

UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS TEÓRICOS PARA A AVALIAÇÃO DA TEMPERABILIDADE JOMINY DE AÇOS COM DIFERENTES COMPOSIÇÕES QUÍMICAS

Renato Henrique Scheidemantel

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Luiz Carlos Pereira

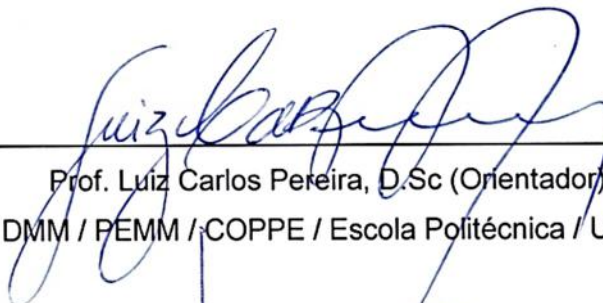
Rio de Janeiro
Setembro de 2014

UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS TEÓRICOS PARA A AVALIAÇÃO DA
TEMPERABILIDADE JOMINY DE AÇOS COM DIFERENTES COMPOSIÇÕES
QUÍMICAS


Renato Henrique Scheidemantel

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO METALÚRGICO

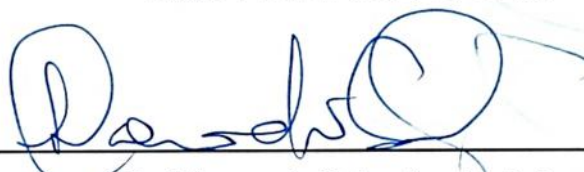
Examinada por:



Prof. Luiz Carlos Pereira, D.Sc (Orientador).
DMM / PEMM / COPPE / Escola Politécnica / UFRJ



Prof. Enrique Mariano Castrodeza, D.Sc.
DMM / PEMM / COPPE / UFRJ



Prof. Leonardo Sales Araujo, D.Sc.
DMM / PEMM / COPPE / UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL.

SETEMBRO DE 2014

Scheidemantel, Renato Henrique

Utilização de métodos teóricos para a avaliação da temperabilidade Jominy de aços com diferentes composições químicas/ Renato Henrique Scheidemantel. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

vii, 70p.: il; 29,7 cm.

Orientador: Luiz Carlos Pereira

Projeto de graduação – UFRJ/Escola Politécnica/ Engenharia Metalúrgica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 63.

1. Temperabilidade. 2. Dureza. 3. Ensaio Jominy. 4. Métodos teóricos. 5. Métodos numéricos. I. Pereira, José Carlos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Metalúrgica. III. Utilização de métodos teóricos para a avaliação da temperabilidade Jominy de aços com diferentes composições químicas.

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer primeiramente ao Eterno.

Também devo muito aos meus pais (in memoriam), a Rosemary Oliveira Rodrigues, aos meus amigos e familiares.

Não poderia deixar de mencionar o apoio irrestrito do Professor Luiz Carlos Pereira na elaboração do presente trabalho, assim como do professor Ari Sauer Guimarães, meu primeiro orientador.

Agradeço a ajuda do corpo técnico da Universidade, principalmente a João Carlos Veiga da Silva e Laércio Guzela.

Enfim, aos Professores da UFRJ e ao seu corpo Técnico- Administrativo, fica o meu especial agradecimento, sem os quais seria impossível realizar este projeto.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado ao DEMM/EP/UFRJ como parte integrante dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Metalúrgico

UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS TEÓRICOS PARA A AVALIAÇÃO DA TEMPERABILIDADE JOMINY DE AÇOS COM DIFERENTES COMPOSIÇÕES QUÍMICAS

Renato Henrique Scheidemantel

Setembro/2014

Orientador: Luiz Carlos Pereira

Curso: Engenharia Metalúrgica

Este trabalho aborda o uso do Ensaio Jominy como método de determinação de temperabilidade, amplamente utilizado pela indústria metalúrgica em geral. O enfoque principal do trabalho visa testar soluções teóricas de obtenção das curvas Jominy, amplamente divulgadas na literatura, e compará-las a resultados experimentais. O estudo foi desenvolvido a partir de Ensaios Jominy em 5 aços com temperabilidades distintas, variando na faixa de D_i entre 0,43" e 6,21". Os ensaios foram realizados em acordo com a Norma ASTM A255. Em seguida, foram traçados gráficos Jominy teóricos, por 3 métodos distintos, com base nas composições dos aços e os seus tamanhos de grão γ ASTM. Os resultados foram comparados por métodos estatísticos, obtendo as dispersões residuais e pontuais entre o método experimental e os teóricos. Em seguida foram analisados os resultados obtidos, a fim de se avaliar a qualidade das aproximações obtidas. Eventuais discrepâncias de resultados foram analisadas e comentadas. Ao final do trabalho é mostrado um método para a obtenção de aproximação por equações que descrevam os Ensaios Jominy experimentais, com o intuito de serem usadas em soluções numéricas e computacionais.

Palavras-chave: Temperabilidade, Dureza, Ensaios Jominy, Métodos Teóricos, Métodos Numéricos.

Abstract of Undergraduate Project presented to DEMM/POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Metallurgical Engineer.

USE OF THEORIC METHODS ON THE EVALUATION OF JOMINY HARDENABILITY
ON STEELS WITH DIFFERENT COMPOSITIONS

Renato Henrique Scheidemantel

September/2014

Advisors: Luiz Carlos Pereira

Course: Metallurgical Engineering

This paper discusses the use of the Jominy End Quench Test as a method for determining hardenability, widely used in the metallurgical industry in general. The focus of the work are theoretical Jominy solutions, widely reported in the literature, and the comparison of them to experimental results. The study was developed from tests on 5 steels with different hardenability, with ideal diameter (D_i) varying between 0.43" and 6.21". The tests were in accordance with ASTM A255 standard. In sequence, theoretical Jominy graphs for three different methods were obtained, based on the compositions of the steels and their ASTM γ grain sizes. The comparison by statistical methods, obtained the residual and dot dispersions between the experimental and theoretical method. Then the quality of the obtained approximations was analyzed, considering and discussing any major discrepancy. At the end of the paper, a method for obtaining approximated equations that describe the experimental Jominy tests are discussed, for the use in numerical and computational solutions.

Keywords: Hardenability, Hardness, Jominy End Quench Test, Theoretical Methods, Numerical Methods

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	2
1.2	Metodologia.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Os diagramas de Equilíbrio de Fases, Isotérmico e de Resfriamento Contínuo	4
2.2	Os Conceitos de Endurecibilidade e Temperabilidade	8
2.3	Fatores que influenciam a Temperabilidade	9
2.4	Ensaio de Temperabilidade	11
2.5	Bandas “H” e “RH”	17
2.6	Curvas Jominy Teóricas.....	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1	Ensaio Jominy	21
3.1.1	Preparação dos Corpos de Prova Jominy.....	21
3.1.2	Análise Dimensional e de Integridade das Amostras.....	21
3.1.3	Tratamento Térmico de Austenitização.....	23
3.1.4	Tratamento Térmico de Têmpera (Jominy)	24
3.1.5	Limpeza dos Corpos de Prova	27
3.1.6	Medidas de Dureza (Jominy).....	27
3.2	Análise Química Confirmatória dos Aços.....	29
3.3	Determinação do Tamanho de Grão Austenítico	29
3.4	Determinação dos Gráficos Teóricos	30
3.4.1	Método Teórico da Norma ASTM A255 (Di)	30
3.4.2	Método de Just	31
3.4.3	Adaptação ao Modelo de Just.....	31
3.4.4	Método da Secante Hiperbólica	33
3.5	Cálculo das Dispersões entre os gráficos Experimentais e os Teóricos	33
4	RESULTADOS	35
4.1	O Relatório dos Ensaio Jominy	35
4.1.1	Os Teores dos Elementos Químicos nos Aços Utilizados.....	35
4.1.2	O Tamanho de Grão de Austenita Prévia.....	35
4.1.3	Curvas Jominy	37

4.2	Comparação das Curvas Experimentais e dos Métodos Teóricos	38
4.3	Dispersões Residuais.....	48
4.4	Diâmetros Ideais Teóricos Calculados para os 5 Aços.	49
4.5	Posição Calculada da distância Jominy para a ocorrência de 50% de Martensita (50% M) – Norma ASTM A255.	49
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	50
5.1	Curvas de Temperabilidade Jominy Experimental.....	50
5.2	Curvas Jominy Experimental e Curvas Teóricas - Métodos de Just e Di (ASTM A255): Análises das Diferenças Relativas	52
5.3	Efeitos do TGy	53
5.4	Dispersão dos Resultados	54
5.5	O Aço SAE 1045 – Análise da Dispersão de Resultados	59
6	CONCLUSÕES	62
	BIBLIOGRAFIA.....	63
	ANEXO A – Dados de dureza HRc obtidos nos Ensaio Jominy	64
	ANEXO B – Comparação dos Gráficos Experimentais com as “bandas H”	69

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de endurecer materiais metálicos esteve presente na vida dos seres humanos desde a mais remota antiguidade. Há indícios, através de registros fósseis, de que o processo de encruamento já era utilizado ao se dar forma às peças fabricadas com cobre ou ferro meteorítico, desde datas tão remotas quanto 4000 a.C. Posteriormente, perto de 1200 a.C., os registros históricos indicam que já se sabia que, ao se submeter metais aquecidos a uma queda brusca de temperatura, tornava-os mais endurecidos. Em outras palavras, os processos de encruamento e têmpera de metais nos acompanha há milênios. Entretanto, essas tecnologias tiveram desenvolvimento muito lento, pois os métodos eram basicamente empíricos, e este conhecimento era repassados oralmente, já que não havia métodos eficientes do registro (escrita) na transmissão do conhecimento. Com o advento do papel torna-se possível a fixação dessas informações, o que permitiu que essas técnicas se difundissem com maior intensidade e de modo permanente.

Com o desenvolvimento da Metalurgia, e em particular da obtenção e processamento dos aços, o endurecimento desses metais foi compreendido em detalhes, e foram desenvolvidas técnicas que permitem a obtenção de peças de aços com dureza controlada, a partir do controle da microestrutura. Este conceito da relação composição química / condições de processamento / microestrutura está representado através dos diagramas de equilíbrio e das curvas de temperatura-tempo-transformação de fase dos aços (diagramas TTT/CCT), que por sua vez levam à relação microestrutura / propriedades mecânicas (dureza) desses materiais. A obtenção da máxima dureza do aço em uma parte específica da peça, associado à transformação da Austenita em Martensita, levou ao conceito de Temperabilidade / Endurecibilidade. Foram desenvolvidas técnicas experimentais que permitem a determinação das durezas em cada ponto de uma peça, desde que conhecidos a composição química do aço, tamanho de grão da austenita e as velocidades de resfriamento em cada posição dessa peça. Neste sentido, se destacaram as técnicas de medidas de Temperabilidade associadas aos conceitos de diâmetro crítico (D_c) e diâmetro ideal (D_i), desenvolvidas por Grossman, e a Curva de Temperabilidade Jominy. Entretanto, estes métodos exigem a confecção de corpos de prova, tratamento térmico de têmpera e medidas de dureza.

