



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ – REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FRANCISCO ALVES MAIA DE ALMEIDA JÚNIOR

**CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO E VALIDAÇÃO DE UMA MÁQUINA PARA
ENSAIOS JOMINY**

MOSSORÓ
2017

FRANCISCO ALVES MAIA DE ALMEIDA JÚNIOR

**CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO E VALIDAÇÃO DE UMA MÁQUINA PARA
ENSAIOS JOMINY**

Monografia apresentada á Universidade
Federal Rural do Semi-árido – UFERSA.
Campus Mossoró para a obtenção do título
de Engenheiro Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Manoel Quirino da
Silva Junior – UFERSA.

MOSSORÓ
2017

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

J95c Júnior, Francisco Alves Maia de Almeida.
 CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO E VALIDAÇÃO DE UMA
 MÁQUINA PARA ENSAIOS JOMINY / Francisco Alves
 Maia de Almeida Júnior. - 2017.
 41 f. : il.

 Orientador: Manoel Quirino da Silva Júnior.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
 Mecânica, 2017.

 1. Ensaio Jominy. 2. Temperabilidade. 3.
 Têmpera. I. Júnior, Manoel Quirino da Silva ,
 orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

FRANCISCO ALVES MAIA DE ALMEIDA JÚNIOR

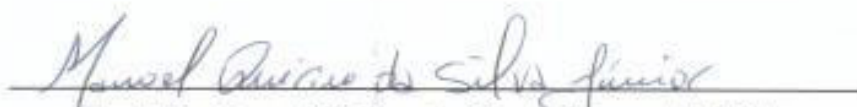
**CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO E VALIDAÇÃO DE UMA MÁQUINA PARA
ENSAIOS JOMINY**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-árido – UFERSA,
Campus Mossoró para a obtenção do título
de Engenheiro Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Manoel Quirino da
Silva Junior – UFERSA.

DATA DE APROVAÇÃO: 22 / 05 / 2017

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Manoel Quirino da Silva Junior – UFERSA
Presidente


Prof. Dr. Francisco Evaristo Uchôa Reis
Membro da Banca Examinadora


Prof. Gutemberg Ferreira Diniz
Segundo Membro

A **José Alves de Almeida** (*in memoriam*),
amado avô, exemplo de honestidade e
simplicidade.

A **Raimunda Rosa Maia Alves** (*in
memoriam*), querida avó, por seu imenso
amor e carinho em todas as horas.

A **Antônio Bandeira da Silva** (*in
memoriam*), meu avô, por sua humildade e
os momentos de alegria que nos
proporcionou em vida.

A **Deus**, por me permitir chegar a esse
momento com saúde, paz e cercado de
pessoas que querem o meu bem.

A **Francisco Alves Maia de Almeida**, meu
pai, meu melhor amigo, que me ensinou o
significado de ser honesto e de amar ao
próximo.

A **Marta Maria Bandeira Alves**, minha
mãe, que tanto me incentivou e não me
deixou desistir de meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por se fazer presente na minha vida em cada decisão, por me dar sabedoria e saúde para correr atrás dos meus objetivos e por me fortalecer a cada dificuldade.

Aos meus pais Francisco Alves Maia de Almeida e Marta Maria Bandeira Alves, os melhores pais do mundo, exemplos de honestidade e amor e que nunca abriram mão da minha educação e dos meus sonhos.

A minha família, exemplo de união e amor, aos meus tios, tias, primos, irmão e avó, que tanto participaram na construção do meu caráter.

Ao meu Orientador e amigo, Manoel Quirino da Silva Júnior, pela paciência, esforço e dedicação para a realização deste trabalho.

A Juliane Maria Marques Gurgel, pela paciência de me aturar nos bons e maus momentos, pelo seu carinho e amor nas horas difíceis e por sempre me incentivar.

A Equipe CACTUS BAJA por todos os momentos bons e ruins pelo qual passei ao longo de dois anos, por me ensinar o que é compromisso, honestidade e responsabilidade, a todas as pessoas que conheci dentro do projeto e tive oportunidade de dividir o dia a dia, pois foi com vocês que aprendi que família não está só no sangue. #GoCactus

RESUMO

O seguinte trabalho diz respeito a construção de um protótipo de máquina Jominy, para a realização de ensaios de temperabilidade em aços. O objetivo do trabalho é de construir um protótipo que seja confiável e que os resultados obtidos nos ensaios, permitam visualizar as transformações microestruturais que ocorrem nos aços, quando submetidos a algum ciclo térmico. O protótipo foi modelado em um software CAD, o *Solid Works® 2016*. Através da modelagem preliminar foi identificado os tipos e quantidades de materiais necessários. A construção ocorreu no laboratório de engenharia mecânica da UFERSA e foi baseada na norma do ensaio, *ASTM A255-10 Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel*. Após a construção a máquina, a mesma foi testada através de ensaios em 4 aços encontrados mais facilmente no comércio local, são eles: SAE 1020, SAE 1045, SAE 4340 e SAE 8620. As amostras utilizadas nos ensaios foram confeccionadas na universidade seguindo dimensões padronizadas pela norma. Em seguida foi realizada medições de dureza ao longo do comprimento longitudinal das amostras. Através das curvas de temperabilidade obtidas nas medições de dureza, verificou-se que as mesmas assemelham-se a literatura e que a temperabilidade dos aços é influenciada pela quantidade de carbono, elementos de liga presentes na composição química e a temperatura de austenização das amostras. Os resultados mostraram-se satisfatórios e dentro do esperado, qualificando o protótipo para a realização do ensaio Jominy

Palavras-Chave: Ensaio Jominy, Temperabilidade, Têmpera

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 OBJETIVOS DO TRABALHO	8
2.1 Objetivo geral	8
2.2 Objetivos específicos.....	8
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
3.1 Temperabilidade.....	9
3.2 Ensaio Jominy	23
4 MATERIAIS E METODOS	20
4.1 Materiais necessários para o ensaio Jominy.....	20
4.2 Materiais utilizados na fabricação do protótipo	20
4.3 Confecção e preparação dos corpos de prova Jominy	21
4.4 Ensaio Jominy	21
4.5 Limpeza e preparação das amostras.....	23
4.6 Medição de dureza	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26
5.1 Desenho do protótipo	26
5.1.1 Componentes	27
5.1.2 Montagem final do desenho	30
5.2 Construção do protótipo	31
5.3 Ensaio de Validação.....	33
5.3.1 Ensaio Jominy	33
5.3.2 Ensaio de dureza e curvas de temperabilidade obtidas nos ensaios	34
5.4 Análise de resultados para Aços carbono x Aços baixa liga	36
5.4.1 Aços Carbono SAE 1020 e SAE 1045.....	36
5.4.2 Aços Liga SAE 4340 e SAE 8620	37
6. CONCLUSÕES.....	38
REFERÊNCIAS.....	40

1. INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação convencionais utilizados atualmente na indústria nem sempre fornecem os materiais nas condições adequadas, devido a deformações e tensões residuais que se acumulam ao longo dos processos de fabricação, as propriedades mecânicas dos materiais acabam sendo afetadas negativamente. Os tratamentos térmicos são frequentemente utilizados para a recuperação das propriedades dos materiais, através de aquecimento e resfriamento subsequente, levando em conta a temperatura, tempo de tratamento, meio de resfriamento e velocidade do resfriamento. (SHACKELFORD, 2008)

A temperabilidade de um material é uma propriedade que descreve o comportamento do mesmo em relação ao tratamento térmico de têmpera. O ensaio Jominy é utilizado na avaliação de temperabilidade de aços e o mesmo segue um padrão normatizado pela norma ASTM A255. Nesse ensaio, uma amostra é aquecida até a temperatura de austenização e em seguida é resfriado por um fluxo contínuo de água dentro de um aparato chamado de máquina Jominy. A água resfria apenas uma das extremidades do corpo de prova, formando-se assim diversas microestruturas na peça ensaiada devido a diferentes taxas de resfriamento. Após o resfriamento é medida a dureza ao longo do eixo axial do corpo de prova, os valores de dureza obtidos permitem a criação de uma curva de temperabilidade. (ASTM, 2014)

A proposta desse trabalho é a construção de um protótipo Jominy, utilizando como base a norma ASTM A255. Será abordado ainda a descrição do ensaio, método de execução, desenho CAD na plataforma *Solid Works @ 2016*, adição de uma bomba para o reaproveitamento da água na execução do ensaio, imagens do processo de fabricação e montagem, além de testes de validação realizados em 4 aços de composições diferentes, SAE 1020, SAE 1045, SAE 8620 e SAE 4340.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1 Objetivo Geral

- Construção de um protótipo de máquina para análise de temperabilidade por ensaio Jominy

2.2 Objetivos Específicos

- Descrever as especificações, materiais utilizados e os passos na construção da máquina de ensaio Jominy através da norma ASTM A255;
- Fazer o desenho do protótipo utilizando o software *Solid Works @ 2016*.
- Construir o protótipo utilizando os recursos no laboratório de mecânica da Universidade Federal Rural do Semi – Árido (UFERSA).
- Realizar testes no protótipo com aços SAE 1020, SAE 1045, SAE 4340 e SAE 8620 comparando com a literatura.
- Traçar as curvas de temperabilidade para os aços SAE 1020, SAE 1045, SAE 4340 e SAE 8620.

3. Referencial teórico

3.1 Temperabilidade

No meio industrial, aços são utilizados em tratamentos térmicos para formar microestruturas de dureza elevada, afim de diminuir o desgaste em componentes mecânicos, um dos fatores mais importantes no processo de seleção de aços temperáveis é a temperabilidade. A influência da composição da liga sobre a capacidade de um aço transformar-se em martensita para um tratamento por têmpera específico, está relacionada a um parâmetro chamado temperabilidade. Temperabilidade é um termo empregado para descrever a habilidade de uma liga em ser endurecida pela formação de martensita como resultado de um dado tratamento térmico. Temperabilidade não é o mesmo que “dureza”, que é a resistência a indentação; em vez disso, temperabilidade é a medida qualitativa da taxa na qual a dureza cai em função da distância para o interior de uma amostra, como resultado de menor teor de martensita. (CALLISTER, 2012)

A têmpera tem como objetivo o resfriamento brusco do aço, impedindo que o carbono tenha tempo para difundir e formar microestruturas de menores durezas. Um aço de temperabilidade elevada é aquele que endurece ou que forma martensita, não apenas na superfície, mas em elevado grau ao longo de todo o seu interior. A martensita é a microestrutura mais dura e resistente que pode ser produzida nos aços, além disso, é a mais frágil com ductilidade quase desprezível. A dureza da martensita se deve aos átomos intersticiais de carbono que impedem o movimento das discordâncias e ao pequeno número de planos de escorregamento que estão presentes na estrutura TCC. A martensita é resultante de uma transformação no estado sólido na ausência da difusão, isto é, a reação depende somente da temperatura. Como consequência do resfriamento rápido, o retículo cristalino da austenita sofre um corte chamado de cisalhamento típico nas transformações martensíticas (ASKELAND, 2008). Pode ser visualizado na Figura 1 a microestrutura martensítica típica obtida nos tratamentos de têmpera. A região escura em formato de agulha representa a fase martensítica, a região branca é a austenita que não se transformou durante o rápido resfriamento.

