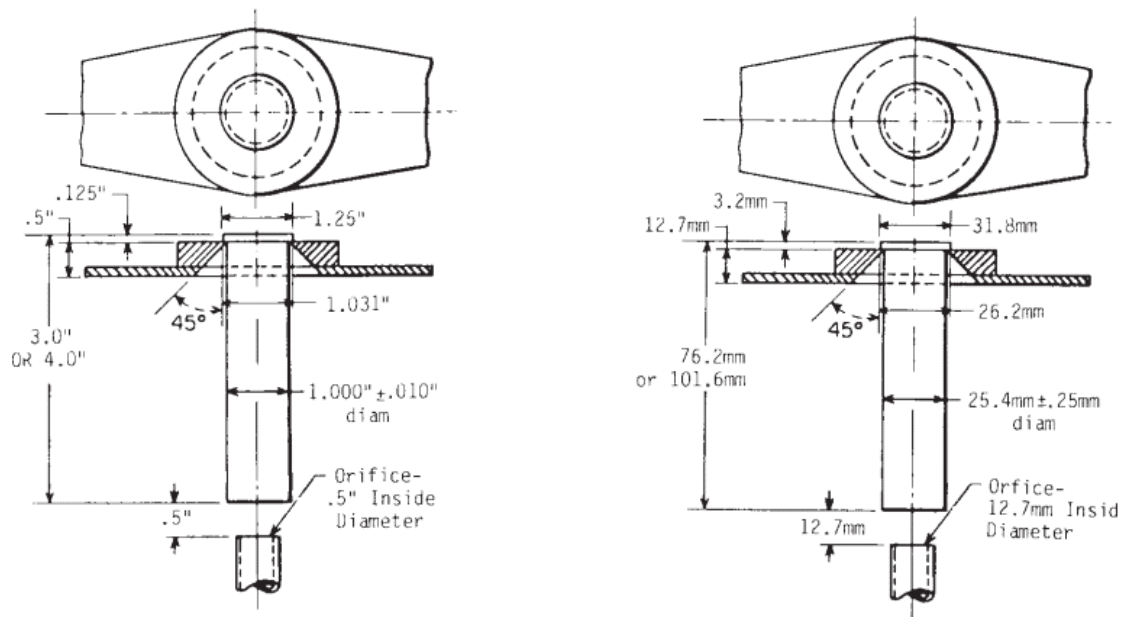


Figura 9 - Desenho técnico do corpo de prova e posicionamento do jato de água.
Fonte - (ASTM, 2004, p. 3)