Assim, são propostas na literatura técnicas alternativas para a obtenção da curva de temperabilidade por métodos numéricos, a partir do conhecimento da composição química e do tamanho de grão da austenita do aço.

1.1 Motivação

O ensaio Jominy é amplamente utilizado na indústria, e tem a vantagem, em relação ao método proposto por Grossman, de fazer uso de apenas um corpo de prova para a determinação da temperabilidade do aço: curva da dureza para diferentes condições de têmpera (taxas de resfriamento distintas).

Ainda assim, para realizar esse ensaio, várias etapas são necessárias: tratamento de normalização do tarugo, usinagem do corpo de prova, controle para o processo adequado na têmpera do ensaio Jominy e na obtenção dos valores de dureza Rockwell C (HRc) da amostra após a têmpera. Falhas durante a realização dos ensaios, como temperatura de austenitização inadequada, temperatura ou fluxo de água de têmpera fora de padrões, desalinhamento do corpo de prova em relação ao jato d'água, tempo insuficiente de têmpera, fluxo de ar junto ao corpo de prova que leve à retirada de calor diferenciado durante a têmpera da amostra, durômetros e fornos de austenitização não regulados, podem gerar resultados de dureza inadequados.

Assim, ganham destaque as metodologias alternativas que possam simular resultados que levem a determinação da curva do ensaio Jominy através de métodos teóricos, baseados apenas na composição química dos aços e do tamanho de grão da austenita. Por sua vez, esses novos métodos exigem que seja aferido grau de confiabilidade ao se substituir o ensaio prático pela simulação numérica (curvas teóricas).

Estas questões levaram à elaboração do presente trabalho, onde são utilizados métodos teóricos propostos na literatura, os quais foram confrontados com os resultados experimentais. Além disso, para cada método foram feitas análises críticas, destacando-se os seus prós e contras, e as possíveis explicações quanto às melhores convergências das curvas para cada aço específico.

1.2 Metodologia

Com o intuito de responder às questões levantadas acima, foram escolhidos 5 aços com temperabilidades distintas, e listados a seguir na ordem crescente dessa propriedade: SAE 1020, SAE 1045, SAE 8620, SAE 4140 e SAE 4340.

Foram realizados ensaios Jominy em cada um desses aços de acordo com a Norma ASTM A255. Foram plotados os gráficos experimentais Jominy: Dureza HRc versus posição ao longo do corpo de prova, a partir da extremidade temperada.

Foram escolhidos 3 métodos numéricos para a determinação de curvas teóricas Jominy: (i) a equação proposta por Just; (ii) método teórico proposto na Norma ASTM A255, que se baseia no conceito de Diâmetro Ideal (D_i) proposto por Grossman; (iii) os gráficos da Secante Hiperbólica, sendo este último o mais recente e potencialmente promissor.

Os métodos numéricos para a obtenção das curvas Jominy teóricas exigem a composição química dos aços e a determinação do tamanho de grão prévio da austenita ($TG\gamma$). Estes parâmetros foram obtidos de acordo com as Normas específicas destes ensaios.

Não há grande disponibilidade de informações sobre coeficientes adotados nas curvas de Secante Hiperbólica disponíveis na literatura, mas foi possível encontrar coeficientes que se aplicaram convenientemente para a composição química e tamanho de grão do aço SAE 8620 utilizado neste trabalho. Além disso, foi discutido a possibilidade do método da Secante Hiperbólica ser utilizado na obtenção dos gráficos associados aos demais aços utilizados nesse trabalho.

Foram realizadas as análises quanto ao erro relativo na comparação das curvas Jominy obtidas experimentalmente e aquelas obtidas pelos métodos numéricos, com destaque para a influência dos diversos elementos químicos e o tamanho de grão da austenita de cada aço. Os coeficientes de ajuste utilizados nos métodos numéricos existentes na literatura são obtidos a partir de análises estatísticas das composição química e tamanho de grão da austenita de aços produzidos industrialmente. Dessa forma, os métodos numéricos preservam o conceito do parâmetro “H” relativo a banda de espelhamento das curvas Jominy presente na literatura na avaliação da temperabilidade dos aços.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Os diagramas de Equilíbrio de Fases, Isotérmico e de Resfriamento Contínuo

Embora os processos de têmpera e endurecimento dos metais sejam conhecidos há muito tempo, estes eram usados empiricamente, sem um embasamento técnico-científico que conduzisse a um maior controle dos processos. Com a consolidação do conhecimento na área denominada Metalurgia, e no caso específico a Metalurgia dos Metais Ferrosos, foi possível o estabelecimento dos diagramas de equilíbrio do Ferro com outros elementos químicos (no estado sólido), com destaque para a liga deste elemento com o Carbono (Fe-C). Se destacam as ligas Fe-C em que os teores de C máximo vai até 2,0%, sendo denominadas aços. O conhecimento desse diagrama, correlacionado aos teores dos elementos químicos e as suas microestruturas para diferentes temperaturas de equilíbrio, permitiu a obtenção de aços com diferentes quantidades relativas dos seus microconstituintes, e assim diferentes propriedades mecânicas. (ABBASCHIAN et. al., 2010).

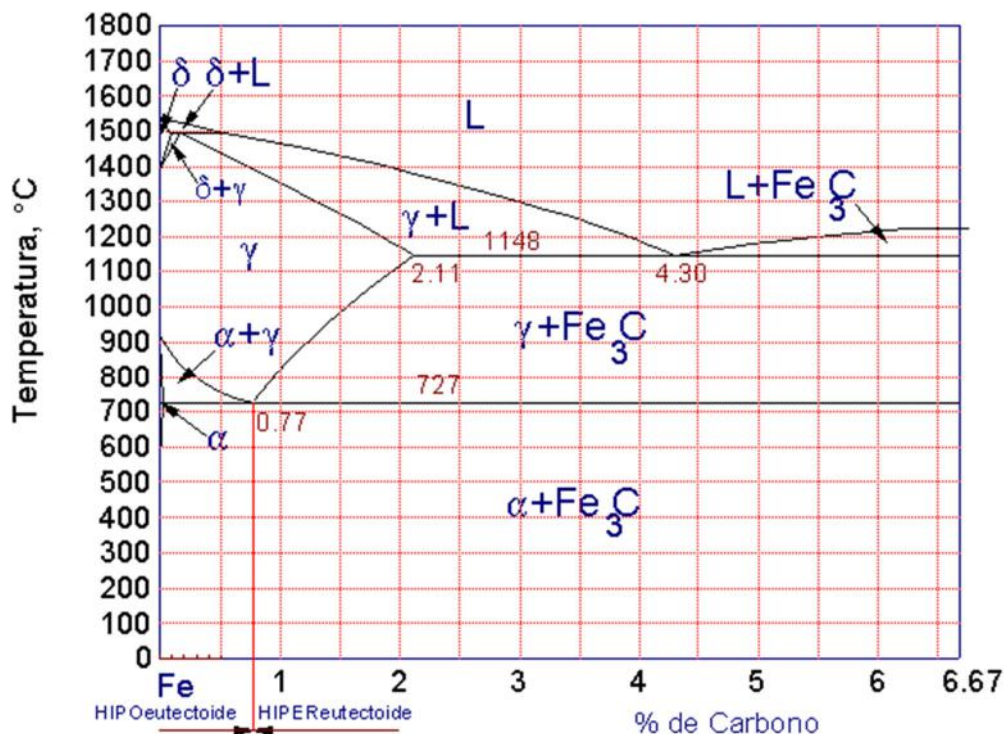


Figura 2.1 – Diagrama de Equilíbrio Fe-Fe₃C. Fonte: http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1092/html/2_diagrama_de_aleacin_hierrocarbono.html. Acessado em Julho de 2014.

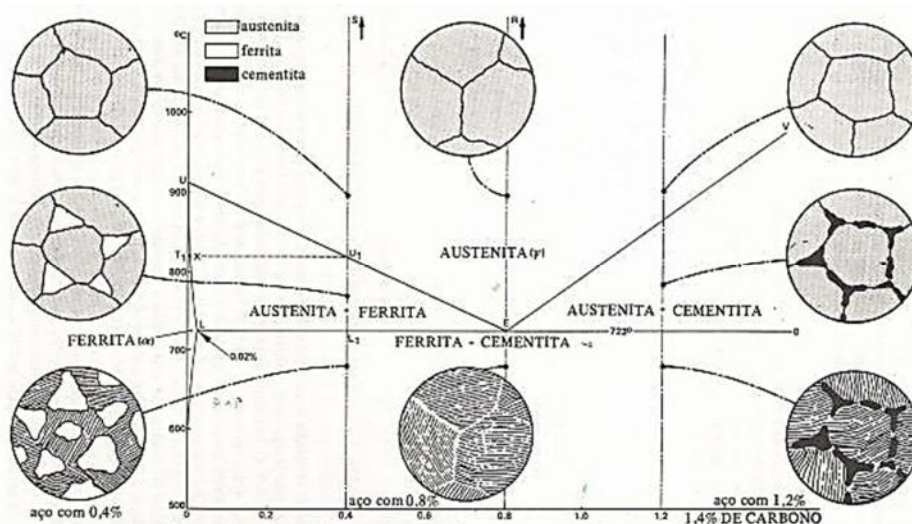


Figura 2.2 – Detalhe do diagrama Fe-Fe₃C e as diferentes microestruturas (temperatura ambiente) associadas aos teores de C dos aços. Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgE1AAC/cm-curvas-ttt>. Acessado em Julho de 2014.

Um outro tópico de destaque no processamento dos aços está relacionado aos estudos da cinética da transformação da fase Austenita (A), seja isotermicamente ou em resfriamento contínuo. Desses estudos foram estabelecidos os Diagramas de Transformação isotérmica (TTT) e de Resfriamento Contínuo (CCT), Figura 2.3.

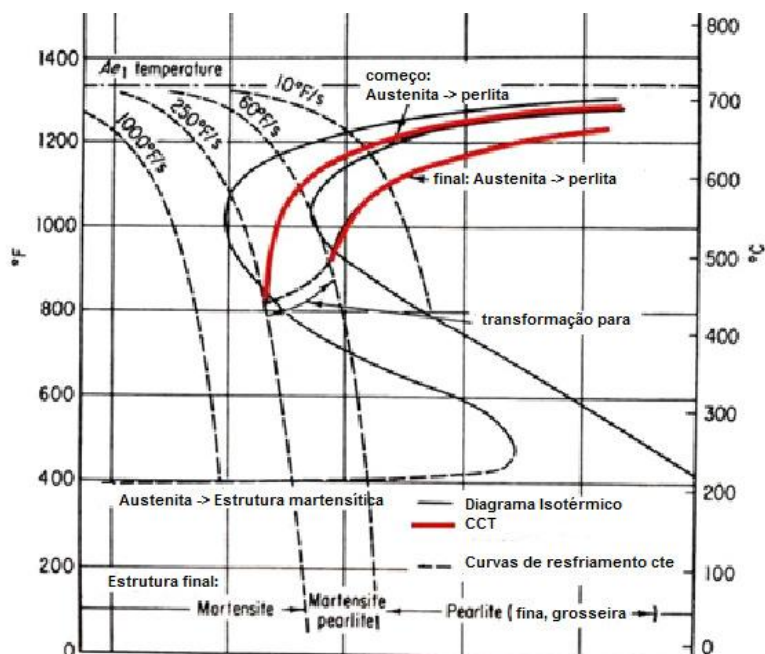


Figura 2.3 – Diagrama de transformação da austenita: isotérmico TTT (em preto) e em resfriamento contínuo CCT (em vermelho). Fonte: adaptado de HOEMBERG, D., 1996

Esses diagramas indicam que algumas transformações são controladas pela difusão de C e de outros elementos de liga em solução sólida na austenita, e se caracterizam pelos fenômenos de nucleação e crescimento de novas fases a partir dessa fase. As seguintes transformações ocorrem nessa faixa de temperaturas: Austenita -> Ferrita (F), Austenita -> Cementita (Fe_3C), A -> Perlita (P) e Austenita -> Bainita (B). A cinética dessas transformações se caracteriza por apresentar as curvas de transformação uma configuração em “C”, de modo que para uma faixa específica de temperaturas, os tempos de início e final das transformações a partir da austenita são muito curtos (“cotovelo” da curva). O aumento do teor de C (e de outros elementos de liga em solução sólida na austenita) deslocam este “cotovelo” para a direita: há um aumento do tempo para essas transformações da austenita controladas por difusão do C. (ABBASCHIAN et. al., 2010), (BROOKS, 1966).