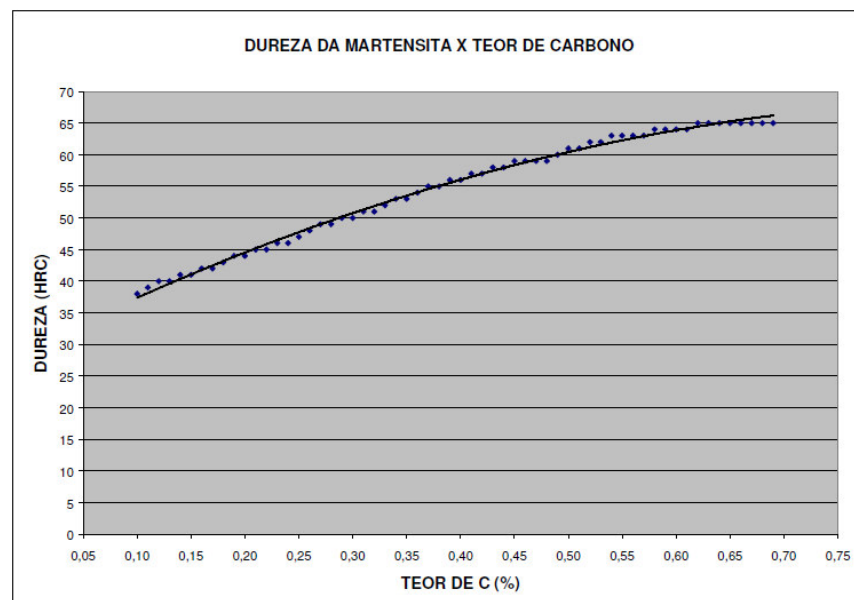
Figura 1 - Fotomicrografia da estrutura martensítica.



Fonte: CALLISTER, 2012

É apresentado na Figura 2 a dureza da martensita x teor de carbono. A penetração do endurecimento produzido pela formação de martensita de um aço temperado depende de 3 fatores, são eles: temperabilidade, severidade da têmpera e tamanho da peça. (GROSSMANN, 1972)

Figura 2 - Dureza da martensita x teor de carbono



Fonte: (CRUZ,2005).

A severidade da tempera é definida como a capacidade do meio em extrair calor da superfície do aço. A água a 18°C é usada como referência, cuja a severidade é

definida como $H = 1$. A severidade da tempera também é influenciada pela agitação do meio refrigerante, que pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1 - Severidade dos meios de tempera sob condições diferentes de agitação

Agitação	Severidade de tempera H			
	Ar	Óleo	Água	Salmoura
nenhuma	0,02	0,25–0,30	0,9–1,0	2,0
fraca	—	0,30–0,35	1,0–1,1	2,0–2,2
moderada	—	0,35–0,40	1,2–1,3	—
boa	—	0,40–0,50	1,4–1,5	—
forte	—	0,50–0,80	1,6–2,0	—
violenta	0,08	0,80–1,10	4,0	5,0

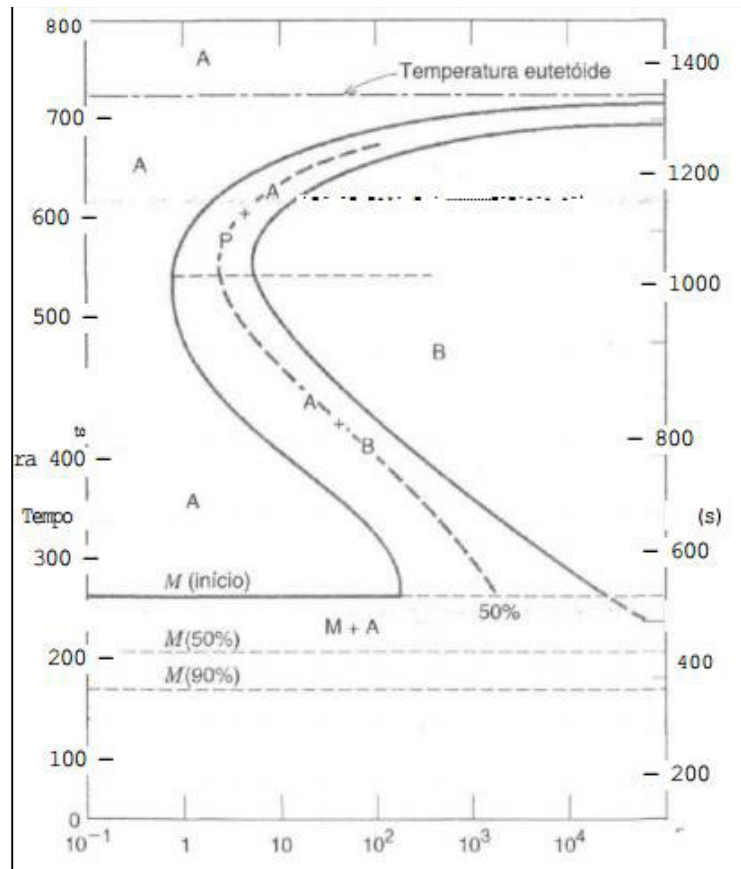
Fonte: MELLODY, 1977b

Para peças que deverão ser empregadas em aplicações envolvendo tensões relativamente elevadas, um mínimo de 80% de martensita deve ser produzido em todo o interior do material em consequência do procedimento de têmpera. Um mínimo de apenas 50% é necessário para as peças submetidas a tensões moderadas. (CALLISTER, 2012; ASKELAND, 2008).

No caso dos aços inoxidáveis, os únicos que podem ser produzidos por tempera são os aços inoxidáveis martensíticos, visto que a têmpera é um processo necessário tanto para manter suas propriedades de dureza e resistência a corrosão. (CARBÓ, 2008). Outro fator que contribui para a formação de martensita no aço é a presença de elementos de liga, os elementos de liga mais utilizados são o cromo, manganês, níquel, molibdênio, silício e tungstênio. (CALLISTER, 2012.)

O diagrama de transformação por resfriamento contínuo em resumo, é um diagrama de fases onde é introduzido o parâmetro de tempo. Esses diagramas permitem visualizar a microestrutura formada em tratamentos térmicos a temperatura constante e por resfriamento contínuo. Na figura 3 visualiza-se um diagrama de transformação isotérmica para um aço SAE 1020. (CALLISTER, 2012.)

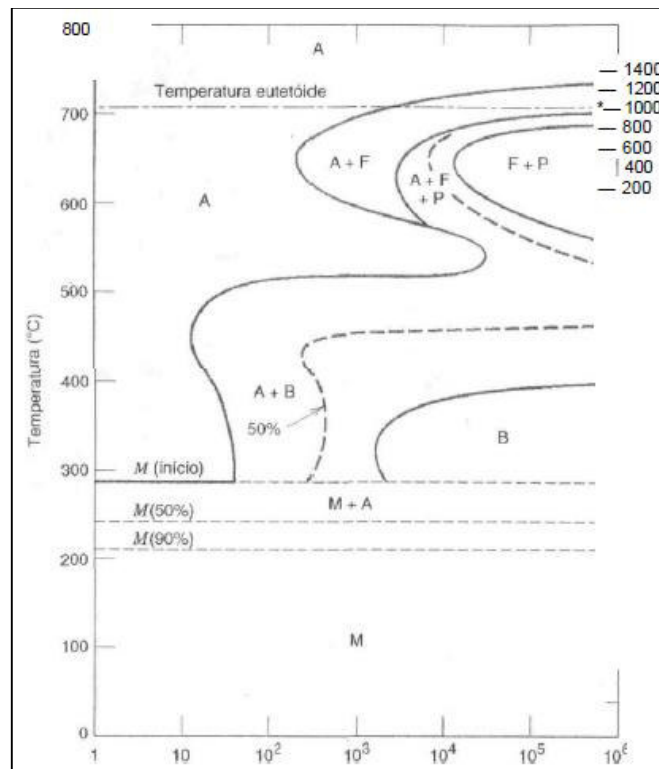
Figura 3 - Diagrama de transformação isotérmica para um aço carbono SAE 1020.



Fonte: CALLISTER, 2012

É representado na Figura 4 o diagrama de transformação do aço SAE 4340, devido à presença de elementos de liga ocorreu um deslocamento no joelho de transformação de austenita em perlita para tempos mais longos e a formação de um joelho separado para a bainita. (CALLISTER, 2012.)

Figura 4 - Diagrama de transformação isotérmica para um aço liga SAE 4340.



Fonte: CALLISTER, 2012

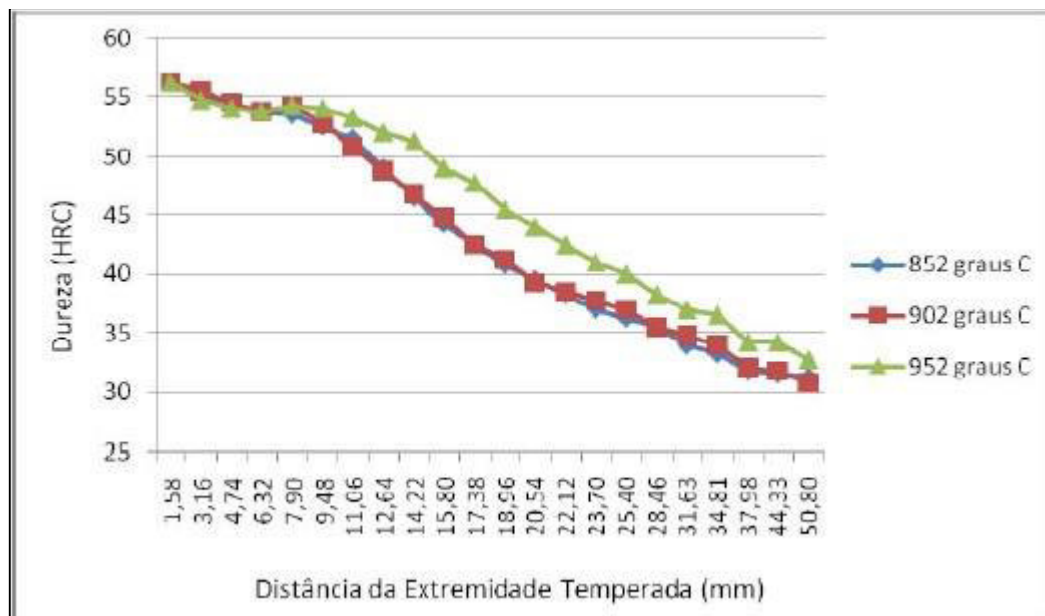
O tamanho de grão austenítico é um dos fatores que aumenta a temperabilidade de um aço. A transformação de austenita em ferrita + cementita é uma reação que ocorre por nucleação e crescimento nos sítios de nucleação heterogêneos tais como nos contornos de grão. Então, a velocidade de nucleação será tanto maior quanto mais fino for o grão austenítico, pois haverá maior superfície para a nucleação da ferrita (CRUZ, 2005). Devido a isso, pode ser mais prático utilizar aços de grão grosso do que aços ligados para obter maior temperabilidade, mas tal método não é muito utilizado pois reduz a tenacidade e ductilidade do aço.