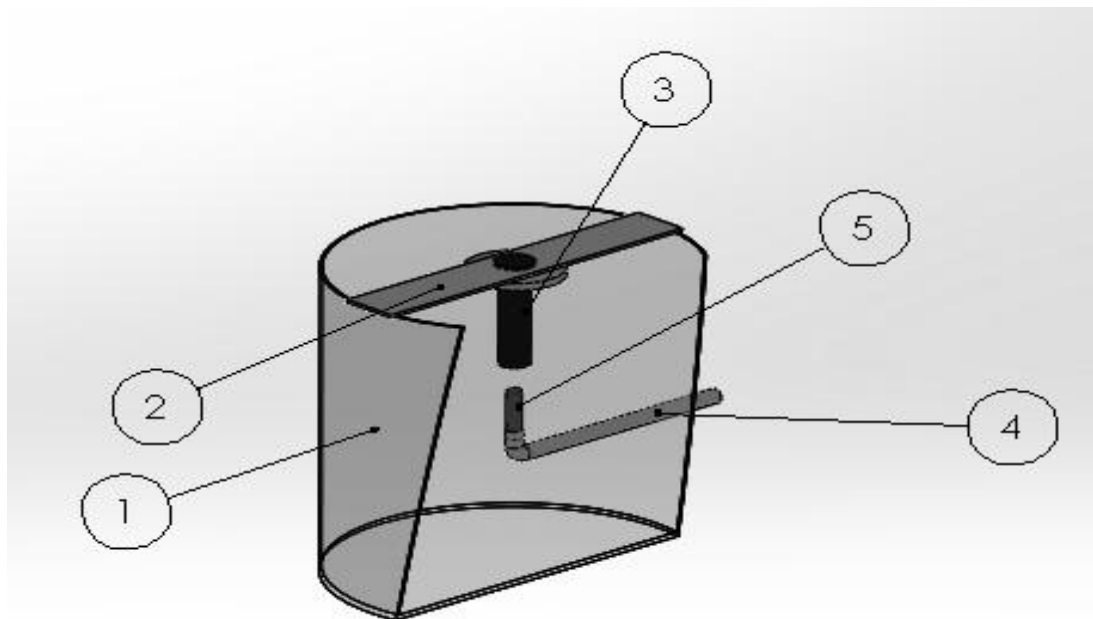


Figura 10 - Vista em corte do aparato *Jominy*, mostrando como o jato de água deve estar posicionado sob o corpo de prova. Onde 1 é a caixa, 2 suporte do corpo de prova, 3 corpo de prova, 4 tubulação de entrada de água e 5 jato de água
Fonte - Autoria própria.

Após o corpo de prova sofrer seu histórico térmico, o mesmo deve ser retificado a uma profundidade mínima de 0,4mm em duas faces uma a 180° um do outra ao longo do comprimento corpo, pois rebaixas inferiores a esse valor comprometem os resultados e reprodutibilidade do ensaio de dureza (ASTM, 2004)

Durante o ensaio de dureza, o corpo a ser ensaiado deve permanecer sobre um suporte que não permita movimentos verticais durante a aplicação da carga máxima, além disso, apoiar o espécime em um bloco do tipo V é expressamente proibido. Outra restrição do ensaio de dureza, para a obtenção desse perfil, é que as identificações devem ser tomadas a cada 1/16" até a 16ª medida, e após isso devem seguir as distancias de 18/16", 20/16", 22/16", 24/16", 28/16" e 32/16", ou nas medidas do Sistema Internacional, a cada 1,5mm até a 16ª medida e e depois em 30, 35, 40, 45 e 50mm lembrando de descartar os valores inferiores a 20HRC, devido a sua imprecisão próximo das pontas escala. O ensaio de dureza deve ser avaliado nos 2 rebaixos do corpo de prova, e caso os valores obtidos se distanciarem a um valor de 4HRC, o teste deve ser refeito em rebaixos com ângulos de 90° em relação aos rebaixos anteriores, caso ainda assim houver discrepância de resultados o corpo de prova é descartado e deve ser refeito. (ASTM, 2004)

2.6.1 Curvas de Temperabilidade

As curvas de temperabilidade dos ensaios *Jominy*, relacionam a dureza do material com o seu comprimento. Os resultados dessas medições geram uma curva que decresce da posição de 100% de transformação martensítica até obtenção de microestrutura perlítica ou ferrito-perlítica. (MARTINS, 2002)

Diante disso é interessante diagramar essas correlações como mostra a Figura 11.