O deslocamento do cotovelo (tempos maiores para início e final das transformações) permite que com resfriamento rápido da austenita (taxas de resfriamento à direita desse cotovelo) esta fase permaneça em equilíbrio instável até alcançar uma temperatura limite (M_s) a partir da qual tem início a transformação da Austenita para a fase Martensita (M). A característica principal da Martensita é a supersaturação de C em solução sólida intersticial e uma elevada densidade de discordâncias. A transformação A -> M se completa numa temperatura específica (M_f), que poderá ser abaixo da temperatura ambiente (ocasionando a presença de Austenita retida), sendo que essas temperaturas M_s e M_f dependem do teor de C (e dos elementos químicos presentes nos aços em solução sólida). Nos gráficos da Figura 2.4 é apresentado o efeito do teor de C e a de elementos de liga no deslocamento do cotovelo nas curvas TTT/CCT. (ABBASCHIAN et. al., 2010), (BROOKS, 1966).

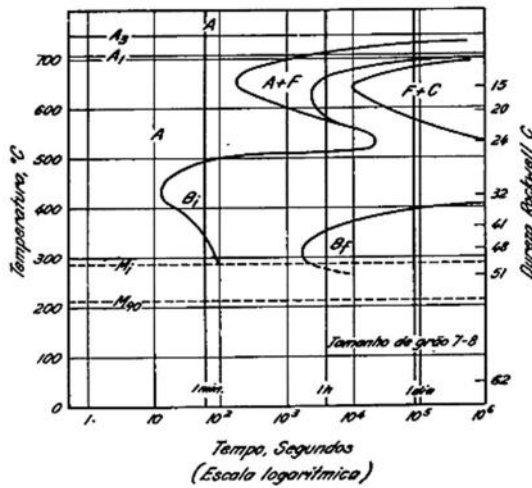
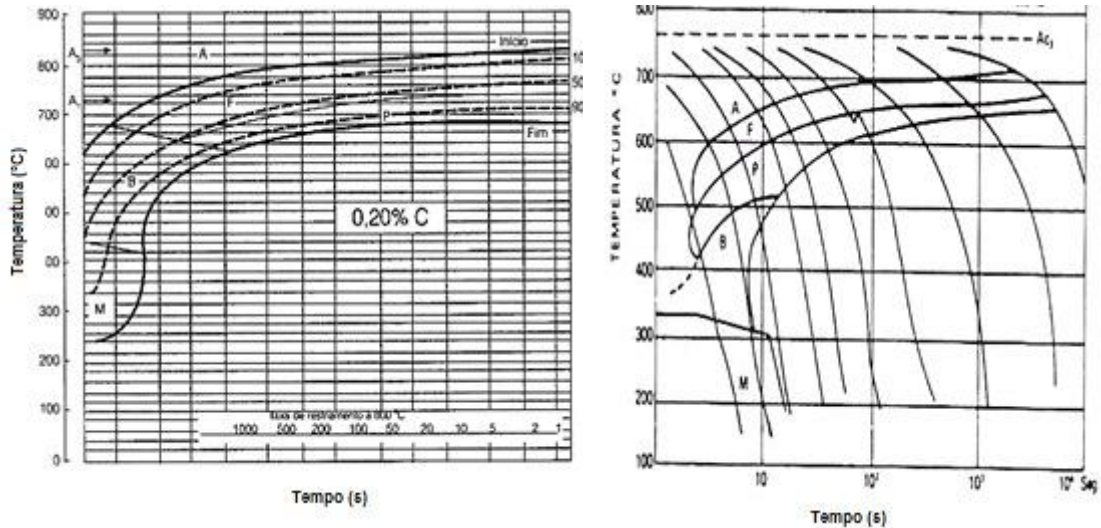


Figura 2.4- Diagramas de transformação (TTT) para os aços SAE 1020, SAE 1050 e 4340. Efeito do teor de C e dos elementos de liga no deslocamento do “cotovelo” para a direita. Fonte: CALLISTER, W.D.J, 2008 e adaptado de BROOKS, 1966

Assim, conhecidos a composição química do aço, sua temperatura inicial de aquecimento no campo austenítico e a velocidade de resfriamento até a temperatura final da peça (caminho térmico) é possível determinar a sua microestrutura final. A quantidade relativa das fases e/ou constituintes formadas irão determinar as propriedades mecânicas do material (Figuras 2.5 (a) e (b)).

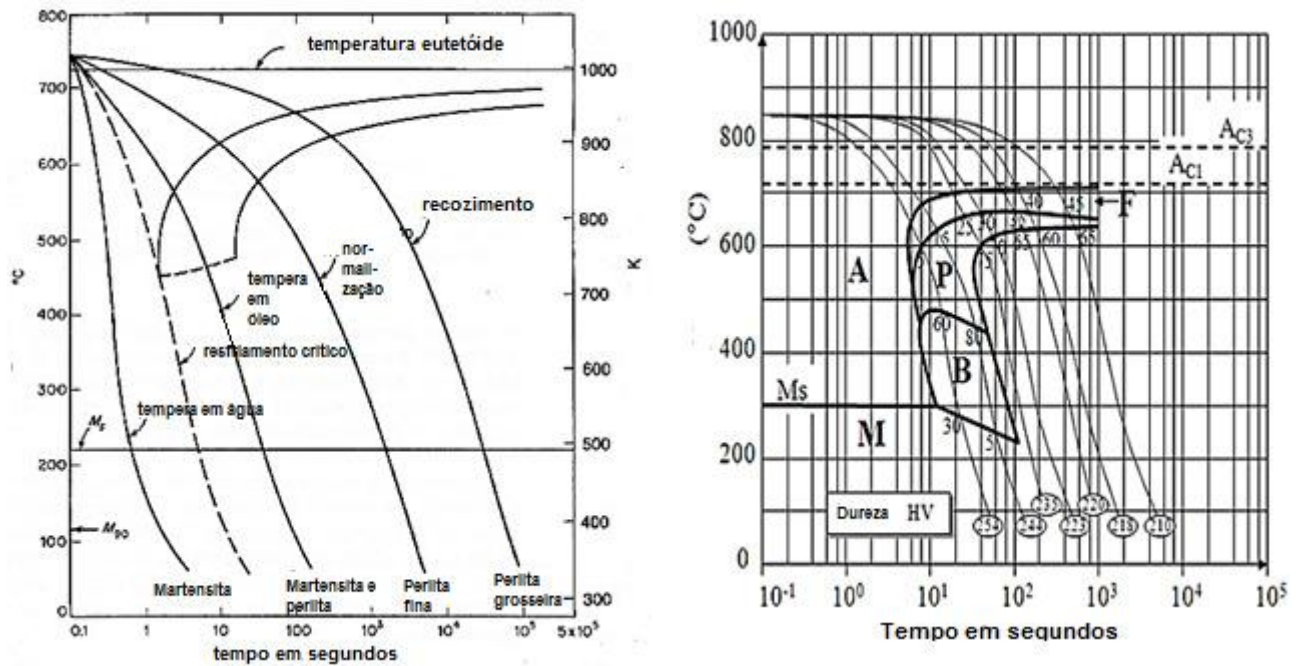


Figura 2.5 – (a) Diagramas CCT com diversas curvas de resfriamento e suas respectivas microestruturas finais. (b) Valores de dureza associados às microestruturas. Fonte: Adaptado de SMITH, W.F., 1998 e BROOKS, 1966

Uma importante propriedade mecânica requerida dos aços para o seu uso como componentes / peças refere-se à sua dureza. Para algumas aplicações, deseja-se que esta propriedade seja a mais elevada possível. Por sua vez, verifica-se que, entre as várias microestruturas obtidas nos aços a partir da transformação da Austenita por resfriamento controlado, aquela que apresenta a máxima dureza é a Martensita (M). Assim, garantir a maior quantidade de Martensita numa peça poderá ser um requisito tecnológico básico para a sua fabricação. Por sua vez, isso dependerá da composição química do aço, temperatura / tempo de austenitização (tamanho de grão da austenita e quantidade de elementos de liga em solução nessa fase) e a velocidade de resfriamento da peça (meio de têmpera e dimensões da peça). (ABBASCHIAN et. al., 2010), (BROOKS, 1966), (THELNING, 2000).

2.2 Os Conceitos de Endurecibilidade e Temperabilidade

Convém definir de modo claro estes dois termos, que muitas vezes são confundidos, mas que possuem significado físico diferente. Endurecimento refere-se a propriedade de um material ou metal resistir à penetração, como por exemplo um identador. Assim, materiais de alto endurecimento resistem bem a mossas, riscos, desgaste por fricção, etc., e assim a propriedade mecânica associada – dureza, apresenta valores elevados. Em contrapartida, o conceito de temperabilidade, que é o

tema principal deste trabalho, está associado ao grau de *transformação austenita em martensita no processo de resfriamento (têmpera)* em um componente de aço com uma dimensão específica. Foi estabelecido que esta quantidade de martensita a ser controlada corresponde a formação de pelo menos 50% da fase martensita a uma determinada profundidade da peça temperada. Desta forma, dois aços podem ter a mesma dureza superficial (associada ao teor de C), porém temperabilidades diferentes (função dos teores de C, elementos de liga e tamanho de grão austenítico). Como exemplo podem ser apresentados os resultados de dureza de duas peças produzidas com os aços SAE 1040 e SAE 4340, com geometrias idênticas e submetidos às mesmas condições de têmpera: as durezas na superfície das peças estarão na mesma faixa de valores, mas a *profundidade de têmpera* (maior fração da fase Martensita com a distância a partir da superfície) será muito superior para o aço SAE 4340 quando comparado ao aço SAE 1040. Portanto o aço SAE 4340 tem maior temperabilidade comparativamente ao aço SAE 1040. (TOTTEN, 2007)

2.3 Fatores que influenciam a Temperabilidade

Os fatores que afetam a temperabilidade dos aços estão listados abaixo:

- Teor de Carbono
- Teores e classes de elementos de liga
- Temperatura e tempo de Austenitização
- Tamanho de Grão Austenítico
- Meio de Resfriamento
- Geometria da peça a ser temperada

A presença de elementos de liga e o maior teor de C deslocam o cotovelo nas curvas de transformação da Austenita para a direita - gráficos TTT/CCT (Figura 2.4). Assim, mesmo para velocidades de resfriamento moderadas, a Austenita permanece em equilíbrio instável até alcançar a temperatura de transformação M_s , e o progresso dessa transformação $A \rightarrow M$ ocorre com a diminuição da temperatura, até alcançar a temperatura M_f (100% de M). O aumento no teor de C, além de estabilizar a austenita em temperaturas mais baixas e deslocar o cotovelo do diagrama TTT para a direita, promove o endurecimento da Martensita.