Uma alta temperatura de austenização faz com que a austenita fique mais homogênea, reduzindo assim os sítios de nucleação para a transformação de austenita em ferrita + cementita, aumentando assim a temperabilidade. O aumento na temperatura também aumenta o tamanho dos grãos, como os constituintes nucleiam-se no contorno de grão, haverá um aumento na temperabilidade a custo de redução de tenacidade após a tempera (LARSSON, 1990; MELLO, 1977b).

Outro fator é que quanto mais alta a temperatura de austenização, maior a quantidade de calor a ser extraído na têmpera, assim haverá redução na temperabilidade do material (SIEBERT, 1977).

O efeito positivo da homogeneidade e do aumento do tamanho de grão é maior que o efeito negativo da diminuição da taxa de resfriamento (LARSSON, 1990). Na Figura 5 visualiza-se os resultados do ensaio Jominy para 3 temperaturas diferentes de um mesmo aço.

Figura 5 - Perfil de dureza Jominy para aço SAE 4140 para 3 temperaturas de austenização.



Fonte: REBECHI, 2011

3.2 Ensaio Jominy

Através do ensaio Jominy é possível traçar curvas de temperabilidade para os aços, essas curvas de temperabilidade podem ser usadas para garantir a adequação de um aço específico para um dado meio de têmpera. Ou de maneira inversa, pode ser determinada a adequação de um procedimento de têmpera para uma dada liga. (CALLISTER, 2012)

O ensaio Jominy é atualmente um dos testes mais utilizados para medir a temperabilidade de aços. Segundo a Norma *ASTM A255-10 Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel*, o corpo deve ter dimensões padronizadas, A

peça deve ser aquecida até a temperatura de austenização em um forno, em seguida deve ser colocada no aparato Jominy e resfriado rapidamente por um jato de água. A temperatura de austenização é selecionada de acordo com a composição química do aço a ser ensaiado, na Tabela 2 visualiza-se as temperaturas de austenização de acordo com a classificação do aço.

Tabela 2– Temperatura de austenização para têmpera de aços

Série "H"	Carbono - C (%)	Temperatura de austenização para a Normalização (A)	Temperatura de austenização para a Têmpera (A)
10xx - 13xx - 15xx	$C \leq 0,25$	925	925
32xx - 41xx - 43xx	$0,25 < C < 0,36$	900	870
51xx - 61xx (B)	$C \geq 0,36$	870	845
86xx - 87xx			
48xx (C)	$C \leq 0,25$	925	845
	$0,25 < C \leq 0,36$	900	815
	$0,36 < C < 0,50$	870	800
92xx	$C > 0,50$	900	870

Fonte: ASTM, 2012

Com o resfriar do corpo-de-prova a partir da extremidade, tem-se diferentes taxas de resfriamento ao longo do corpo ensaiado. O próximo estágio do ensaio trata da medição de dureza ao longo do corpo de prova, assim, o conceito básico é que se a dureza for homogênea ao longo de todo o comprimento, a temperabilidade do material é elevada. Mas, se a dureza na extremidade oposta ao resfriamento diminuir muito, a temperabilidade do material é baixa. (SOUZA, 2008)

A extremidade resfriada mais rapidamente no ensaio exibe maior dureza, para a maioria dos aços o produto nessa posição é de 100 % de martensita. Com a diminuição da taxa de resfriamento ao longo da amostra, ocorre a formação de outras microestruturas, pois, mais tempo é disponível para a difusão de carbono e a formação de maior proporção de perlita, que tem menor dureza e que pode ser misturada com martensita e bainita. O teor de carbono, os elementos de liga e a granulometria da amostra são fatores que influenciam na temperabilidade do material. Quanto maior o teor de carbono e elementos de liga, maior será a temperabilidade do material, pois esses elementos além de barrar a difusão do carbono durante o processo de resfriamento, também deslocam as curvas de resfriamento do diagrama de

transformação por resfriamento, contribuindo na formação de martensita. (SOUZA, 2008)

Dessa forma, os elementos de liga elevam a temperabilidade do material, um aço liga altamente temperável reterá grandes valores de dureza ao longo de distâncias relativamente grandes. Além disso, cada aço tem sua própria curva de temperabilidade. (CALLISTER, 2012)

O diferencial desse método de ensaio, está na capacidade de se obter várias taxas de resfriamento no corpo de prova, e com isso, valores diferentes de dureza. A cada posição jominy na barra tem-se uma taxa de resfriamento conhecida que é independente do tipo de aço, na Tabela 3 visualiza-se as diferentes taxas de resfriamento para cada posição jominy. (CALLISTER, 2012)

Tabela 3 - Taxa de resfriamento no corpo de prova jominy

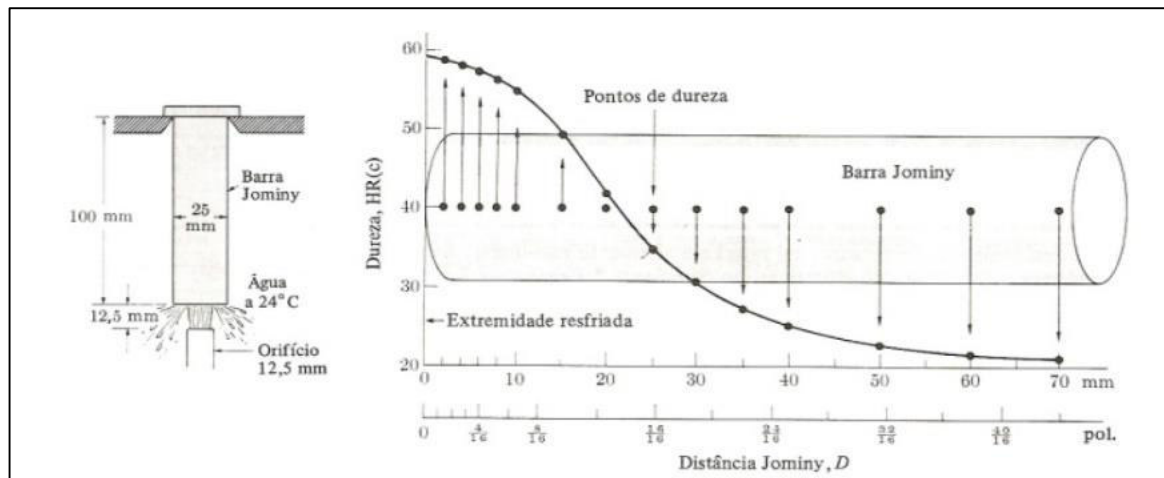
DISTÂNCIA “J” (1/16 da pol.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
°C/s	272	170	108	69	43	31	23	18	14	12
DISTÂNCIA “J” (1/16 da pol.)	11	12	13	14	15	16	20	24	28	32
°C/s	11	9	8	7	6	5,5	4	3	2	2

Fonte: MELLO, 1977a

Para se realizar o ensaio é necessário um corpo de prova cilíndrico de 25mm de diâmetro por 100mm de comprimento. Inicialmente é aquecido o corpo de prova a uma temperatura pré-definida na norma por 1 hora para cada 1” de diâmetro para a austenização completa da amostra. (SOUZA, 2008)

Em seguida o corpo de prova é fixado na máquina Jominy e é acionado a válvula que libera um jato d’água sob condições controladas de temperatura, vazão e pressão contra a extremidade inferior da amostra, resfriando o mesmo de baixo para cima, melhor visualizado na Figura 6.

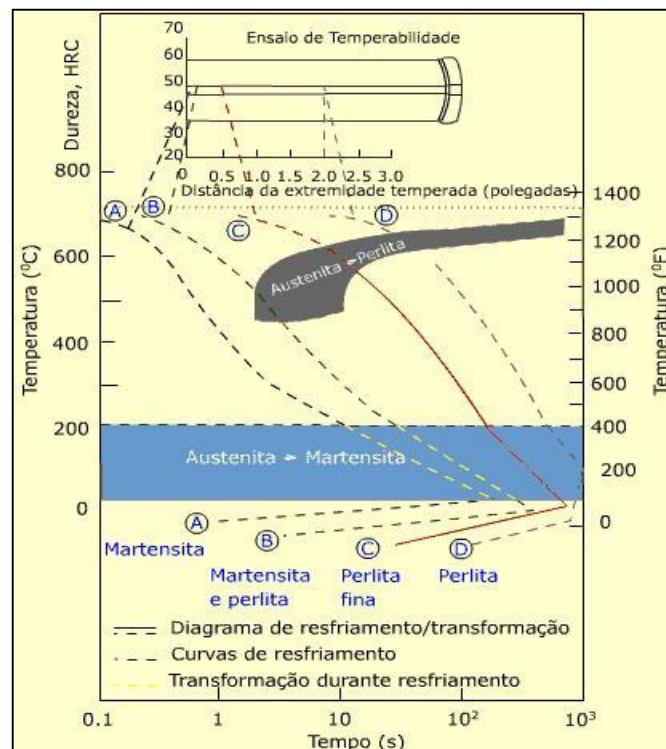
Figura 6 - Desenho esquemático da medição de dureza ao longo do corpo de prova.



Fonte: SOUZA, 2008

Feita a medição de dureza ao longo do eixo axial da amostra, percebe-se que a dureza cai de acordo com a distância. As diferentes taxas de resfriamento ao longo da amostra fizeram com que se formassem microestruturas de durezas diferentes. Na extremidade da amostra que recebeu o jato d'água a dureza obtida é bem superior se comparada com o restante da amostra, melhor visualizada na Figura 7.

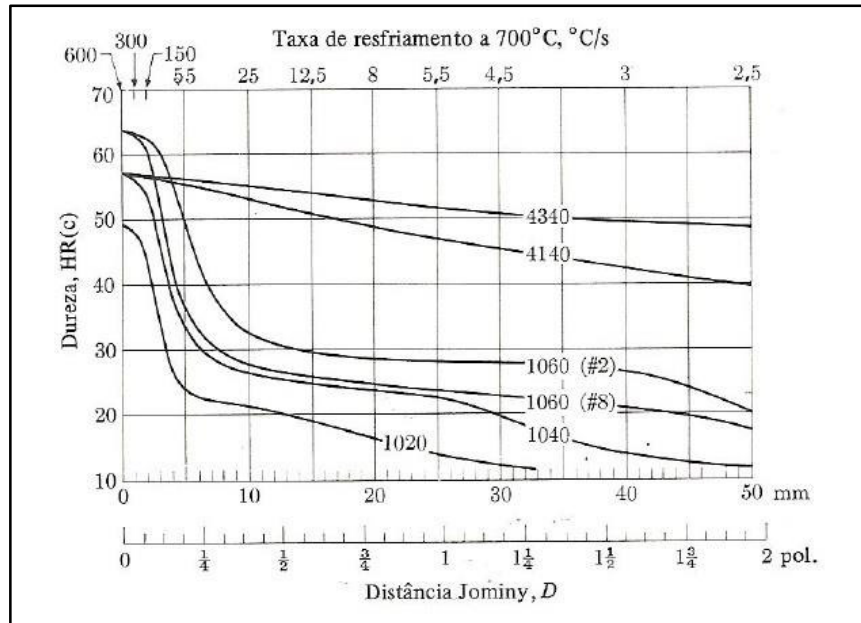
Figura 7 - Formação das microestruturas ao longo do corpo de prova jominy.