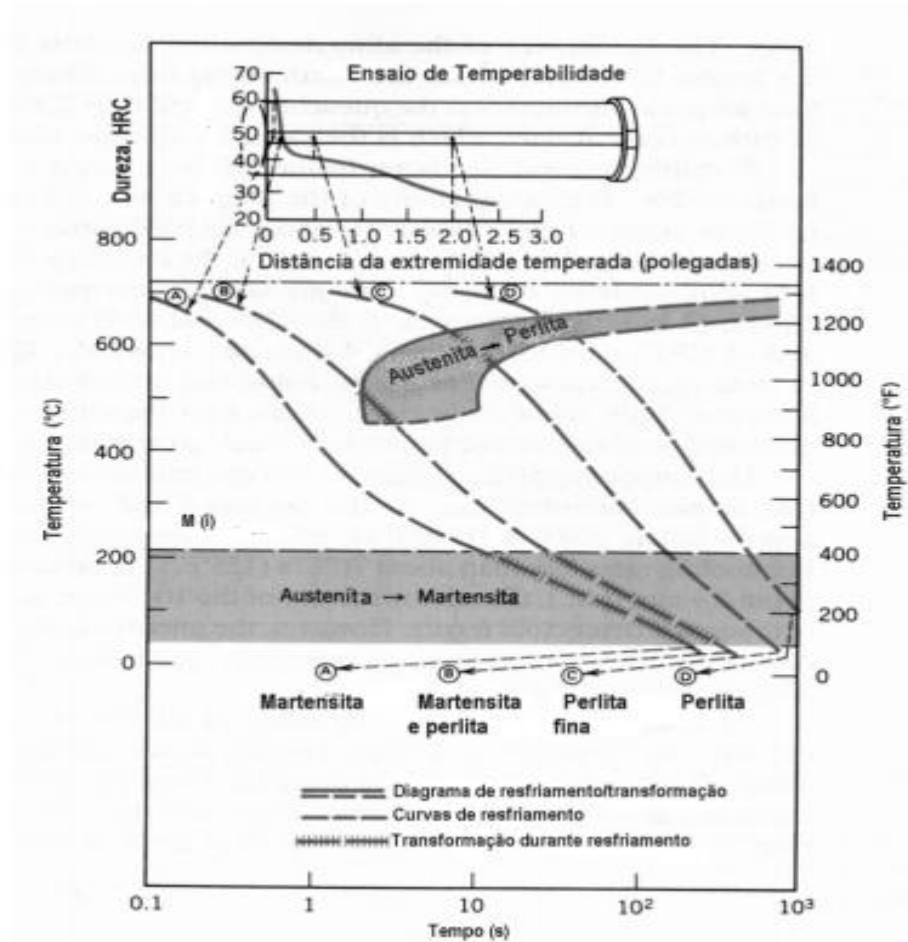


Figura 11: Exemplo de distribuição da dureza em um ensaio *Jominy*.
Fonte: (CALLISTER, 2002)

Através da leitura da Figura 11, percebe-se que a curva A não entra no campo de transformação austenita-perlita, explicando o alto valor de dureza obtido, já as curvas B, C e D entram no campo de transformação da austenita para a perlita, que diminuem a quantidade de martensita formada e explica os valores de dureza menores nesses pontos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

- Chapas de aço estrutural (SAE 1020)
- Tubos e conexões de aço galvanizado
- Tubos, conexões e adaptadores de PVC
- Adesivo para tubos de PVC
- Bomba d'água
- Válvula de controle
- Mangueiras
- Equipamento de solda ESAB modelo 187M
- Corpos de prova em aço 1045 com certificado fornecido pela ArcelorMittal
- Forno mufla até 1200°C Jung modelo 1712
- Durômetro Insize modelo ISH/RSR150
- Água
- Torno CNC Sinitron modelo LT-52
- Retificadora horizontal
- Ferramentas de metrologia (paquímetro, micrômetro)
- Ferramentas de usinagem

3.2 MÉTODOS

Na Figura 12 é apresentado o diagrama esquemático dos procedimentos realizados durante esse trabalho.

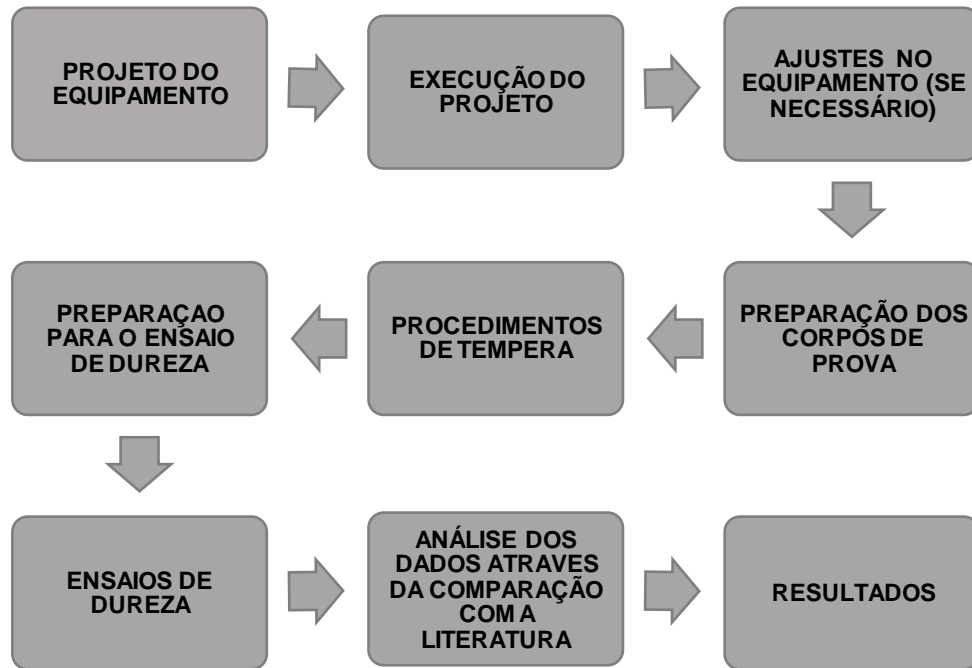


Figura 12: Diagrama esquemático do procedimento metodológico.
 Fonte: Autoria própria.