O tempo e a temperatura de austenitização apresenta dois efeitos interligados: o aumento da temperatura (T) e do tempo (t) de austenitização promovem o aumento do tamanho de grão da austenita (TG γ). Além disso, com o aumento de T e t acima de

certos valores críticos, maior será a quantidade de C e de elementos de liga em solução sólida nessa fase devido à dissolução dos seus precipitados. A dissolução dos precipitados nos contornos de grão austenítico induz a um maior crescimento de grão dessa fase, podendo levar, em alguns casos, ao crescimento anormal do grão da austenita ($CA\gamma$).

O aumento do tamanho de grão da austenita na temperabilidade dos aços pode ser assim explicado: os contornos de grão são núcleos para as transformações difusionais da austenita ($A \rightarrow F$, $A \rightarrow P$, $A \rightarrow B$, $A \rightarrow Fe_3C$). O maior tamanho de grão corresponde a uma menor área de contorno de grão por unidade de volume da austenita. Assim, será modificada a cinética da transformação da austenita, no que resultará no deslocamento do cotovelo do diagrama TTT para a direita. Isso corresponde, no resfriamento, a uma estabilização da austenita até temperaturas mais baixas, alcançando o valor crítico para a sua transformação em Martensita (M_s).

O deslocamento do cotovelo para a direita (maiores teores de C, elementos de liga e $TG\gamma$ mais grosseiro) vai garantir que, para temperaturas acima de M_s , a austenita seja estável mesmo para tempos mais longos, favorecendo assim a transformação da Austenita em Martensita para taxas de resfriamentos menores. Assim, haverá um valor crítico de velocidade de resfriamento (V_{cr}), à esquerda do cotovelo nos diagramas TTT/CCT do aço (Figura 2.5), de modo a garantir a plena transformação da Austenita em Martensita. Em relação ao $TG\gamma$, no entanto, vale lembrar que apesar do crescimento de grão tornar a austenita mais estável, não é desejável um crescimento exagerado de grão austenítico, tendo em vista a queda de resistência / tenacidade final da material.

As partes da peça que conterão a maior fração de Martensita serão aquelas resfriadas com velocidade superior a V_{cr} . Isso corresponde, em termos da prática do tratamento térmico de têmpera, à necessidade de um controle do meio de resfriamento (parâmetro H da severidade de têmpera – Tabela 2.1) conjugado às dimensões da peça a ser temperada (cujo controle será feito pelos parâmetros: Diâmetro Crítico (D_c) e Diâmetro Ideal (D_i)). (ABBASCHIAN et. al., 2010), (BROOKS, 1966), (THELNING, 2000), (TOTTEN, 2007).

Tabela 2.1– Valores de H para diferentes meios de têmpera.

Fonte: BROOKS,, 1966.

Agitação	Severidade de têmpera 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

2.4 Ensaios de Temperabilidade

Com o maior conhecimento sobre as transformações microestruturais dos aços de acordo com as suas composições químicas e condições de resfriamento, se fez necessário a padronização de testes capazes de classificar os aços de acordo com a sua temperabilidade. Assim, surgiram várias técnicas de ensaios que procuravam classificar os aços a partir de uma propriedade mecânica (dureza), associando esta propriedade as suas composições químicas / tamanho de grão, geometria da peça (dimensão significativa - diâmetro) e o meio de resfriamento empregado (severidade de têmpera). Destes se destacaram os seguintes ensaios: Perfil de Dureza Radial (“U”), Método Grossman e o Método Jominy.

Método do Perfil de Dureza Radial (“U”)

O método do perfil de dureza radial tem essa designação devido ao gráfico em forma de “U” das durezas obtidas ao longo da linha referente ao diâmetro (seção circular) de uma barra redonda de aço submetida a um processo de têmpera. É possivelmente um dos mais antigos métodos de avaliação da temperabilidade. As medidas de dureza próximo a superfície da barra em geral indicam valores superiores em relação ao centro, tendo em vista que a velocidade de resfriamento diminui entre a superfície e o núcleo da peça. Barras de mesmo diâmetro, submetidas a um mesmo meio de resfriamento mas utilizando aços que apresentam curvas TTT com o cotovelo mais deslocado para a esquerda apresentarão durezas mais elevadas (presença de Martensita), e o perfil dessas durezas apresentará menores diferenças nos valores registrados próximos à superfície e o núcleo da barra. Essa diminuição entre os valores de dureza entre a superfície e o núcleo corresponde uma maior temperabilidade dos aços, como mostrado na Figura 2.5. (BROOKS, 1966)

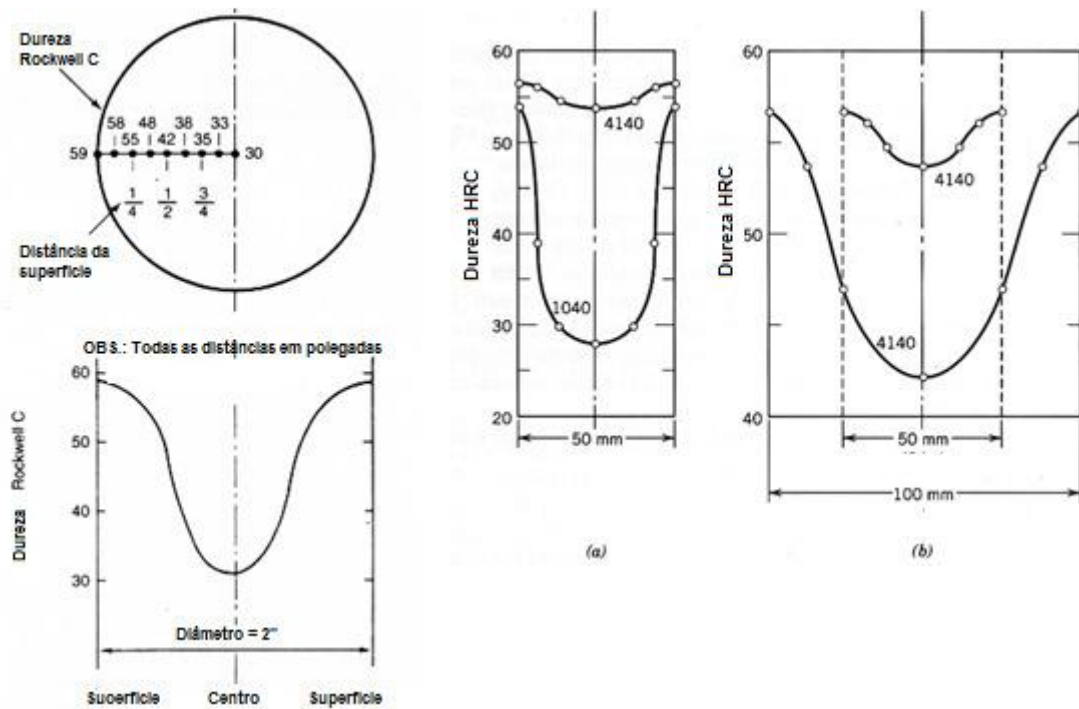


Figura 2.6 – (a) Perfil de dureza; (b) Diferenças dos perfis de dureza para aços de mesmo teor de C e diferentes elementos de liga e mesmo aço, porém com diferentes diâmetros. Fonte: TOTTEN, G.E, 2007

Método Grossman

O método de Grossman representa um avanço do método do perfil de dureza, com destaque para os seguintes tópicos: definição de um diâmetro crítico (D_c) feita a partir das análises de barras cilíndricas de aços que foram temperados em diferentes meios de têmpera: (a) identificação da posição onde se verifica a ocorrência de 50% de Martensita a partir da superfície da barra, marcada por uma nítida diferença de contraste na microestrutura quando da análise metalográfica da secção circular da barra temperada; (b) verificação de que este ponto está associada a uma mudança de curvatura no perfil de dureza ao longo do diâmetro da barra. Alterações do diâmetro da barra, meio de têmpera e tipo de aço, faz com que ocorra o deslocamento desse ponto para o centro da barra: esta situação correspondente ao D_c . Verifica-se que os aços de maior temperabilidade conseguem esta condição para barras de maior diâmetro e/ou meio de resfriamento menos severo. Portanto, o aço de maior temperabilidade será aquele de maior valor de D_c (Figura 2.7). (TOTTEN, 2007), (BROOKS, 1966)

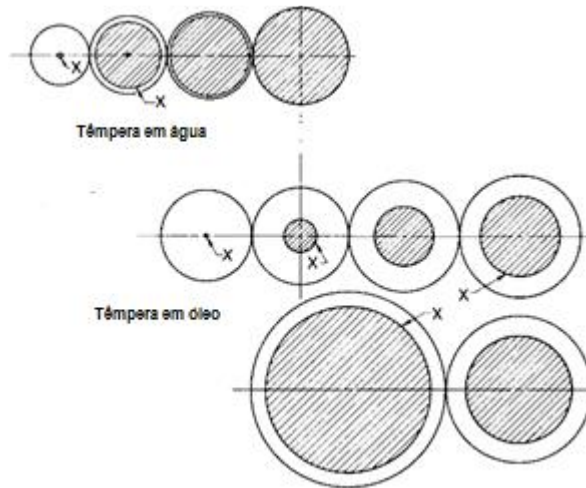
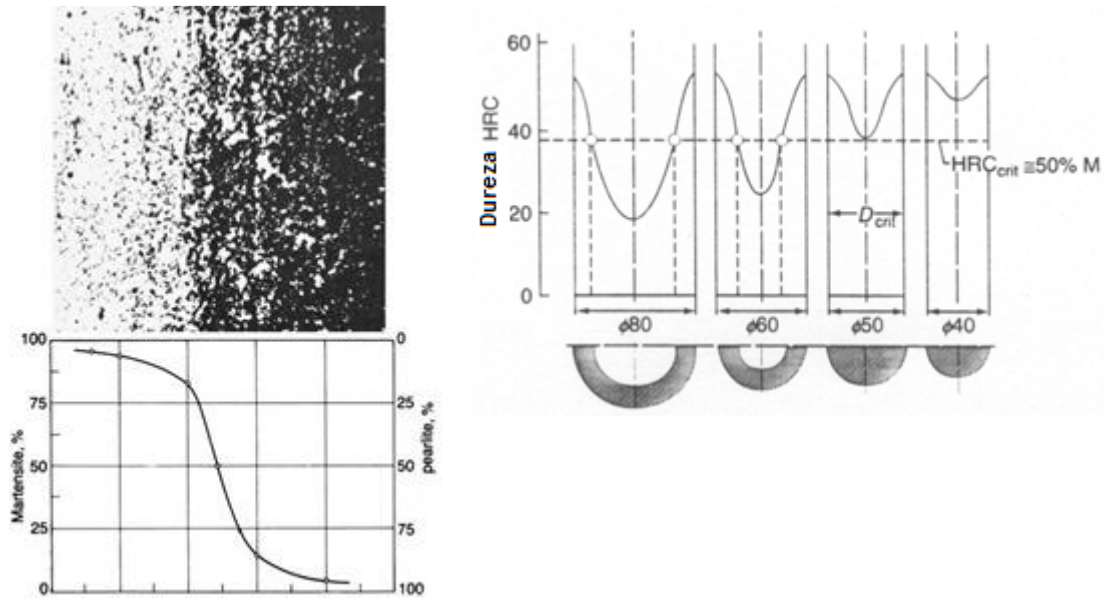


Figura 2.7 – (a) Perfil de dureza e localização da região de transição com 50% de Martensita; (b) Diâmetro crítico (D_c) - Grossman (c) Efeito do diâmetro da barra e o meio de têmpera sobre o D_c ; Fonte: TOTTEN, G.E., 2007.