Fonte: CIMM, 2013

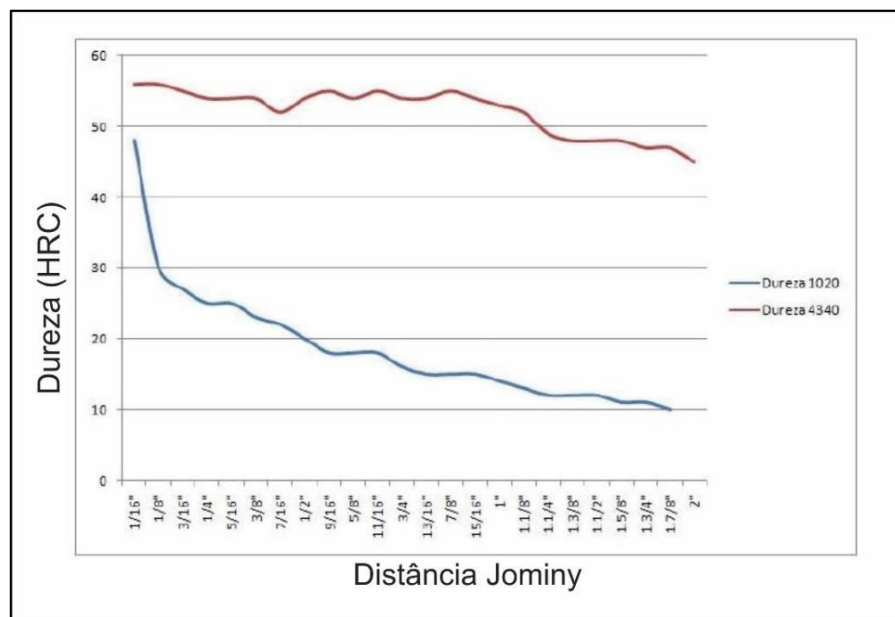
Nas Figuras 8, 9, 10 e 11 visualiza-se o modelo esquemático do tipo de gráfico obtido através do ensaio para vários tipos de aços, com valores decrescentes de dureza à medida que se afasta da extremidade do corpo ensaiado.

Figura 8 - Curva de temperabilidade jominy para vários tipos de aços.



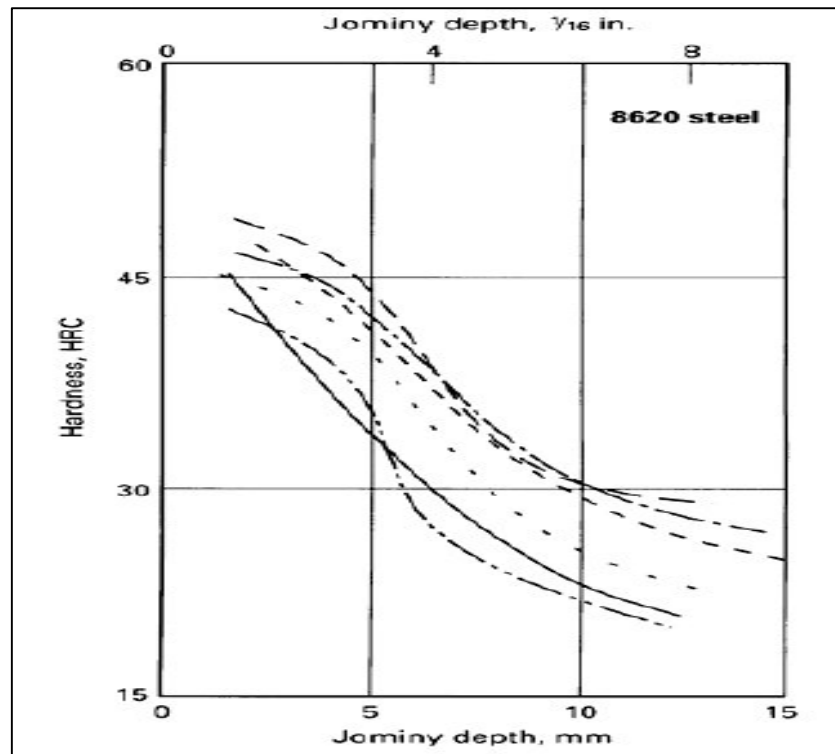
Fonte: SOUZA, 2008

Figura 9 - Curva de temperabilidade para os aços SAE 1020 e SAE 4340



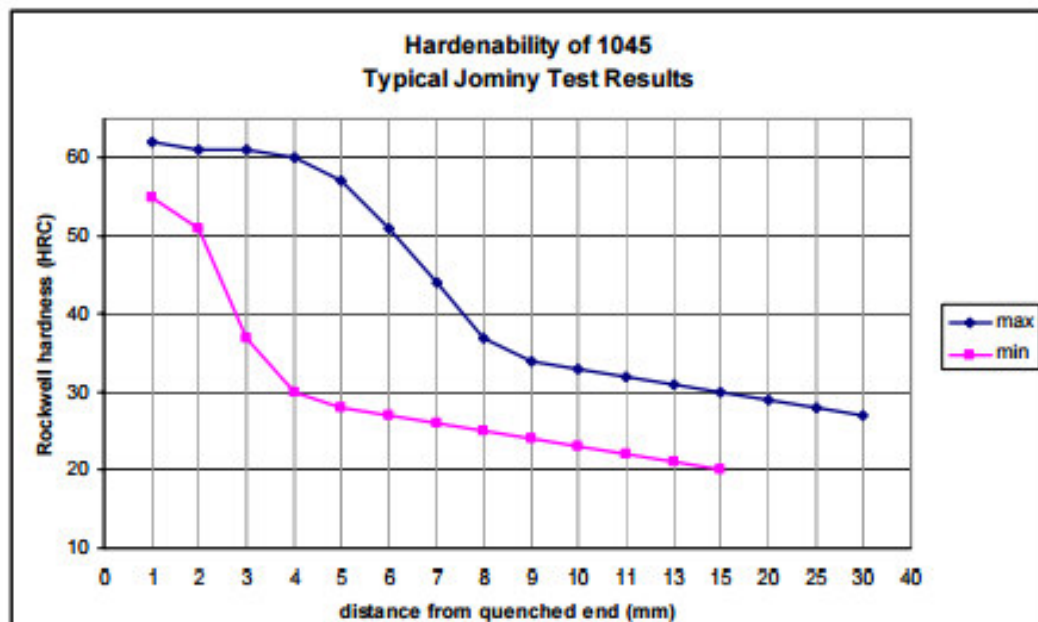
Fonte: SOUZA, 2008

Figura 10 – Curva de temperabilidade teórica para o aço SAE 8620.



Fonte: ASM INTERNATIONAL, 2002

Figura 11 – Diagrama com faixa de temperabilidade para o aço SAE 1045.



Fonte: ATLAS SPECIALITY METALS, 2006

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais necessários para o ensaio Jominy

Para a realização do ensaio foram utilizados os dispositivos do laboratório de mecânica da UFERSA, inclusive o dispositivo jominy construído neste trabalho. Os seguintes materiais são necessários para a realização do ensaio jominy:

- a) 1 forno Mufla para aquecer a amostra e capaz de trabalhar na faixa de 800° a 950° C
- b) 1 dispositivo Jominy para a têmpera, a aparelhagem deve compreender:
 - i. Tubulação para a água com orifício de diâmetro 12,7mm disposto de forma vertical no dispositivo de têmpera.
 - ii. Registro de abertura que regule o fluxo de água.
 - iii. Recipiente com dreno para recolher a água utilizada no ensaio e que sirva de base para o suporte do corpo de prova.
 - iv. Suporte de aço para o corpo de prova na têmpera, com dimensões específicas como indicados na norma ASTM A255, com o suporte acima do tubo de saída de água, de forma que o eixo do tubo coincida com o eixo do corpo de prova.
 - v. Sistema de abastecimento de água que assegure uma vazão constante durante o ensaio.
- c) Durômetro Rockwell com dispositivo de apoio para ser feita a medição de dureza nas distâncias jominy na amostra.

4.2 Materiais utilizados na fabricação do protótipo

A modelagem preliminar do protótipo foi realizada em formato CAD, no software *Solid Works* ® 2016, as peças utilizadas foram modeladas em perfis de aço disponíveis no comércio local para facilitar a fabricação e poupar custos. A modelagem foi baseada nas informações da norma **ASTM A255 – Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel**. Foi determinado que a máquina

deve servir de reservatório e que uma bomba seria instalada para promover a recirculação da água utilizada no ensaio.

A partir disso determinou-se as quantidades de material e perfis necessários para a confecção do protótipo podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4 – Materiais necessários para a confecção do protótipo

Descrição do material	Material/Referência	Quantidade
Barril de metal de 200 litros (850x570mm)	Aço carbono	1
Cantoneira 1"x1/8"	SAE 1020	3m
Barra chata 1"x1/8"	SAE 1020	4m
Perfil U 4"x1/8"	SAE 1020	1,5m
Tarugo de Aço inoxidável 2"	AISI 304	0,2m
Cano de 1"	PVC	1m
Flanges de 1"	PVC	3
T de 1"	PVC	1
Joelho de 1"	PVC	4
Mangueira de 1"	Borracha	0,5m
União de 1"	PVC	2
Válvula borboleta de 1"	PVC	2
Bomba d'água	Sigma QB - 60	1

Fonte: Autoria própria, 2017

A fabricação dos componentes individuais foi realizada no laboratório de mecânica da universidade (UFERSA), utilizando-se o maquinário disponível; Torno convencional Nardini nodus 220 GOLD, serra-fita Starret S1101, furadeira de bancada Clark FB 30, máquina de solda para eletrodo revestido ESAB Arc 426 e máquina de solda TIG ESAB LAI 407.

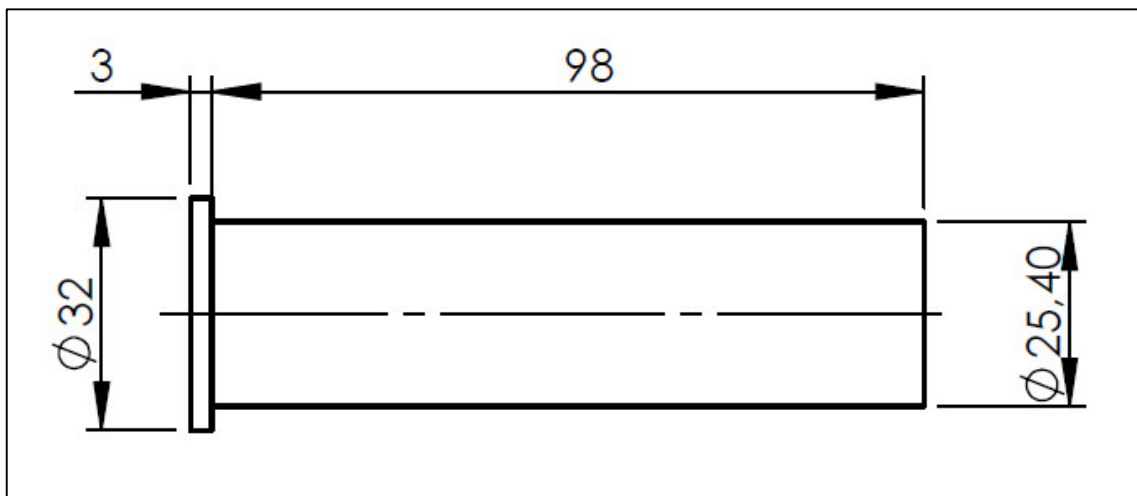
4.3 Confecção e preparação dos corpos de prova Jominy

Os aços analisados nesse trabalho foram escolhidos devido sua disponibilidade no mercado e sua larga aplicação em diversos setores na indústria, são eles: SAE 1020, SAE 1045, SAE 8620 e SAE 4340. Todos os aços foram obtidos em bitolas entre 1.1/4" e 1.1/2" e com 115mm de comprimento.