3.2.1 Projeto e Construção

O projeto do aparato foi baseado na descrição da norma ASTM A255. Para a construção da caixa, foi escolhida a forma cilíndrica devido à facilidade de se obter esse produto em empresas de corte e dobra. O fundo da caixa e os pés foram soldados em aparelho de soldagem MIG, a tubulação escolhida foi de 3/4" em aço galvanizado, juntamente com as conexões. Para a o dimensionamento da bomba foram feitos cálculos utilizando o princípio de trabalho e energia para um sistema de partículas, a qual resultou em uma vazão mínima de 509 L/h, os quais os cálculos seguem abaixo. Partindo da necessidade de uma altura de coluna d água de 63,5mm de altura pelo princípio de trabalho e energia chega-se a velocidade de saída de água do bocal.

$$\sum T_1 + \sum U_{1-2} = \sum T_2 \quad (1)$$

$$\frac{mv^2}{2} - mgh = 0$$

$$v^2 = 2gh$$

$$v = 1,116m/s$$

Multiplicando-se a velocidade de saída com a área de saída do bocal, se obtém a vazão volumétrica.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = 0,0001268 \text{ m}^2 \quad (2)$$

$$\text{Vazão Volumétrica} = vA \quad (3)$$

$$\text{Vazão volumétrica} = 0,0001413 \text{ m}^3/\text{s} = 0,01413 \text{ L/s} = 8,47 \text{ L/min} = 508,2 \text{ L/h}$$

Para a confecção do suporte foi utilizado uma chapa de 3 mm de espessura e 75 mm de largura juntamente com um disco de 100 mm de diâmetro por 10 mm de espessura. As duas peças foram centralizadas, furadas, rosqueadas e em seguida levadas para a usinagem de forma a se obter as medidas estabelecidas pela norma, que são 12,7mm de altura, 26,2mm de diâmetro com inclinação de 45° do topo para a base como mostrado na Figura 13. A maneira pela qual este dispositivo foi projetado é para possibilitar o intercâmbio do suporte, caso seja necessária sua troca para outros modelos de corpos de prova.

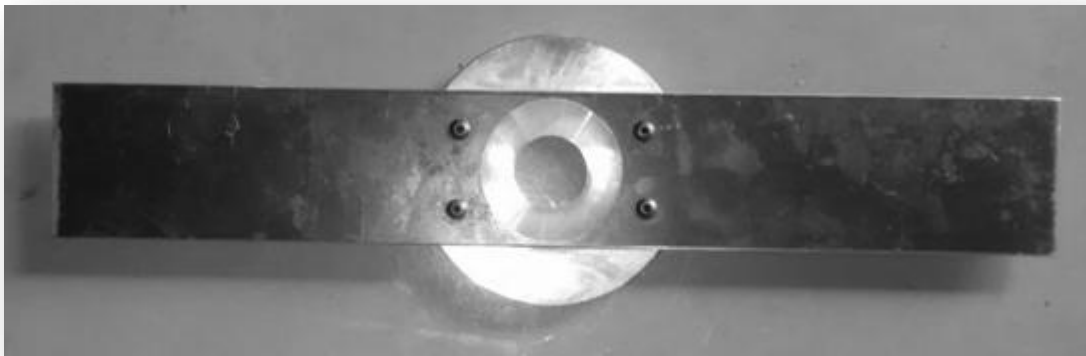


Figura 13: Suporte do corpo de prova
Fonte: autoria própria.

Após esses processos, o aparato foi então levado novamente para a soldagem, onde se fixou o suporte por soldagem e, em seguida, se fixou a tubulação de forma a obter o jato de água centralizado e perpendicular ao centro do furo do suporte. Como segue na Figura 14.