Assim, barras de um mesmo aço, com mesmo diâmetro poderão apresentar diferentes D_c dependendo do meio de têmpera (controlado pelo parâmetro H – severidade de têmpera); barras de mesma dimensão, submetidas a mesmo meio de têmpera poderão apresentar diferentes D_c dependendo da composição química do aço (temperabilidade do aço). A outra definição introduzida por Grossman corresponde ao Diâmetro Ideal (D_i): valor de D_c considerando que a peça foi resfriada utilizando um meio de têmpera é considerado “ideal”: um meio capaz de produzir uma velocidade de resfriamento no núcleo da peça igual à sua superfície. O gráfico da Figura 2.8 apresenta curvas de Grossman que associam valores de D_c e D_i para diferentes meios de têmpera

(H). A Tabela 2.1 apresenta valores de H e os meios de têmpera em aços. (BROOKS, 1966).

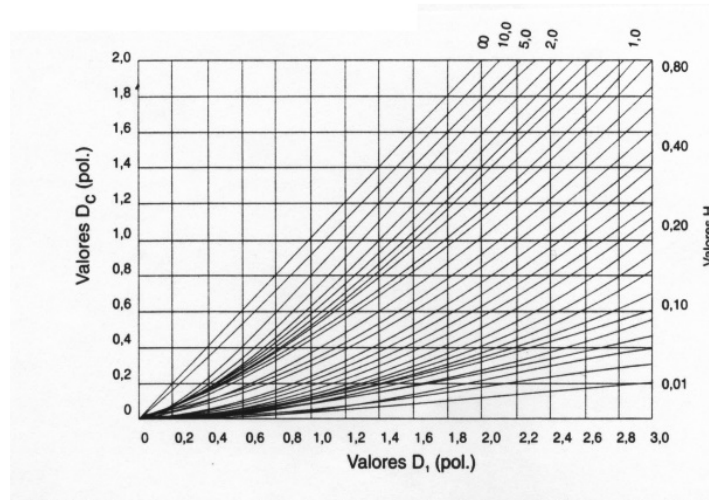


Figura 2.8– Curvas de D_c e D_i para diferentes meios de têmpera (H). Fonte: BROOKS, 1966

A literatura apresenta valores de D_i para os diversos aços disponíveis no mercado (composição química e $TG\gamma$), como apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2– Valores de D_i para aços temperáveis. Fonte: Chiaverini, 1977

Aço	D_i	Aço	D_i	Aço	D_i
1045	0,9–1,3	4135H	2,5–3,3	8625H	1,6–2,4
1090	1,2–1,6	4140H	3,1–4,7	8627H	1,7–2,7
1320H	1,4–2,5	4317H	1,7–2,4	8630H	2,1–2,8
1330H	1,9–2,7	4320H	1,8–2,6	8632H	2,2–2,9
1335H	2,0–2,8	4340H	4,6–6,0	8635H	2,4–3,4
1340H	2,3–3,2	X4620H	1,4–2,2	8637H	2,6–3,6
2330H	2,3–3,2	4620H	1,5–2,2	8640H	2,7–3,7
2345	2,5–3,2	4621H	1,9–2,6	8641H	2,7–3,7
2512H	1,5–2,5	4640H	2,6–3,4	8642H	2,8–3,9
2515H	1,8–2,9	4812H	1,7–2,7	8645H	3,1–4,1
2517H	2,0–3,0	4815H	1,8–2,8	8647H	3,0–4,1
3120H	1,5–2,3	4817H	2,2–2,9	8650H	3,3–4,5
3130H	2,0–2,8	4820H	2,2–3,2	8720H	1,8–2,4
3135H	2,2–3,1	5120H	1,2–1,9	8735H	2,7–3,6
3140H	2,6–3,4	5130H	2,1–2,9	8740H	2,7–3,7
3340	8,0–10,0	5132H	2,2–2,9	8742H	3,0–4,0
4032H	1,6–2,2	5135H	2,2–2,9	8745H	3,2–4,3
4037H	1,7–2,4	5140H	2,2–3,1	8747H	3,5–4,6
4042H	1,7–2,4	5145H	2,3–3,5	8750H	3,8–4,9
4047H	1,8–2,7	5150H	2,5–3,7	9260H	2,0–3,3
4047H	1,7–2,4	5152H	3,3–4,7	9261H	2,6–3,7
4053H	2,1–2,9	5160H	2,8–4,0	9262H	2,8–4,2
4063H	2,2–3,5	6150H	2,8–3,9	9437H	2,4–3,7
4068H	2,3–3,6	8617H	1,3–2,3	9440H	2,4–3,8
4130H	1,8–2,6	8620H	1,6–2,3	9442H	2,8–4,2
4132H	1,8–2,5	8622H	1,6–2,3	9445H	2,8–4,4

O gráfico da Figura 2.8 pode ser utilizado da seguinte forma: (a) com valor de D_i associando a um aço específico (Tabela 2.2) e definido um meio de têmpera (H)   possível a determinação do valor de D_c : o máximo diâmetro da barra que submetido  aquele meio de resfriamento que garante um valor de dureza máxima no seu núcleo. (b) a partir das exigências do projeto de engenharia será indicado o valor de dureza a

ser alcançado numa específica dimensão significativa da peça – seu diâmetro crítico (D_c). A partir desse gráfico, considerando o meio de têmpera (H , Tabela 2.1) que minimize trincas de têmpera e a ocorrência de tensões residuais de têmpera indesejáveis, é possível especificar o aço a partir do valor de D_i (gráfico da Figura 2.8 e Tabela 2.1) para alcançar com segurança aquela especificação.

Método Jominy

O método Jominy tem como vantagens principais: sua simplicidade, tempo de execução menor quando comparado aos outros métodos, e menor custo na sua execução. Um corpo de prova cilíndrico (4" de comprimento e 1" de diâmetro) do aço em análise é temperado a partir da sua extremidade utilizando um dispositivo de ensaio especial, como mostrado esquematicamente na Figura 2.9. Após a têmpera o corpo de prova é preparado para a realização de ensaios de dureza em duas faces longitudinais opostas entre si de 180 graus (em relação ao raio da amostra). As medidas de dureza (Rockwell C) são realizadas nessas faces em pontos definidos. Os resultados da dureza versus distância da extremidade resfriada em água são plotados num gráfico HRc x Distância. As dimensões do corpo de prova, do dispositivo de resfriamento e todas as demais condições operacionais estão detalhadas na Norma ASTM A255.

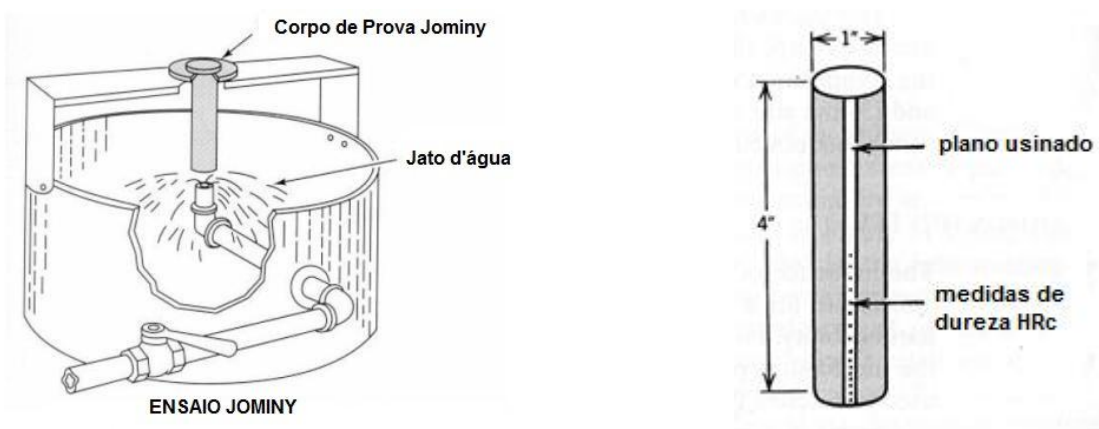


Figura 2.9 – (a) Dispositivo de têmpera do ensaio Jominy; (b) Medidas de dureza na amostra após a têmpera. Fonte: CALLISTER, W.D.J, 1997.

Uma análise do processo de resfriamento da amostra nesse dispositivo indicará que o resfriamento contínuo da extremidade da amostra com água (que permanece numa temperatura próximo a 25 °C na têmpera) produzirá taxas decrescentes de resfriamento ao longo da barra a partir dessa extremidade, e que estas velocidades de resfriamento poderão ser calculadas. Assim, a barra de aço nesse ensaio será submetida a diferentes severidades de têmpera ao longo do seu comprimento. Associando estas diferentes taxas de resfriamento com o diagrama CCT do aço,

verifica-se que isso corresponde diferentes caminhos térmicos a partir da Austenita até a temperatura de final de transformação: diferentes microestruturas associadas ao diagrama CCT ao longo da barra, e portanto diferentes valores de dureza ao longo da barra. Esta associação do diagrama CCT e o gráfico do Ensaio Jominy está apresentado na Figura 2.10. (SMITH, W.F, 1998)

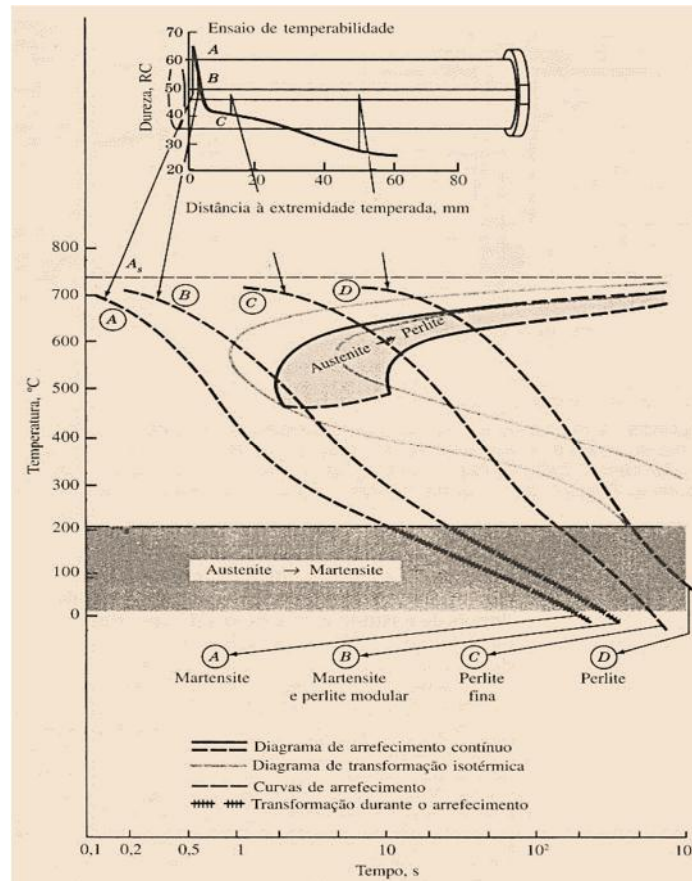


Figura 2.10 – Diagrama CCT com as diferentes velocidades de resfriamento ao longo da amostra: diferentes durezas com a distância a partir da sua extremidade. Fonte: SMITH, W.F., 1998

Portanto, a distância Jominy pode ser referida a uma velocidade de resfriamento específica, que por sua vez poderá ser relacionada a um meio de têmpera a ser empregado (parâmetro H) e às dimensões da peça daquele aço a ser temperada.