O corpo de prova foi usinado a partir de uma barra laminada ou forjada, com 32 mm de diâmetro, de forma cilíndrica e com as seguintes medidas, especificados visualmente na Figura 12

- Diâmetro de 25,5 mm
- Comprimento útil de 98mm
- Diâmetro do flange de 32mm
- Espessura do flange de 2,5mm a 3mm
- E comprimento total de 101 mm

Figura 12 – Dimensão do corpo de prova Jominy. Elaborado pelo software Solid Works
© 2016



Fonte: Autoria própria, 2017

As usinagens foram realizadas através de um torno convencional modelo Nardini Nodus 220 Gold. Para evitar erros de diâmetro no sentido longitudinal foi usinado um furo de centro para apoiar o tarugo durante a fabricação. No final da usinagem os corpos de prova foram faceados para a remoção do furo de centro. Foram usinadas 4 amostras, após a confecção foi feita a inspeção das medidas quanto as tolerâncias e verificado o acabamento superficial das amostras, os mesmos apresentaram bom estado e estavam dentro das dimensões exigidas pela norma que podem ser visualizadas na Figura 13.

Figura 13 – Inspeção de tolerância do corpo de prova após a usinagem.



Fonte: Autoria própria, 2017

4.4 Ensaio Jominy

Foram selecionados 4 aços de acordo com a classificação SAE, são eles: SAE 1020, SAE 1045, SAE 4340 e SAE 8620. As amostras foram aquecidas em um forno tipo mufla em temperaturas diferentes de acordo com a classificação SAE. O tempo de permanência no forno estabelecido na norma é de 1 hora para cada 25,4 mm de diâmetro, as amostras foram aquecidas durante 1 hora após o forno ter atingido a temperatura de austenização. Foram utilizadas 3 temperaturas de austenização diferentes mostradas na Tabela 4 do referencial teórico. Para o aço SAE 1020 foi usada a temperatura de austenização de 925°C, 870°C para o aço SAE 8620 e 845°C para os aços SAE 1045 e SAE 4340.

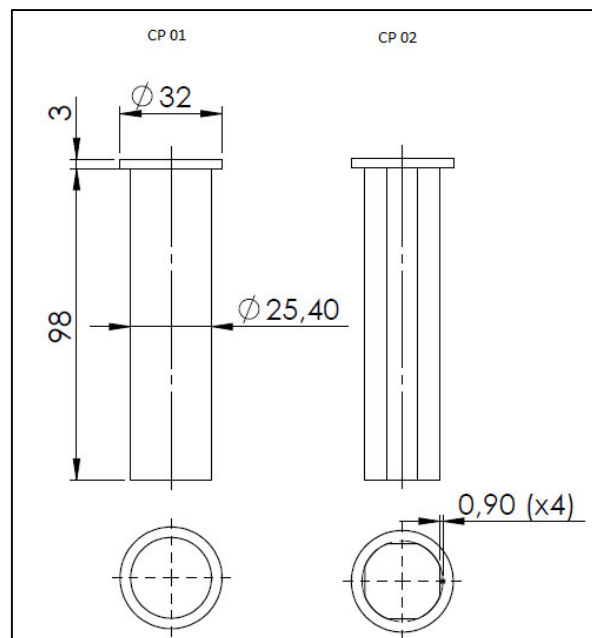
A faixa recomendada de temperatura da água pela norma é de 5°C a 30°C. O tempo de transferência do forno para o dispositivo de ensaio foi menor que 5 segundos a peça foi ensaiada por 10 minutos na temperatura ambiente de 25°C, após esse tempo a amostra foi mergulhada em água até que atingisse a temperatura ambiente.

4.5 Limpeza e preparação das amostras

Foi efetuada a limpeza das amostras por meio de lixamento a fim de eliminar a carepa de óxido que se formou após os tratamentos térmicos. Para a medição de dureza se faz necessário realizar um rebaixo na superfície temperada da amostra,

pois o durômetro necessita de uma face plana para a medição. As usinagens foram realizadas no SENAI-RN(Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) através de uma parceria entre a instituição e a universidade(UFERSA). Em cada corpo de prova foram realizados 4 rebaios por fresamento, com 90° de defasagem entre eles, a altura dos rebaios foi de 0,90mm com tolerância +0 mm e -0,05 mm. Através da Figura 14 pode-se visualizar os desenhos das amostras formato em que foram entregues (corpo 1) e como ficaram após o serviço (corpo 2) de usinagem.

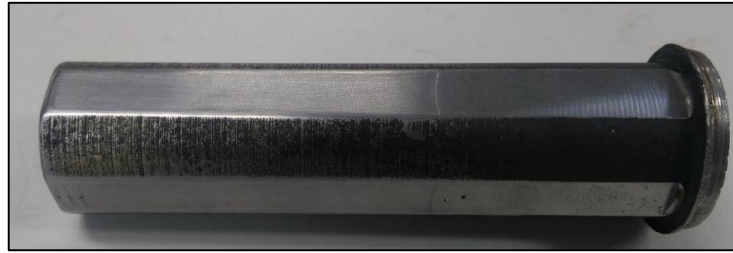
Figura 14 – Vista frontal dos corpos nas condições, temperado (CP 01) e temperado com rebaixo (CP 02).



Fonte: Autoria própria, 2017

Após a usinagem dos rebaios a superfície dos mesmos foi lixada com lixas de granulometria 220 e 400 para que a superfície tivesse condições ideais para o ensaio de dureza. Na Figura 15 é mostrado o corpo de prova após o lixamento.

Figura 15 – Corpo de prova usinado e lixado após a têmpera

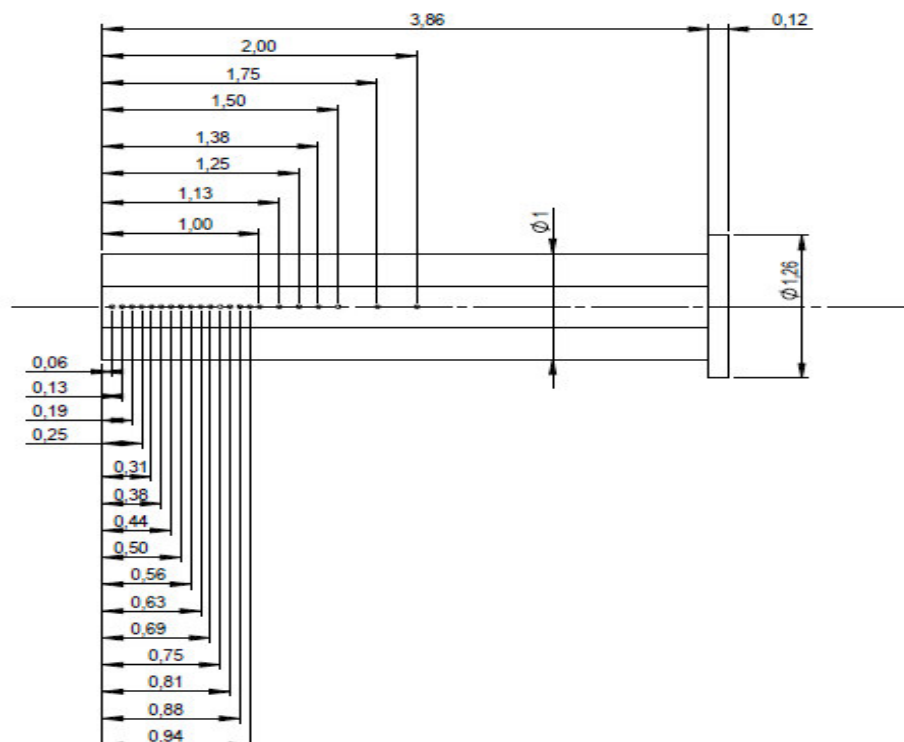


Fonte: Autoria própria, 2017

4.6 Medição de dureza

As medições de dureza foram realizadas através de um durômetro de modelo Mitutoyo HR - 300, utilizando a escala Hockwell C e identador de diamante com formato da ponta cônico. As identações foram realizadas seguindo a norma ASTM A255. A primeira medição é realizada a partir da extremidade temperada seguindo o sentido longitudinal da peça, como pode ser visualizado na Figura 16.

Figura 16 - Medições de dureza ao longo do corpo de prova, medidas em polegada.



Fonte: Autoria própria, 2017

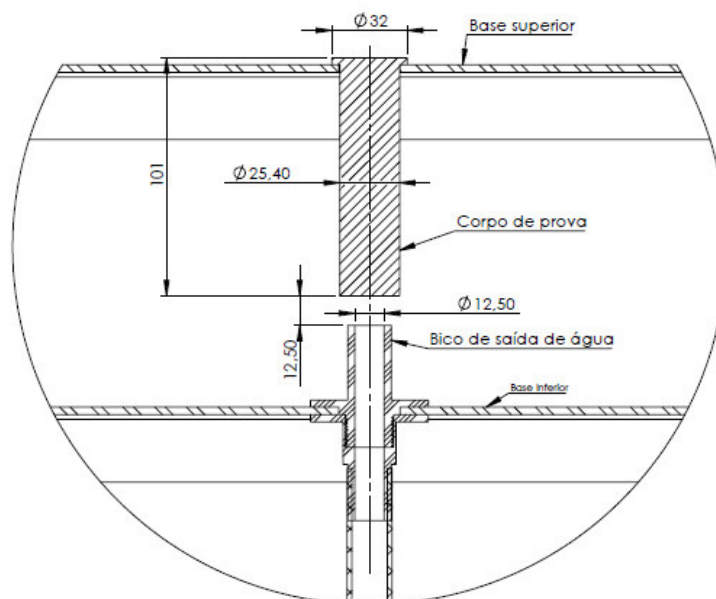
Realizou-se as medições nos 4 rebaixos de cada amostra, as marcações das distâncias foram feitas utilizando um paquímetro analógico. As medições foram realizadas a cada 1/16" de distância para as primeiras 16 medidas, totalizando 1", a partir desse ponto são feitas 4 medidas a cada 1/8" e depois 2 medidas a cada 1/4". Assim, são realizadas 22 medições no total ou até a dureza de 20 HRC ser atingida. Pois abaixo de 20 HRC o indentador não conseguiu medir a dureza da superfície devido a escala estabelecida pela norma. Foi realizada uma medição em cada um dos rebaixos das amostras, mas, devido a alterações que ocorreram em algumas curvas, foi utilizado o melhor resultado na plotagem das curvas de temperabilidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Desenho do protótipo

Na modelagem do protótipo foi plotada a vista 2D em corte do posicionamento do corpo de prova em relação aos flanges de passagem de água dentro da máquina, visualizado na Figura 17.