Figura 14: Aparato em construção e ajustes
Fonte: Autoria própria

Para a construção do bocal de saída, foram utilizadas duas partes. A primeira parte foi feita a partir de um tubo de aço galvanizado no qual foi feito rosca em um lado para que possibilitasse a regulagem de altura entre a saída do jato d'água e o corpo de prova. A segunda parte e do outro lado tubo, foi usinado para encaixar o bocal com a saída de 1/2" de diâmetro. O bocal foi usinado, fazendo uma furação da saída e também rebaixas necessários para encaixe no tubo. Para evitar que a força hidráulica ejetasse o bocal, foram inseridos 2 anéis de borracha como componentes de vedação e fixação entre o bocal e o tubo, possibilitando também o intercâmbio do bocal, como segue na Figura 15.



Figura 15: Bocal de saída de água
Fonte: Autoria própria

Para retardar o processo de corrosão do equipamento, o mesmo foi pintado com tinta base óleo em pistola a ar de alta pressão na cor cinza.

3.2.2 Execução do Experimento

Os corpos de prova foram preparados a partir de tarugo de 1.1/4" fornecido pela ArcelorMittal, com certificação, através de usinagem em torno CNC, na empresa INDÚSTRIA E COMERCIO DE USINAGENS DUBIELA LTDA. Após a usinagem dos corpos, os mesmos foram normalizados seguindo as recomendações da norma ASTM-A255 em forno mufla a 870°C durante 1 hora.

O material recebido tem certificado e se encontra no apêndice desse trabalho. As concentrações percentuais em massa estão no Quadro 2.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Al
%	0,4480	0,7910	0,2300	0,0201	0,0120	0,0231
Elemento	Cu	Cr	Ni	Mo	V	
%	0,0282	0,0214	0,0133	0,0027	0,0043	

Quadro 2: Composição do aço recebido

Durante o processo de normalização, devido às características do forno presente no laboratório (sem controle de atmosfera) ocorreu a formação de carepas devido à descarbonetação em um corpo de prova como mostrado na Figura 16, provavelmente em função da oxidação da superfície do material. Isso fez com fosse repensado a forma de realizar a normalização no próximo corpo em ambiente enclausurado, bem como, as duas austenitizações nesse ambiente, como solução para esta descarbonetação.

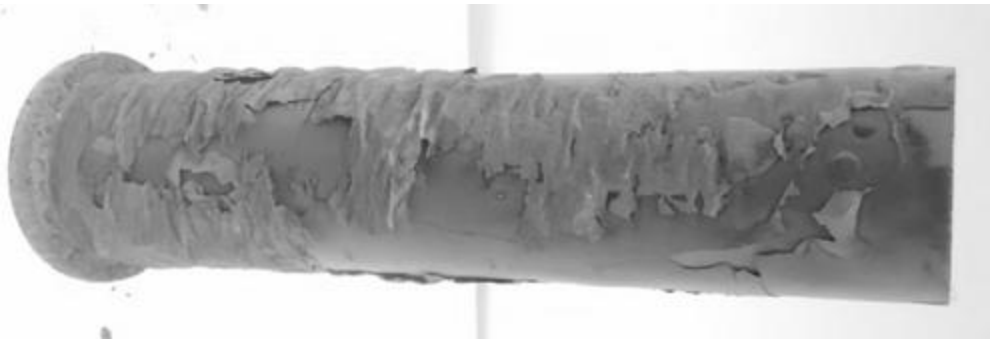


Figura 16: Primeiro corpo de prova normalizado que apresentou carepas de descarbonetação.

Esse receptáculo, ou recipiente de sacrifício, foi confeccionado seguindo orientações da norma, a qual possibilita três opções, onde a que melhor atendia aos requisitos, era o uso de uma camada de material carbonáceo na base do sistema, onde o corpo de prova estava apoiado. O diâmetro de apoio é a região a qual as medidas de dureza não são levadas em consideração. A Figura 17 mostra o ambiente enclausurado.



Figura 17: ambiente enclausurado
Fonte: Autoria própria.