Aços de composições químicas diferentes apresentarão diferentes diagramas CCT, e portanto diferentes curvas Jominy. Os gráficos da Figura 2.11 são representativos das curvas Jominy de aços de mesmo teor de C e diferentes teores de elementos de liga e aços teores de C diferentes, mas com os mesmos elementos de liga.

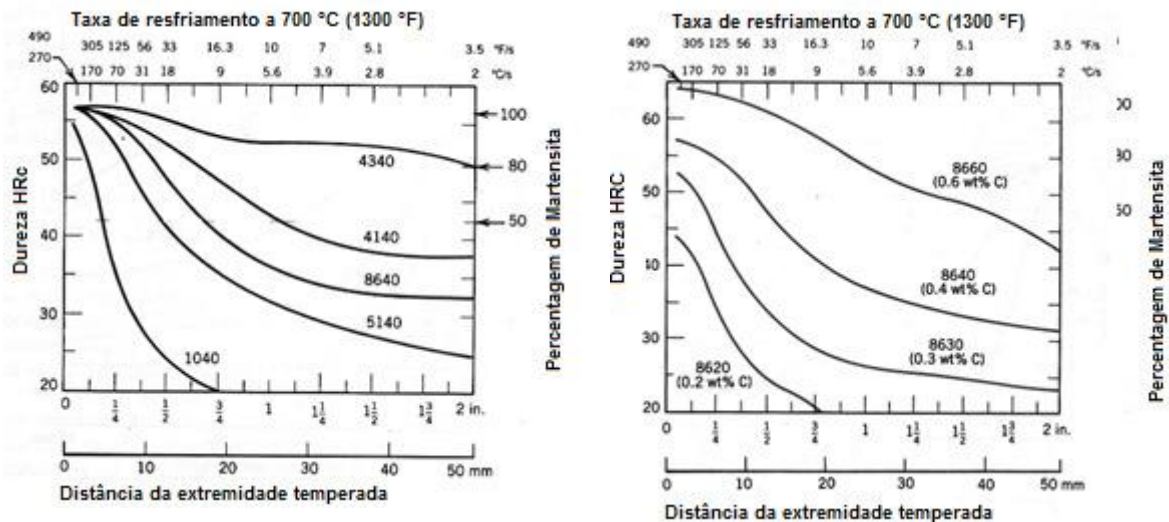


Figura 2.11 – (a) Curvas Jominy para aços com mesmo teor de C e diferentes elementos de liga; (b) Mesmos elementos de liga e diferentes teores de C. Fonte: adaptado de CALLISTER, W.D.J., 2008

Observa-se que o valor da máxima dureza (associada a presença de 100% de Martensita) depende apenas do teor de C. Curvas Jominy que apresentam um patamar de dureza máxima em grande extensão são representativos dos aços de elevada temperabilidade: maiores teores de C e de elementos de liga deslocaram o cotovelo da curva CCT para a direita, o que permitiu uma maior quantidade de Martensita, mesmo quando o aço é submetido às menores velocidades de resfriamento (maiores distâncias Jominy), como verificado para o aço SAE 4340 da Figura 2.11(a). (CALLISTER, 1977).

2.5 Bandas “H” e “RH”

Os aços são classificados por classe de acordo com o teor de C e os elementos de liga nas suas respectivas faixas de teores máximos e mínimos admissíveis: norma de classificação. Assim, os aços SAE 4340 e 4140 contém os mesmos teores (nominais) de C (0,4%), mas diferem quanto aos seus elementos de liga e faixas de teores admissíveis. Tendo em vista que essas especificações dos aços admitem diferenças nos teores do C e dos elementos de liga, e considerando-se os seus efeitos sobre a temperabilidade dos aços, as curvas Jominy irão refletir essas diferenças de composições químicas nos valores de dureza também numa faixa, para uma mesma distância. Quanto maior a tolerância nos teores dos elementos químicos, maior será a amplitude dos valores de dureza nessas curvas para um aço específico. Para minimizar essa dispersão, são designados aços com faixas mais estreitas nos teores dos seus elementos químicos. Os aços com essa característica de controle de composição química recebem a designação H. Quando é ainda mais estreitas essa faixa, são

classificadas como RH (restricted H), de acordo com a Norma ASTM A304,2011. Disso resulta que as curvas Jominy desses aços apresentam uma faixa mais estreita nos valores de dureza (Figura 2.12). Essa garantia de faixa restrita de composições químicas exige processos de refino dos aços mais elaborados, e conseqüentemente preços mais elevados. (BROOKS, 1966), (TOTTEN, 2007)

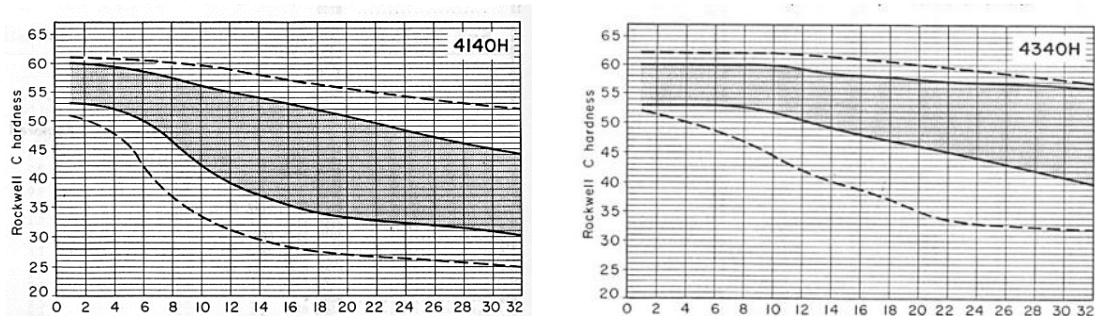


Figura 2.12 - Bandas H (em negrito) para os aços 4140 e 4340. Fonte: *Metals Handbook, ASM, 1961*

2.6 Curvas Jominy Teóricas

Ainda que o método das curvas Jominy de temperabilidade apresente vantagens (um único corpo de prova e tratamento térmico simples de têmpera) as etapas de preparação da amostra e as medidas de dureza exigem um razoável tempo de execução. Por sua vez, os estudos da correlação entre dureza e a distância a partir da extremidade temperada da amostra (velocidade de resfriamento) fazendo-se uso de análises de regressões com base nos teores dos elementos químicos e tamanho de grão do aço indicaram a possibilidade de reproduzir com razoável precisão estas curvas Jominy obtidas experimentalmente. Dessa abordagem surgiram os modelos teóricos para a construção de curvas Jominy dos aços. (TOTTEN, 2007), (THELNING, 2000).

Modelo de Just

Este modelo estabelece que o aumento da dureza depende do aumento do teor de C e demais elementos de liga e do tamanho de grão austenítico do aço, porém com pesos relativos diferenciados em relação à distância da extremidade temperada: (a) na extremidade a dureza depende exclusivamente do teor de C; (b) a partir de 6 mm a curva dependerá tanto do teor de C bem como dos elementos de liga e do tamanho de grão. A validade das curvas de temperabilidade proposta por Just foi estabelecida para faixas de teor de C e desses elementos de liga. As equações 2.1 e 2.2 estabelecem o valor de dureza para cada distância Jominy para estas duas condições de contorno.

Tabela 2.1 – Equação de Just e faixa de composição admissível. A equação de Just define a dureza máxima e para posições $E > 6\text{mm}$

$HRC_{\text{máx}} = 60 * \sqrt{\%C} + 20HRC, (\%C < 0,6\%) \quad (\text{Equação 2.1})$						
$HRC(E) = 95 * \sqrt{\%C} - 0,00276 * E^2 * \sqrt{\%C} + 20 * \%Cr + 38 * \%Mo +$ $14 * \%Mn + 5,5 * \%Ni + 6,1 * \%Si + 39 * \%V + 96 * \%P - 0,81 *$ $TG\gamma_{ASTM} - 12,28 * \sqrt{E} + 0,898 * E - 13HRC; E = \text{distância Jominy}$						
(Equação 2.2)						
	C	Cr	Mo	Mn	Ni	V
Faixa de Composição	<0,6%	<2%	<0,5%	<2%	<4%	<0,2%

Modelo do Diâmetro Ideal (Di) e Fatores de Ajuste - Norma ASTM A255

A Norma ASTM A-255 que descreve a metodologia para a obtenção da curva Jominy experimental contém também um procedimento para o levantamento da curva Jominy a partir de valores calculados do Diâmetro Ideal (Di), que por sua vez dependem da composição química e do tamanho de grão austenítico do aço.

A metodologia está baseada nos seguintes passos: (i) a partir da composição química do aço (C e elementos de liga) calcula-se o valor DI e o valor da dureza máxima (distância 0 – extremidade da amostra), (ii) a partir do DI e valor de dureza máxima, fazendo-se uso de tabelas que contém fatores multiplicadores (FM) é feita a conversão a partir do valor de dureza máxima para um novo valor de dureza associado a distância da extremidade temperada específica (distância Jominy). Isso permite a construção de curvas Jominy (valores de HRC e Distância), a partir da composição química e tamanho de grão austenítico do aço. Vale o registro de que nesse método, o tamanho de grão é considerando constante (ASTM 7).

O método da secante Hiperbólica

Este método tem sido bastante estudado hoje em dia, devido à flexibilidade da equação da secante Hiperbólica (Equação 2.3).

$$HRC(x) = (A - B) + B * \{sech[C * (x - 1)^D]\}, \text{ onde } x \text{ é a posição Jominy} \quad (\text{Equação 2.3})$$

Os coeficientes A, B, C, e D representam, respectivamente, a dureza máxima, amplitude do gráfico ($HRC_{\text{máx}} - HRC_{\text{mín}}$), posição do ponto de inflexão e ângulo de inclinação no ponto de inflexão. O parâmetro “x” corresponde a distância Jominy. Como nos casos dos modelos de Just e Norma ASTM A-255, este modelo se aplica para aços

com composição química e tamanho de grão austenítico dentro de faixas restritas de valores. A Tabela 2.2 indica um exemplo de equações associadas aos coeficientes que foram utilizados para determinar o gráfico para o aço SAE 8620.