Figura 17 – Detalhe do corte da vista frontal da modelagem de acordo com a norma ASTM A255, realizadas no software *Solid Works*® 2016.

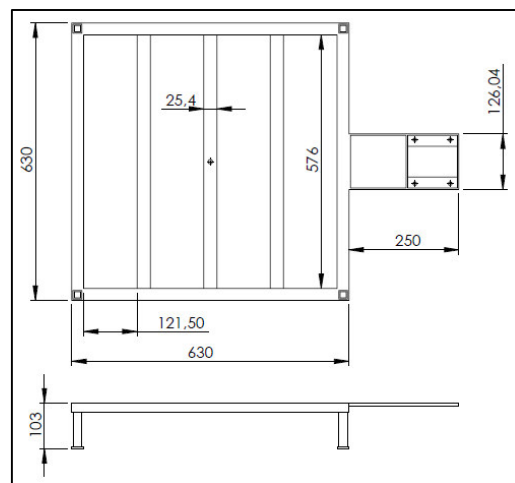


Fonte: Autoria própria, 2017

5.1.1 Componentes

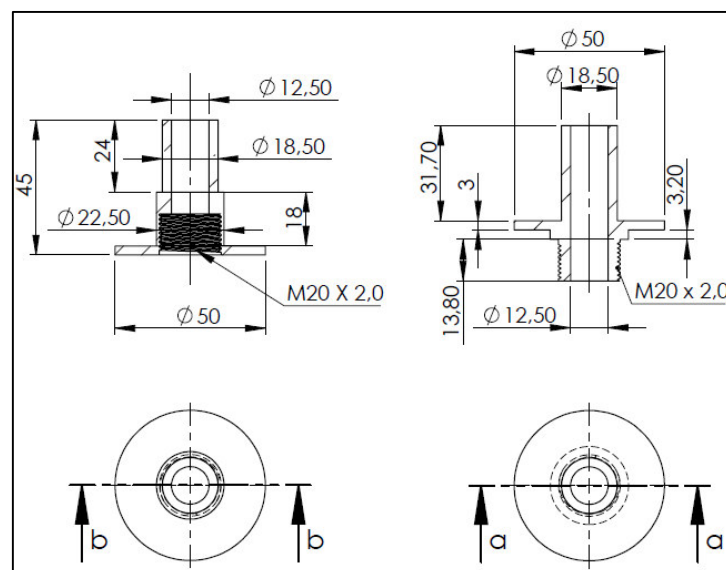
Nas Figuras 18, 19 e 20 pode-se visualizar as modelagens de cada peça do protótipo e na Figura 21 o gabarito utilizado no posicionamento das bases metálicas onde se encaixam o corpo de prova e os flanges de passagem de água, realizadas no programa CAD *Solid Works*® 2016.

Figura 18 – Vista superior e frontal da base do protótipo realizada no *Solid Works*® 2016.



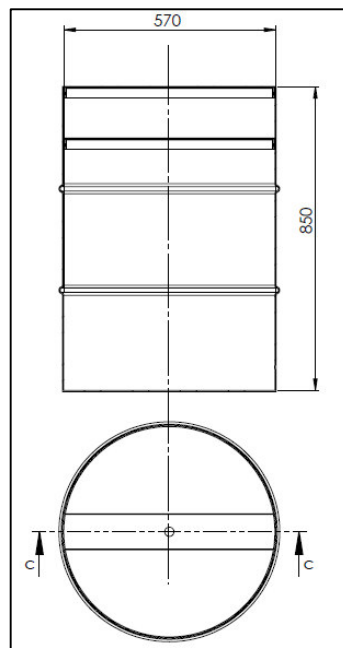
Fonte: Autoria própria, 2017

Figura 19 – Vista em corte dos flanges de passagem de água realizada no *Solid Works*® 2016.



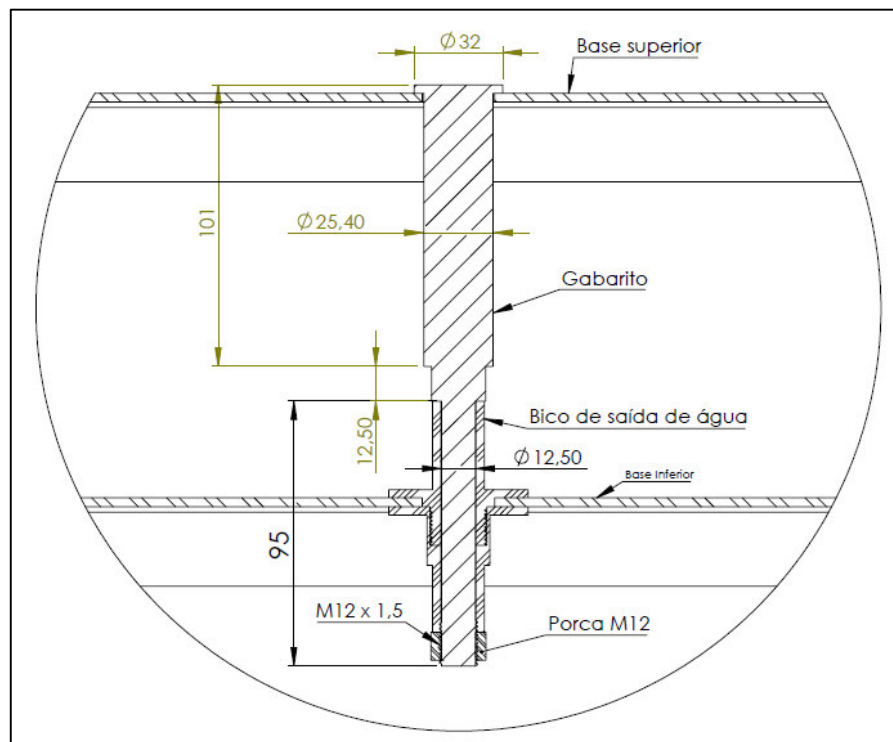
Fonte: Autoria própria, 2017

Figura 20 – Vista superior e em corte do tambor metálico com as bases soldadas realizada no *Solid Works*® 2016.



Fonte: Autoria própria, 2017

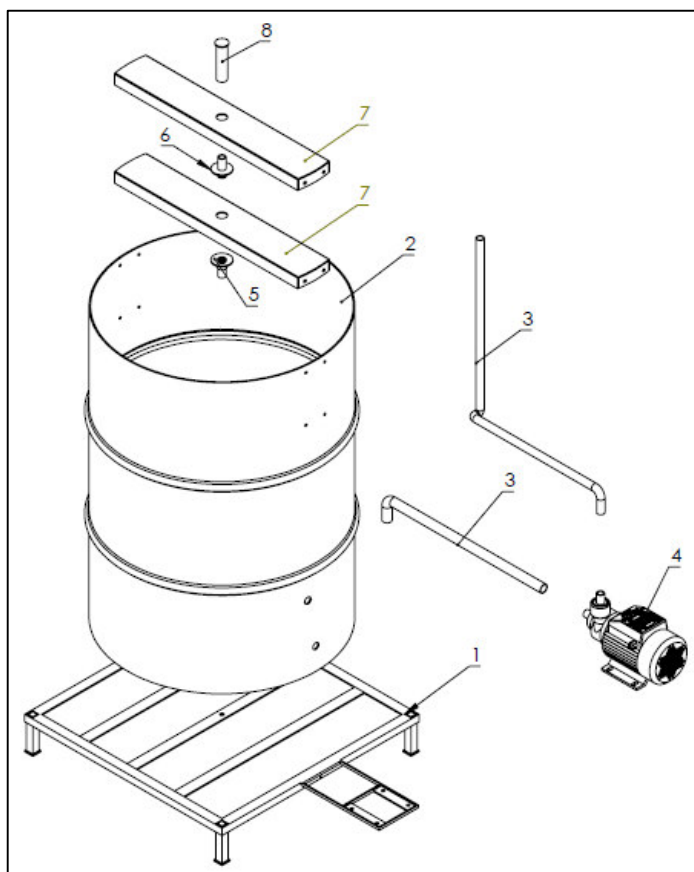
Figura 21 – Detalhe do corte da vista frontal da modelagem do posicionamento do gabarito utilizado para o posicionamento das bases metálicas realizadas no software *Solid Works*® 2016.



Fonte: Autoria própria, 2017

Na figura 22 e na Tabela 5 visualiza-se a vista explodida do protótipo e as peças confeccionadas para a máquina.

Figura 22 - Vista explodida do protótipo realizada no *Solid Works @ 2016*.



Fonte: Autoria própria, 2017

Tabela 5 – Listagem de peças do protótipo

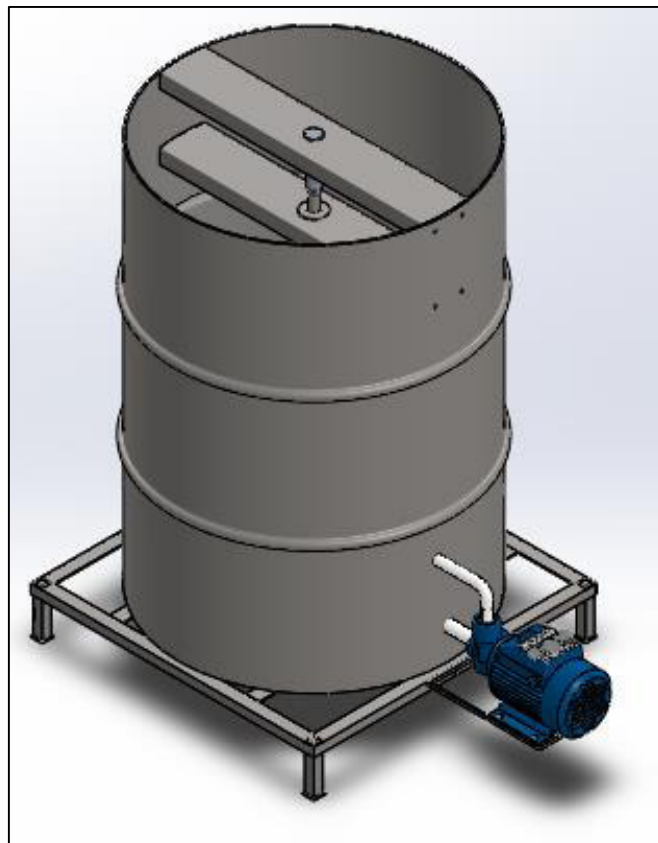
N	Descrição	Material / Referência	Qtd	Dimensões máximas
1	Base metálica do corpo de prova	Aço SAE 1020	2	570x100mm
2	Tambor de metal	Aço	1	850x570mm
3	Tubulação 1"	Borracha/ PVC	2	1,5m
4	Bomba	Sigma QB - 60	1	-
5	Flange de saída de água	Aço inoxidável AISI 304	1	45x50mm
6	Encaixe inferior do flange	Aço inoxidável AISI 304	1	51,7x50mm
7	Base de metal para a máquina	Aço SAE 1020	2	630mmx630mm
8	Corpo de prova	Aço	1	101x32mm

Fonte: Autoria própria, 2017

5.1.2 Montagem final do desenho

A norma especifica o posicionamento do corpo de prova no dispositivo afim de receber o jato d'água que irá temperar a amostra em uma das extremidades. O posicionamento das bases metálicas do dispositivo jominy foi feito através de um gabarito de aço que garantiu o afastamento necessário e a concentricidade da amostra e do tubo de saída de água, visíveis na Figura 21. A vazão exigida pelo ensaio é controlada através da altura de jato livre de 65mm que foi regulada também com a ajuda de uma régua graduada. Após o ajuste da altura foi medida a vazão através de um recipiente de volume de 5L e a contagem do tempo necessária para encher o recipiente (18s), a vazão obtida foi de 0,278 L/s. A montagem final pode ser visualizada na Figura 23.