Devido às características dimensionais do forno e posicionamento adequado dos corpos para evitar empenamento, o receptáculo causou problemas quanto ao tempo de retirada dos corpos de prova de dentro do forno como mostra a Figura 18. Com isso, não foi possível remover a tampa e o cilindro para a retirada do corpo de prova de dentro do forno, e dessa forma foi necessário deitar o sistema de forma a retirar o corpo de prova pelo fundo do receptáculo.



Figura 18: Receptáculo posicionado na mufla.
Fonte: Autoria própria.

Feitas as normalizações, os corpos foram levados a austenitização a uma temperatura de 800°C durante 30 minutos e em seguida levados para o aparato *Jominy*, tomando-se o cuidado com o tempo de retirada o corpo do forno e posicionamento no aparato. O ensaio *Jominy* correu durante 10 minutos, com o jato d'água constante e a temperatura ambiente, mantendo-o uniforme durante todo o experimento, ressaltando que, o jato de água, não trabalhava sob refluxo. Após esse tempo o ensaio foi interrompido e o corpo de prova foi então resfriado completamente em um balde com cerca de 10 L de água.

Com os corpos de prova resfriados foi providenciada uma dureza prévia da superfície atacada pelo jato de água. Esta superfície foi preparada para o ensaio de dureza, cujo o valor encontrado foi de 39,4 HRC. Na sequência, foi efetuada a execução dos planos nos corpos de prova longitudinalmente, através de operações de usinagem de fresamento e retífica, necessários para a execução do ensaio de dureza ao longo do corpo de prova. Estas operações de usinagem, foram realizadas na empresa PROCED em Londrina-PR. Estas operações foram necessárias, pois lixar manualmente esses corpos de prova, tomariam um tempo elevado e poderia correr o risco de não se obter dois planos paralelos no material.

Com os corpos já tendo seus planos paralelos feitos, procedeu-se então para os ensaios de dureza, obtendo os valores para o perfil de dureza do material, como segue no Quadro 3: Dados de dureza obtidos.

Distância J (1/16")	CP-1 Dureza (HRB)	CP-2 Dureza (HRB)	Distância J (1/16")	CP-1 Dureza (HRB)	CP-2 Dureza (HRB)
1	96,2	95,5	12	76,2	77,7
2	90,3	89,8	13	76,2	77,6
3	87,3	84,7	14	75,9	77,4
4	84,3	83,3	15	75,7	77,1
5	82,8	81,9	18	75,7	77
6	80,4	80,2	20	75,6	76,7
7	79,3	78,6	22	75,4	75,9
8	78,6	78,3	24	75	75,9
9	77,7	78,2	28	74,8	73,2
10	76,9	78,2	32	72,5	72,2
11	76,6	77,7			

Quadro 3: Dados de dureza obtidos

Fonte: Autoria própria

Após os resultados obtidos e comparados com a referência literária do trabalho “TEMPERABILIDADE *JOMINY* E INFLUÊNCIA DO REVENIDO SOBRE A DUREZA - UM ESTUDO EM AÇOS ESTRUTURAIS NACIONAIS” (MARTINS, 2002), notou-se que os resultados não foram condizentes com a mesma.

Ainda assim, foi necessária a conversão da escala *Rockwell B* para *Brinell*, pois é a forma a qual estava disponível para comparação entre a literatura e os resultados obtidos.

4 RESULTADOS

A partir do Quadro 3, foi traçado o gráfico de Dureza x Distância *Jominy* conforme mostrado na Figura 19.