Tabela 2.2– *Coeficientes de Secante Hiperbólica para o aço SAE 8620 e faixa de composição química admissível*

$$A = 481 * \%C^3 + 41,4$$

$$B = -28,7 * \%Cr * \%Mo - 61,6 * \%Mn * \%Si - 1,72 * TG\gamma ASTM - 1,35 * \%Ni^3 + 60,2$$

$$C = -0,8 * \%Cr * \%Mo - 1,04 * \%Mn * \%Si - 0,05 * \%Ni^3 - 14,9\%C^3 + 0,93$$

$$D = 1,2 * \%Cr * \%Mo + 1,98 * \%Mn * \%Si + 0,09 * \%Ni^3 + 33,6 * \%C^3 - 0,27$$

Faixa de teores: C- 0,15 a 0,15%; Mn-0,45 a 1,1%; Si- 0,22 a 0,35%; Ni- 0 a 1,86%; Cr- 0 a 1,03%; Mo- 0 a 0,76%; TG γ ASTM- 5 a 9

Simulações Numéricas

Um outra alternativa para descrever ensaios Jominy teoricamente são aquelas derivadas de simulações numéricas que levam à construção dos diagramas isotérmicos e de resfriamento contínuo, e as associações deste diagramas com os valores de dureza em função das velocidades de resfriamento imposto ao material (Hömborg, D.).

Redes Neurais Artificiais (RNAs)

Mais recentemente tem sido estudado o uso de redes neurais artificiais na obtenção de coeficientes para a obtenção de curvas numéricas que se ajustam às curvas Jominy experimentais (KNAP, M., 2009). O diferencial destes estudos se deve ao uso de métodos computacionais em que o destaque é reconhecimento de padrões e os ajustes incrementais visando a obtenção de valores de coeficientes que melhor se ajustam às curvas experimentais. A técnica faz uso de grandes volumes de informação, como bancos de dados com um número muito grande de resultados de curvas Jominy (experimentais) e suas composições químicas associadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Ensaios Jominy

Foi utilizada a norma ASTM A255 para a realização dos ensaios visando a obtenção das curvas de temperabilidade Jominy. Foram selecionados 5 aços designados de acordo com a classificação SAE, listados a seguir:

- SAE 1020, SAE 1045, SAE 8620, SAE 4140 e SAE 4340

Os aços foram fornecidos na forma de barras cilíndricas de 1,5” de diâmetro.

3.1.1 Preparação dos Corpos de Prova Jominy.

Previamente à usinagem dos corpos de prova Jominy foram realizados tratamentos térmicos normalização de tarugos retirados das barras (4,5” de comprimento por 1,5” de diâmetro). As especificações desses tratamentos térmicos seguiram as recomendações da Norma ASTM A255 e estão apresentadas na Tabela 3.1. As temperaturas do forno foram aferidas por termopar (Minipa MT-405).

Tabela 3.1 – Temperatura de Normalização dos Aços

	Aço SAE 1020	Aço SAE 1045	Aço SAE 8620	Aço SAE 4140	Aço SAE 4340
Temperatura de Normalização	925 °C	870 °C	925 °C	870 °C	870 °C
Tempo de Normalização	1 hora	1 hora	1 hora	1 hora	1 hora
Meio de resfriamento	Ao ar	Ao ar	Ao ar	Ao ar	Ao ar

Os corpos de prova para os ensaios de temperabilidade Jominy foram usinados de acordo com as dimensões constantes da Norma ASTM A255.

3.1.2 Análise Dimensional e de Integridade das Amostras

Após o recebimento dos corpos de prova usinados foi feita a análise dimensional dos mesmos, verificando-se a adequação à norma ASTM A255. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Dimensões dos Corpos de Prova Jominy

	Altura total	Diâmetro	Altura da presilha
CP SAE 1020	4" +/- 1/128"	1" +/- 1/128"	1/8" +/- 1/128"
CP SAE 1045	4" +/- 1/128"	1" +/- 1/128"	1/8" +/- 1/128"
CP SAE 8620	4" +/- 1/128"	1" +/- 1/128"	1/8" +/- 1/128"
CP SAE 4140	4" +/- 1/128"	1" +/- 1/128"	1/8" +/- 1/128"
CP SAE 4340	4" +/- 1/128"	1" +/- 1/128"	1/8" +/- 1/128"

Os itens de controle dimensional especificado pela Norma ASTM 255 estão apresentados na Figura 3.1.

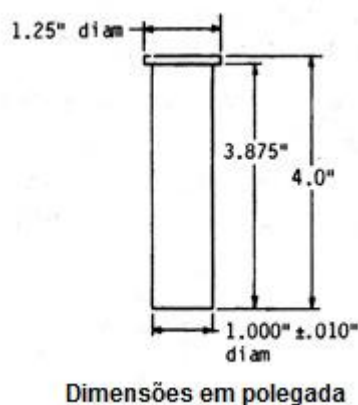


Figura 3.1 – Dimensões dos Corpos de Prova Usinados. Fonte: Norma ASTM A-255/2010

Após a usinagem foi verificada a integridade dos corpos de prova (marcas de riscos de ferramenta, etc.), e com uso de punção, foi feita a identificação SAE de cada uma das amostras na parte superior da presilha. Somente após esta identificação por punção é que foi retirada da fita de identificação dos aços (Figura 3.2).



Figura 3.2– Vista dos corpos de prova Jominy com suas respectivas identificações

3.1.3 Tratamento Térmico de Austenitização

Os corpos de prova foram austenitizados em forno tipo mufla (Carbolite – Mod. CWF 1300) em temperaturas e tempos especificados de acordo com as suas composições químicas, seguindo os requisitos da Norma ASTM A255. Estes dados estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Temperaturas e tempos de austenitização. Fonte: Norma ASTM A255.

	Temperatura de Austenitização	Tempo de Austenitização	Varição de Temperatura Máxima
CP SAE 1020	925 °C	30-35 min	+/- 6 °C
CP SAE 1045	845 °C	30-35 min	+/- 6 °C
CP SAE 8620	925 °C	30-35 min	+/- 6 °C
CP SAE 4140	845 °C	30-35 min	+/- 6 °C
CP SAE 4340	845 °C	30-35 min	+/- 6 °C

As temperaturas do forno, em cada tratamento térmico de austenitização, foram monitoradas por termopar (Minipa Mod. MT-405), a fim de certificar que as temperaturas estavam dentro da margem de erro definida pela norma. Todos os ensaios foram realizados com o desvio máximo de 2 °C em relação à Tabela 3.3, verificado pelo registro digital da temperatura (Figura 3.3). O tempo de austenitização de 30 minutos foi contado a partir da estabilização do forno na temperatura de austenitização pré-definida (Tabela 3.3), após a colocação do corpo de prova no forno. Na prática, esta estabilização ocorreu em não mais do que 3 minutos, para todas as amostras.



Figura 3.3 – Leitura digital da temperatura pelo termopar de certificação

Para evitar efeitos de descabonetação superficial das amostras, e/ou danos superficiais decorrentes de uma oxidação excessiva (“scalling”), todos os tratamentos

térmicos foram efetuados com a utilização de uma “luva” de grafite envolvendo a amostra, de acordo com a norma ASTM A255 (Figura 3.4). Para o isolamento da amostra em relação à luva foi utilizado uma camada de cerâmica (em destaque na Figura 3.4). Esse isolamento se faz necessário para que não ocorra contato direto da amostra com a luva, e assim possa ocorrer carbonetação da amostra (com o aumento de dureza superficial da msma).

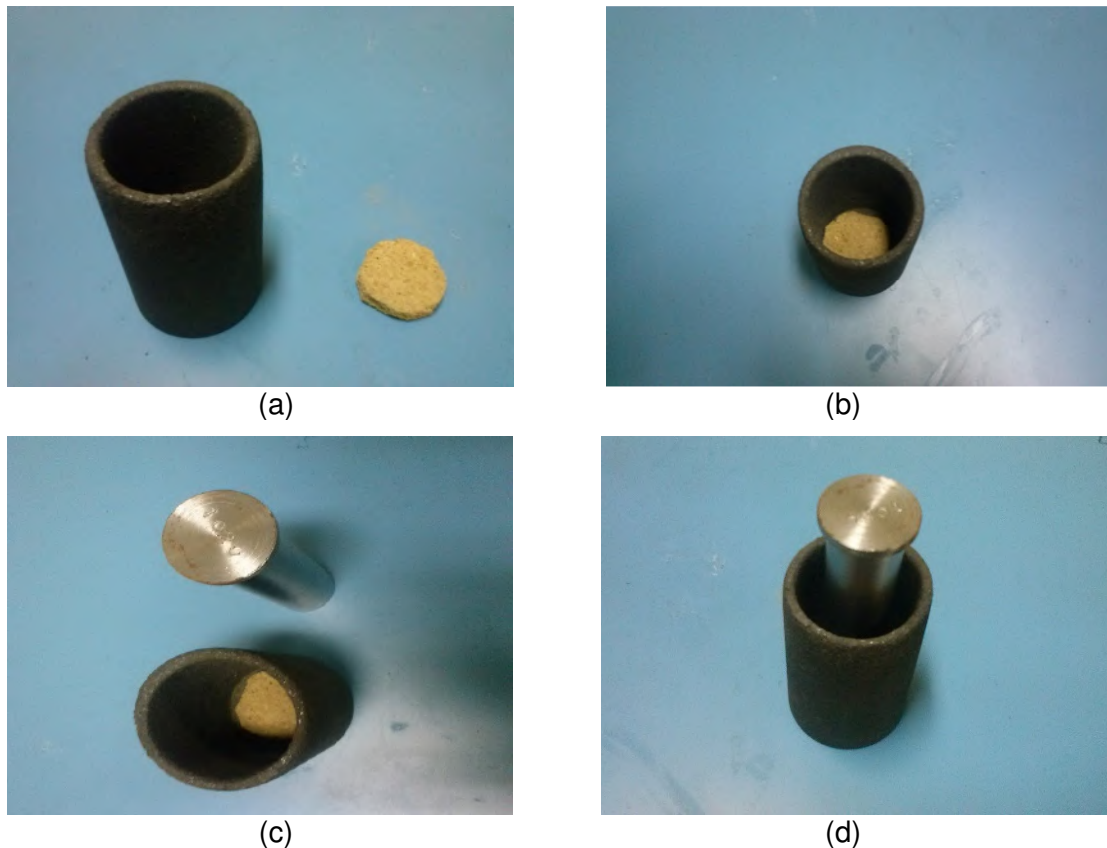


Figura 3.4 – Luva de grafite, base de apoio (cerâmica refratária) e corpo de prova. A montagem do conjunto é mostrada desde completamente desmontado (a), até o ponto onde está pronto a ser inserido no forno (d).

3.1.4 Tratamento Térmico de Têmpera (Jominy)

Após a austenitização os corpos de prova foram submetidos ao resfriamento em dispositivo específico de têmpera construído de acordo com as especificações da Norma ASTM A255. Nessa norma é especificado o posicionamento do corpo de prova para receber o jato de água que produzirá a têmpera a partir de uma das extremidades da amostra (Figura 3.5).