Figura 23 - Montagem final do protótipo no software *Solid Works*® 2016.



Fonte: Autoria própria, 2017

5.2 Construção do Protótipo

A construção do protótipo foi realizada de acordo com a modelagem preliminar no software *Solid Works @ 2016*, seguindo todas as restrições presentes na norma ASTM A255. Nas Figuras 24, 25, 26 e 27 visualiza-se as etapas de construção do dispositivo e sua montagem final

Figura 24 – Base metálica de apoio do protótipo



Fonte: Autoria própria, 2017

Figura 25 – Tambor metálico com base superior soldada



Fonte: Autoria própria, 2017

Figura 26 – Flanges em Aço inoxidável AISI 304 confeccionados nos SENAI-RN



Fonte: Autoria própria, 2017

Figura 27 – Montagem final do protótipo pronto para testes.



Fonte: Autoria própria, 2017

5.3 Ensaio de Validação

Afim de validar o protótipo construído, foi realizado o ensaio Jominy no mesmo, onde toda a metodologia, procedimentos e condições de ensaio são estabelecidas pela norma **ASTM A255 – Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel**; nela há condições específicas pelas quais o corpo de prova deve ser submetido, desde as condições de usinagem, aquecimento e resfriamento, o método da têmpera e a aferição dos resultados para o controle de qualidade.

5.3.1 Ensaio Jominy

Depois do aquecimento dentro do forno, as amostras foram submetidas ao resfriamento rápido através de um jato d'água dentro do dispositivo Jominy. A metodologia do ensaio foi descrita anteriormente, na Figura 28 é visível o protótipo em funcionamento

Figura 28 – Protótipo Jominy em funcionamento.



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.3.2 Ensaio de dureza e curvas de temperabilidade obtidas nos ensaios

As curvas de temperabilidade foram obtidas como resultados dos ensaios realizados conforme a metodologia. Na Tabela 6 pode-se visualizar os valores de dureza obtidos em cada corpo de prova para cada distância jominy.

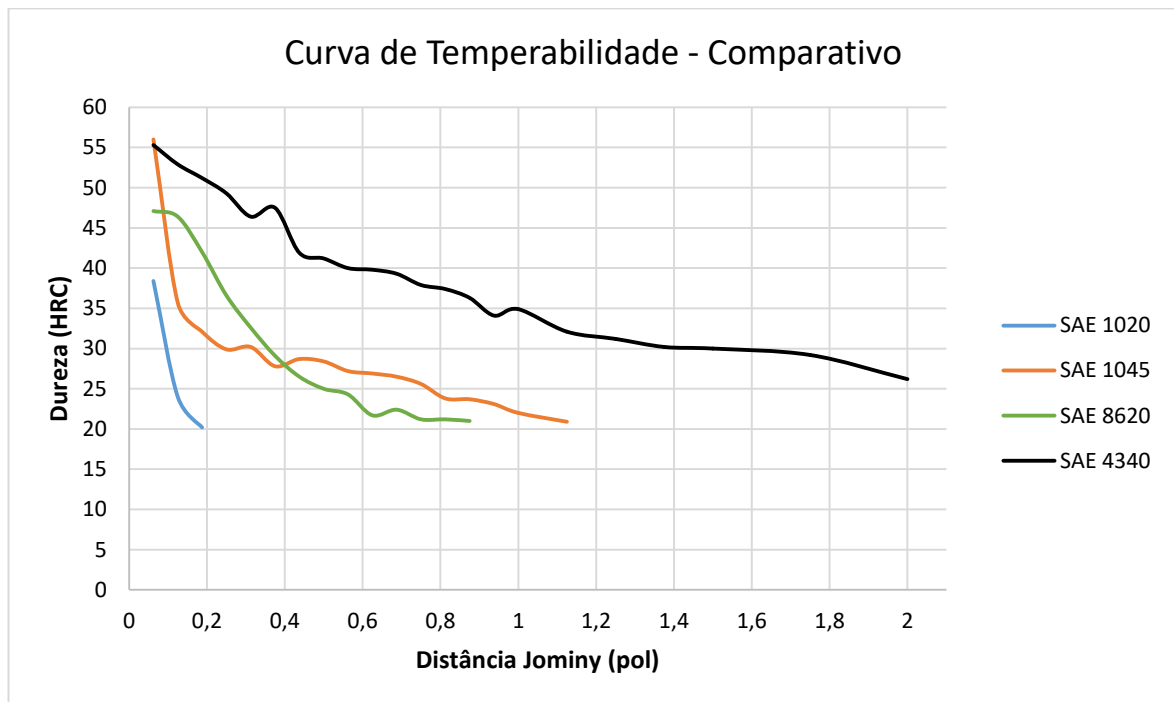
Tabela 6 – Distância Jominy x Dureza HRC.

Aço SAE		1020	1045	8620	4340
Medida Jominy (pol)		Dureza (HRC)			
1	0,0625	38,4	56	47,1	55,3
2	0,125	35	35,7	46,4	52,9
3	0,1875	20,2	32,1	42	51,2
4	0,25		29,9	36,6	49,3
5	0,3125		30,2	32,6	46,4
6	0,375		27,8	29,1	47,5
7	0,4375		28,7	26,5	41,9
8	0,5		28,4	25	41,2
9	0,5625		27,2	24,3	40
10	0,625		26,9	21,7	39,8
11	0,6875		26,5	22,4	39,3
12	0,75		25,6	21,2	37,9
13	0,8125		23,8	21,2	37,4
14	0,875		23,7	21	36,3
15	0,9375		23,1		34,1
16	1		22		34,9
17	1,125		20,9		32,1
18	1,25				31,2
19	1,375				30,2
20	1,5				30
21	1,75				29,2
22	2				26,2

Fonte: Elaborado pelo Autor

A partir dos valores de dureza obtidos, foi plotada uma curva de temperabilidade em cada aço, apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Curvas de temperabilidade obtidas pelo ensaio de dureza após o ensaio Jominy



Fonte: Elaborado pelo Autor

Comparando as curvas obtidas, nota-se visivelmente que o melhor resultado obtido foi para o aço SAE 4340 e o do pior resultado é o do Aço SAE 1020. A partir do resultado obtido, visualiza-se também que o teor de carbono é de grande influência na dureza do aço após a têmpera, visto que comparando os valores de dureza máximos para os aços SAE 4340 e SAE 1045, verificou-se valores semelhantes devido ao teor de carbono próximos.

Em relação aos elementos de liga verifica-se que os mesmos influenciam aumentando a temperabilidade nos aços SAE 4340 e SAE 8620, quando comparado aos aços SAE 1020 e SAE 1045 que possuem quedas mais bruscas ao longo do comprimento longitudinal do corpo de prova.

Nas medições de dureza no aço SAE 4340, SAE 8620 e SAE 1045 ocorreu algumas variações nos valores de dureza, em certos pontos a dureza cresceu ao invés de decrescer, devido a quantidade considerável de elementos de liga e de diferentes taxas de resfriamento ao longo do corpo de prova, sugere-se que pode ter ocorrido a formação de uma fase com dureza mais elevada, causando assim um resultado diferente dos obtidos geralmente.

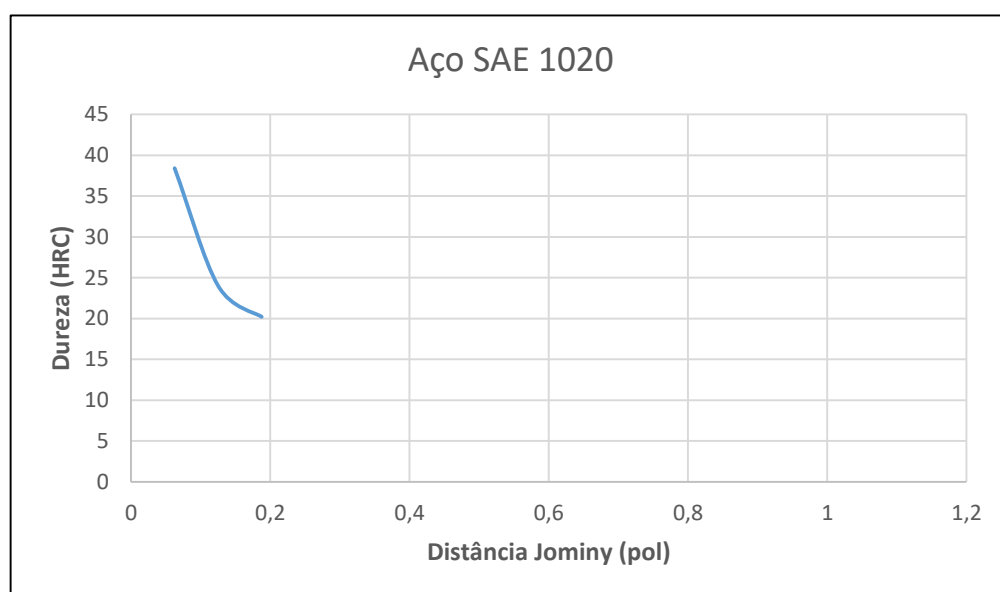
5.4 Análise de resultados para Aços carbono x Aços baixa liga.

Comparando as curvas individuais de cada aço obtido com os presentes na literatura (Figuras 8,9,10 e 11) verifica-se que as mesmas se assemelham tanto nos valores de dureza quanto na inclinação das curvas.