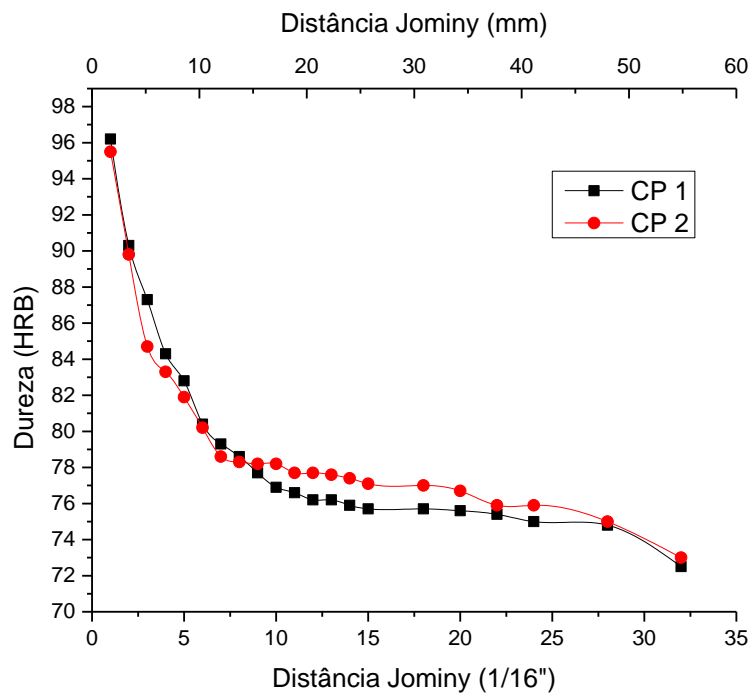


Figura 19: Perfil de dureza obtido nos corpos de prova
Fonte: Autoria própria

Como os resultados obtidos são diferentes da escala comparativa, cabe fazer uma comparação em uma unidade a qual englobe tanto os resultados obtidos como os da literatura, como mostrado na Figura 20.

Os resultados demonstraram uma boa reprodutibilidade na execução do experimento, o que indica o bom funcionamento do equipamento, e que erros provenientes de composição e certificados podem ter impactado nos resultados esperados para um aço SAE 1045.

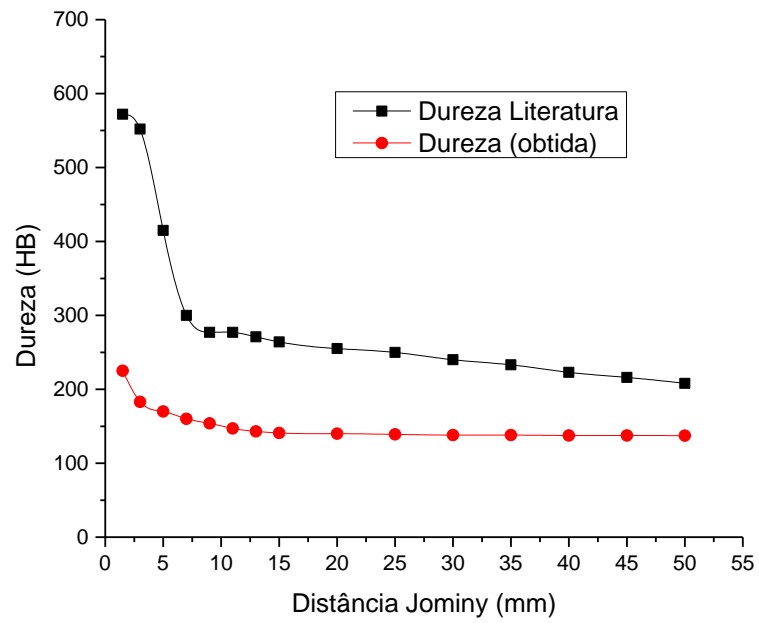


Figura 20: Comparativo entre o resultado obtido e a literatura
Fonte: Autoria própria.

A partir da imagem, nota-se o mesmo comportamento de queda abrupta seguido de linearização da curva.

5 CONCLUSÃO

Embora os resultados obtidos não sejam condizentes com a literatura, nota-se que o perfil de queda de dureza com o comprimento se comporta de forma semelhante ainda que as escalas se apresentem em unidades diferentes. A observância do jato de água se mantendo uniforme durante o ensaio *Jominy*, bem como o perfil de queda de dureza do material indica o funcionamento do equipamento.

Contudo, vale ressaltar que durante os ensaios, houve problemas com o tempo de retirada do corpo de prova até ser levado ao equipamento, podendo vir a propagar erros quanto esses valores de dureza. Outra ressalva é a aquisição do material, pois embora tenha sido adquirido com certificados indicando a procedência, não se pode garantir que não houve erro de logística e por consequência a utilização de um material que não o especificado, pois foi tomado como base composicional do material ensaiado apenas seu certificado.

Além dos problemas supracitados, a temperatura do material foi observada apenas com base no termopar presente no forno, não possibilitando a medida da temperatura diretamente no corpo de prova ensaiado, o que não garante a homogeneidade de temperatura nesse e nem que a temperatura do tratamento térmico tenha atingido a austenitização do material, podendo influenciar nos resultados.

Para trabalhos futuros, recomenda-se refazer o experimento com o mesmo material observando-se a temperatura do corpo de prova antes de sua retirada do forno e o tempo até seu posicionamento no equipamento. Caso os valores obtidos sejam condizentes com a literatura, possibilitará sua homologação. Isso só não foi feito durante esse trabalho devido ao tempo de projeto e execução que acabou por tomar o tempo de ensaio e análise dos dados.

6 REFERÊNCIAS

ASTM, I. S. W. **A255-02 Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel**. West Conshohocken (us): [s.n.], v. 01.05, 2004.

CALLISTER, W. D. J. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CHIAVERINI, V. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. 1. ed. Sao Paulo: ABM, 2008.

CIMM. CIMM. **Centro de Informação Metal Mecânica**, 2016. Disponível em: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6434-diagramas-fe-fesub3subc#.VzvL_fkrLIV>. Acesso em: 10 maio 2016.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

CRUZ, L. C. D. **Avaliação da capacidade do processo de fabricação em atender especificação para a temperabilidade do aço SAE 1548M**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 81. 2005.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

FILHO, E. R. et al. **Projeto do produto**. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2011.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. D. **Ensaio dos materiais**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

MARTINS, M. **Temperabilidade jominy e influência do revenido sobre a dureza - Um estudo em aços estruturais nacionais**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 115. 2002.

NUNES, L. D. P.; KREISCHER, A. T. **Introdução à metalurgia e aos materiais metálicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 376 p.

SCHEIDEMANTEL, R. H. Utilização de métodos teóricos para a avaliação da temperabilidade Jominy de aços com diferentes composições químicas. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 70. 2014.

SHACKELFORD, J. F. Introdução à ciência dos materiais para engenheiros. 6. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008.

APÊNDICE

Cronograma de atividades

Atividades	2016						2016					
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1. Revisão Bibliográfica	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
2. Obtenção da matéria prima	■											
3. projeto e construção do equipamento							■	■				
4. Preparação das amostras						■	■	■	■			
5. Ensaio das amostras								■	■			
6. Análise de dados								■	■			
7. Elaboração do TCC		■	■	■	■	■	■	■	■			
8. Apresentação TCC 1					■	■						
9. Apresentação TCC 2										■		

Quadro 4: Cronograma das atividades a serem desenvolvidas durante o projeto.

Fonte: Autoria Própria.

CERTIFICADO DO MATERIAL ENSAIADO



CERTIFICADO DE QUALIDADE
 Numero: 0004731993/2015
Sistema de Gestão Integrado - Normas ISO9001, ISO14001, OHSAS18001 e TS 16949

ArceLorMittal
Aços Longos

ArceLorMittal

Cliente: KAUEFER COMERCIAL FERRO E AÇO LTDA Pedido: PED 880 Material: 117418 Aço: 1045 Corrida: B591600 Ordem de Venda: 6168764 Nota Fiscal: 000143315

Produto: TREFILADO REDONDO Especificação: SAE 1045 Bitola: 31,75 mm Acond.: 6.000 mm N° Lotes: 1 Peso (Kg): 1.272

Análise Química

C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Sn	Mo	V	Pb	B
0.4480	0.7910	0.2300	0.0201	0.0120	0.0231	0.0282	0.0214	0.0133	X	0.0027	0.0043	X	X

Complementares

MACROGRAFIA-C	MACROGRAFIA-R	MACROGRAFIA-S
X	X	X

Observações:
 INSPECIONADO POR CORRENTE PARASITA COM SONDAS ROTATIVAS

SAE 1045

Data: 21.02.2015

Guilherme
 Gustavo de Alvaranga Couto
 Engenheiro Mecânico
 Crea - RG 8854

Este documento certifica que o material aqui relacionado foi produzido, ensaiado e aprovado conforme requisitos de norma ou especificação solicitada.
 Certificamos que todo material relacionado acima foi produzido, testado e aprovado de acordo com a legislação vigente, não contém radiação em níveis prejudiciais ao ser humano.
 No caso de dúvidas, entre em contato com a nossa Assessoria ao Cliente 0800 15 1221 = www.arcelormittal.com.br