5.4.1 Aços carbono SAE 1020 e SAE 1045

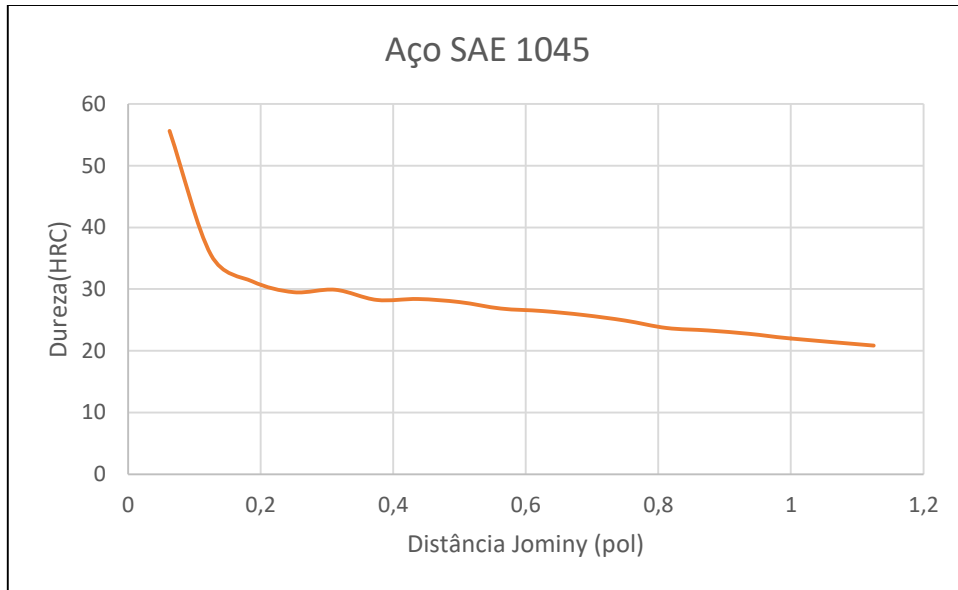
Na análise desses tipos de aço pode-se verificar que o carbono é o principal responsável pela dureza e pela temperabilidade. Comparando os aços SAE 1020 e SAE 1045, verifica-se que o aço SAE 1020 além de não apresentar dureza muito elevada, apresenta uma queda muito acentuada ao longo do corpo de prova, tanto que na 3ª medição, aproximadamente a 4,76mm da extremidade temperada, o valor de dureza foi de aproximadamente 20 HRC; já o aço SAE 1045 apresentou o maior valor de dureza entre todos os aços analisados, 56 HRC, que se deve a sua maior quantidade de carbono, o mesmo ainda apresentou uma curva não tão acentuada, permitindo dizer que o aço SAE 1045 tem temperabilidade melhor que a do aço SAE 1020. Nas figuras 30 e 31 pode-se visualizar os perfis de dureza individuais para os aços carbono.

Figura 30 - Curva de temperabilidade para o aço SAE 1020.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 31 - Curva de temperabilidade para o aço SAE 1045.



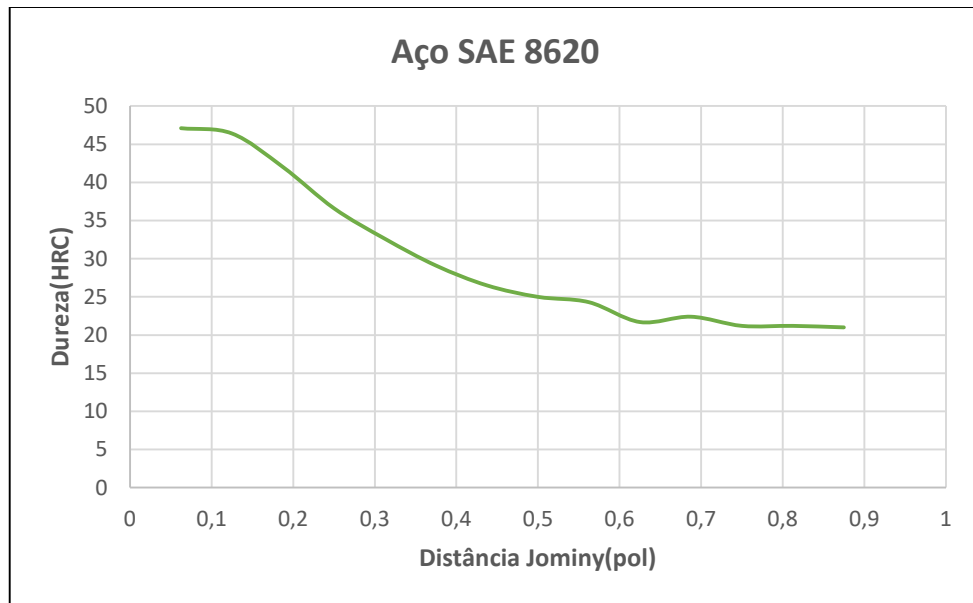
Fonte: Elaborado pelo Autor

5.4.2 Aços Liga SAE 4340 e SAE 8620

Nos aços analisados nos ensaios existe a presença de elementos químicos que agem como ligantes, os mesmos conferem propriedades diferentes ao material. Observando os aços SAE 4340 e SAE 8620, nota-se que a presença dos elementos de liga influenciou na temperabilidade dos mesmos, visto que o valor de dureza não caiu tanto quando comparado aos aços carbono. Os elementos de liga atuam como obstáculo para a difusão do carbono durante o resfriamento, devido a isso as curvas TCC desses possuem deslocamento para a direita, essa característica confere aos aços ligados mais tempo para as transformações martensíticas.

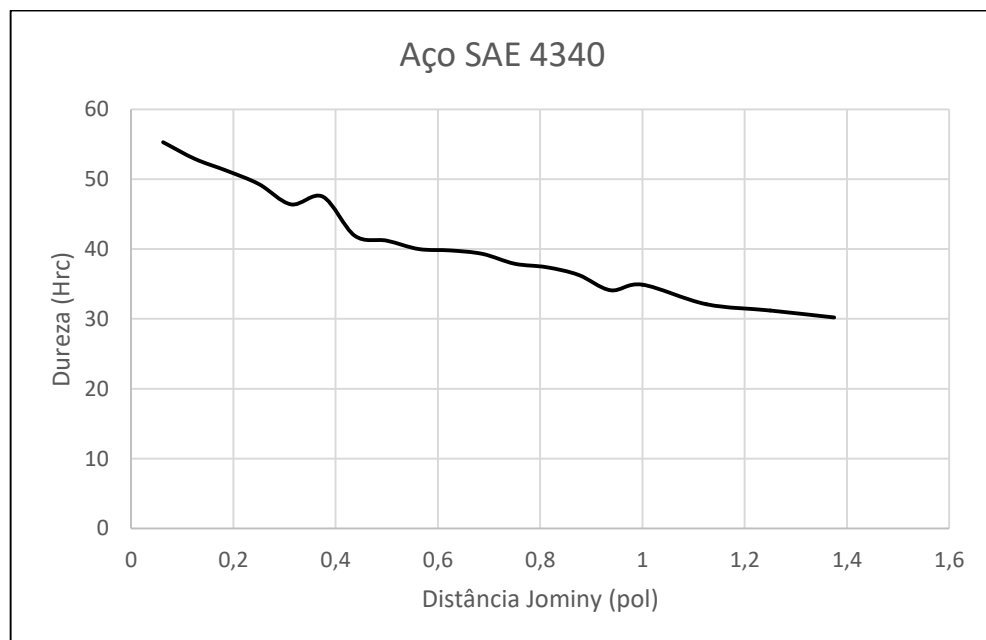
Apesar do aço SAE 4340 ter apresentado temperabilidade alta, ocorreram variações de dureza em certos pontos da curva, fugindo do modelo de curva obtido geralmente, sugere-se que essa alteração tenha sido causada por alguma fase formada durante o processo de resfriamento, devido as diversas taxas de resfriamento e elementos de liga diferentes na peça. As curvas de temperabilidade individuais dos aços SAE 8620 e SAE 4340 são apresentadas nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 - Curva de temperabilidade para o aço SAE 8620.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 33 - Curva de temperabilidade para o aço SAE 4340.



Fonte: Elaborado pelo Autor

6. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos comprovou-se que a composição química dos aços influenciou diretamente na profundidade da têmpera e na dureza, sendo os elementos de liga e o teor de carbono os principais responsáveis pelo endurecimento.

As variações de dureza em alguns pontos das curvas formaram um perfil um pouco diferente do obtido geralmente, sugere-se que essas alterações podem ter sido causadas por possíveis erros no processo de usinagem, como corte sem refrigeração durante a confecção dos rebaixos para os ensaios de dureza, durante as medições de dureza no aço SAE 1045 obteve-se duas curvas de característica inesperada, pois ao invés de apresentar o perfil decrescente nos valores de dureza, os mesmos se mantiveram constantes. Sugere-se que essa alteração foi causada pelo calor gerado durante o fresamento dos rebaixos, além disso, os aços utilizados neste trabalho foram adquiridos no comércio local e sem nenhum tipo de certificação atestando sua composição.

Sugere-se para futuros trabalhos:

- Utilização de um método de análise química para atestar a composição dos materiais utilizados, além de,
- Utilizar processos de usinagem com maior precisão dimensional, como fabricação em torno CNC.
- Realizar mais medidas de dureza afim de realizar análise de dispersão.
- Proteção da lateral do dispositivo Jominy, afim de evitar possíveis correntes de ar que venham a interferir no ensaio.

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que os objetivos do trabalho foram alcançados, qualificando assim o protótipo para a realização do ensaio jominy.

REFERÊNCIAS

Askeland, Donald R, Phulé, P.P.; **Ciência e Engenharia dos Materiais**, 1ª Edição, Ed. Cengage Learning, 2008. (ASKELAND, 2008)

ASM INTERNATIONAL, **ASM Metals HandBook: Heat Treating**, 2ª ed., v.4, USA, 2002. (ASM INTERNATIONAL, 2002)

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A255-10: Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel**.. 10 ed. West Conshohocken, 2014. (ASTM, 2014)

ATLAS SPECIALITY METALS (Usa). Medium Tensile Carbon Steel Bar 1045. 2006. Disponível em: <<http://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas1045.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2017. (ATLAS SPECIALITY METALS, 2006)

CARBÓ, Héctor Mario. **Aços Inoxidáveis: Aplicações e Especificações**.2008. Disponível em:<ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM343/artigo_acoinox_a_plicacao_especificacao.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2014. (CARBÓ, 2008)

CRUZ, Luiz Carlos da. **Avaliação da capacidade do processo de fabricação em atender especificação de temperabilidade para o aço SAE 1548M**. 2005. 93 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Ufmg, Belo Horizonte, 2005. (CRUZ, 2005)

CIMM. **O teste Jominy**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6445-o-teste-jominy#.U8301vldUs7>. Acesso em: 09 dez. 2013. (CIMM, 2013)

Callister Jr., W.D., **Ciência e Engenharia dos Materiais, uma Introdução**, 7ª Edição, Ed. Guanabara, 2012. (CALLISTER, 2012)

MELLOY, G. F. **Hardness and Hardenability**. ASM, Metals Park, Ohio, 1977a. (MELLOY, 1977a)

MELLOY, G. F. – **Factors Affecting Hardness and Hardenability**. ASM, Metals Park, Ohio, 1977b. (MELLOY, 1977b)

GROSSMANN, M. A. & BAIN, E. C. Templabilidad. In: GROSSMANN, M. A., BAIN, E. C. Principios de Tratamiento Térmico. 1st ed. Madrid: Editorial Blume, 1972. Cap. IV, pp. 77-126. (GROSSMANN, 1972)

LARSSON, M., JANSSON, B., BLOM, R and MELANDER, A. **Influence of Austenitizing and Quenching Temperature on Jominy Hardenability of a Case Hardening and a Boron Steel**. Scandinavian Journal of Metallurgy, 19 (1990) 51-63. (LARSSON, 1990)

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. (SIEBERT, 1977)

SOUZA, Douglas Antunes de. Análise da dureza e microestrutura formada após ensaio de temperabilidade “Jominy”. **Anuário da Produção de Iniciação Científica Discente**, São Paulo, v. 12, p.735-752, dez. 2008. Disponível em: <<http://sare.anhanguera.com/index.php/anuic/article/view/660/508>>. Acesso em: 26 nov. 2013. (SOUZA, 2008)

REBECHI, João Guilherme. **Correlações numéricas entre taxas de resfriamento, microestruturas e propriedades mecânicas para o tratamento térmico do aço AISI/SAE 4140**. 2011. 92 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2011. (REBECHI, 2011)