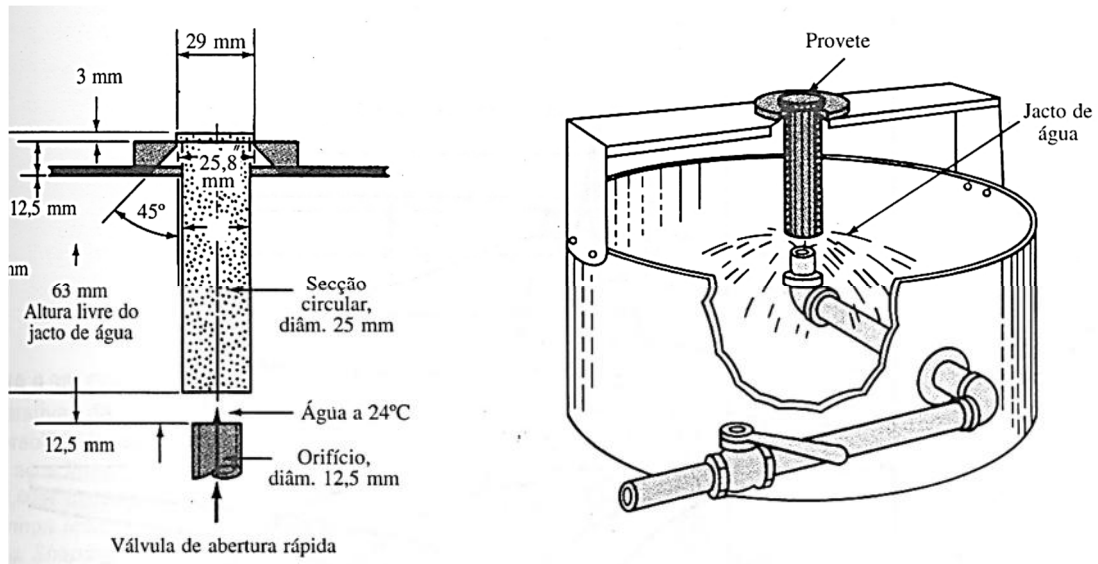


Figura 3.5 – Especificação do posicionamento da amostra no dispositivo de têmpera de ensaio Jominy. Fonte: SMITH, W.F., 1998.

Com o auxílio de um termômetro de mercúrio foi verificada a temperatura da água fornecida para o dispositivo de resfriamento, a fim de compará-la com a faixa de temperatura exigida pela Norma (entre 5°C e 30°C). As leituras indicaram que a água, em todos os casos, encontrava-se numa temperatura próxima a 26°C (Figura 3.6).



Figura 3.6 – Aferição da temperatura da água utilizada na têmpera das amostras.

O aparelho para têmpera Jominy utilizado segue a recomendação da Norma ASTM A255, possuindo duas válvulas, uma para regulação da altura da coluna de água e outra para abertura e fechamento rápido desse líquido.

O suporte do corpo de prova tem regulagem para afastamento e posicionamento da amostra em relação à saída do jato d'água. O diâmetro de saída do tubo que dirige o jato em direção à extremidade do corpo de prova possui 1/2" (meia polegada) no diâmetro interno. Um gabarito de 1/2" (meia polegada), de plástico, foi utilizado para certificar o afastamento e o paralelismo entre o tubo de saída da água e a extremidade da amostra (colocando o gabarito entre os dois). Outro gabarito plástico de 2,5" de altura (63,5mm) foi utilizado para medir a altura da coluna d'água livre, antes do posicionamento da amostra no dispositivo.

O aparelho utilizado possui as laterais fechadas para evitar qualquer fluxo de ar lateral no corpo de prova. Durante a realização dos ensaios todas as portas do laboratório permaneceram fechadas e não havia nenhum ventilador ou condicionador de ar ligado no recinto, evitando-se assim um resfriamento concorrente e indesejável nas amostras durante a sua têmpera.

As amostras foram retiradas do forno com tenaz e posicionadas rapidamente no suporte de têmpera, e acionado o registro de abertura rápida da água. Todo o processo, desde a abertura do forno até a abertura da válvula, não demorou mais do que 5 segundos em nenhum caso.

A válvula de água permaneceu aberta por 11 minutos, já que a norma indica que a têmpera dure no mínimo 10 minutos. Após o tempo especificado, o corpo de prova foi retirado com a tenaz e mergulhado em água, até o seu completo resfriamento (temperatura ambiente). A amostra Jominy durante o processo de têmpera no dispositivo está apresentada na Figura 3.7.



Figura 3.7– Amostra Jominy em processo de têmpera

3.1.5 Limpeza dos Corpos de Prova

Após o tratamento térmico foi realizada a limpeza por lixamento dos corpos de prova, retirando-se a carepa grosseira formada nos tratamentos térmicos de austenitização e têmpera. Nas áreas destinadas às medidas de dureza (faces defasadas de 180°) foi efetuado a remoção completa de qualquer material aderido à superfície (carepa, “scalling”, etc.).

3.1.6 Medidas de Dureza (Jominy)

Para as medidas de dureza ao longo das amostras, as medidas foram realizadas de acordo com a Norma ASTM A255. Os planos paralelos com profundidade de 0,4 mm defasados entre si de 180° previstos na norma foram substituídos por um processo de lixamento nessas faces da amostra, e o desenvolvimento de um dispositivo de fixação da amostra durante as medidas de dureza. Este dispositivo tem a função de estabilizar o corpo de prova e foi testado de modo a garantir um posicionamento da linha de medidas HRC a 90° do indentador. Este dispositivo foi testado previamente com relação ao método tradicional, de modo a evitar que qualquer erro de leitura pudesse ocorrer. Além disso, um vínculo na parte posterior do corpo de prova evitava qualquer tendência de giro. Todos os defeitos superficiais foram eliminados por lixamento após o tratamento térmico. Contribuiu para a diminuição da formação de carepa o controle da atmosfera no interior do forno (luva de grafite).

As distâncias entre as identações, segundo a Norma ASTM A-255, são múltiplos de 1/16” (1/16 polegada) a partir da extremidade em contato com a água durante a têmpera, conforme segue: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 28, 32. Com o intuito de facilitar o posicionamento da amostra e aumentar a precisão da localização das identações, foi utilizada uma escala de papel com subdivisões de 1/16”, colada ao lado da superfície a ser ensaiada (Figuras 3.8 e 3.9)

As durezas foram medidas na escala Rockwell C (durômetro WPA – Werkstoffpruefmaschinen Leipzig), com indentador com ponta de diamante. Previamente à realização das medidas de dureza dos corpos de prova, o durômetro foi aferido com amostra padrão. Os detalhes da medida de dureza nas amostras Jominy são apresentadas na Figura 3.9.



Figura 3.8– Dispositivo para posicionamento das amostras Jominy para os ensaios de dureza, com a escala de posicionamento do indentador.

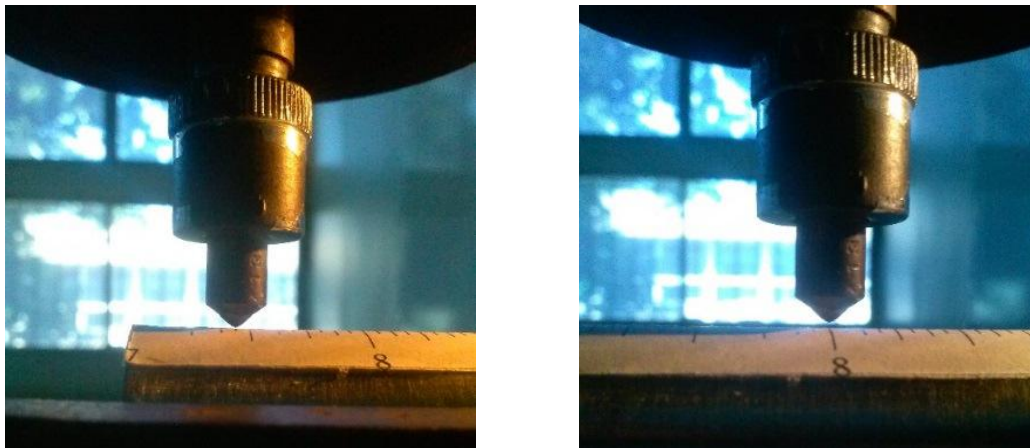


Figura 3.9 – Posicionamento da amostra e indentador para a sequência de medidas de dureza.

Para cada corpo de prova foram realizadas as medidas de dureza em duas faces, localizadas a 180° uma em relação a outra (rotação em relação ao diâmetro), de acordo com a Norma ASTM A255. O resultado é considerado satisfatório e válido quando o valor de uma medida não difere mais de 4 HRC em relação à medida, na mesma posição longitudinal, feita nas faces distantes entre si em 180°. Assim, o valor de dureza Jominy em cada ponto foi a média entre os dois valores (mesma posição longitudinal, uma medida em cada face). De acordo com a Norma ASTM A255, os valores a serem plotados no gráfico Dureza HRC x Distância Jominy deverão obedecer a seguinte regra: os valores médios (média das medidas das 2 faces) devem ser arredondados para o valor inteiro mais próximo.

3.2 Análise Química Confirmatória dos Aços

Foram retiradas amostras de 1,5 cm de cada barra (Figura 3.10), as quais foram enviadas para análise química confirmatória de suas composições químicas. Estas análises seguiram a norma ASTM E 415-08. Foi utilizado o espectrômetro de emissão ótica "SPECTROMAX", modelo FE-10-F.



Figura 3.10 – Amostras enviadas para análise química.

3.3 Determinação do Tamanho de Grão Austenítico

Para o levantamento das curvas Jominy com a utilização dos modelos teóricos se faz necessário o conhecimento da composição química dos aços e o tamanho de grão da austenita prévia à têmpera (TG γ). Para a determinação desse tamanho de grão foram feitos tratamentos térmicos de austenitização em amostras dos aços, nas temperaturas e tempos de acordo com os valores apresentados na Tabela 3.3, seguindo-se de têmpera em água resfriada (gelo), de modo a garantir a máxima quantidade de transformação da Austenita em Martensita para todos os aços estudados. Foram utilizadas amostras idênticas àquelas enviadas para as análises químicas (Figura 3.10). Após os tratamentos térmicos as amostras foram preparadas metalograficamente (lixamento e polimento convencionais) seguida de ataque químico especial para revelar os contornos de grão da Austenita prévia. Foi usado o seguinte reagente para revelar esses contornos de grão da austenita: 200ml de água destilada, 4g de cloreto férrico e 4g de ácido pícrico.

As medidas de tamanho de grão seguiram as recomendações constantes da Norma ASTM E112-13. As análises metalográficas foram realizadas por microscopia ótica (Microscópio Olympus, Modelo BX60M). Foi utilizado o método dos interceptos para a determinação do TG γ , e estes valores foram convertidos para Tamanho de Grão ASTM, de acordo com a metodologia apresentada no Anexo A1 dessa Norma ASTM E112-13.

3.4 Determinação dos Gráficos Teóricos

Na elaboração deste trabalho, foram utilizados 3 métodos teóricos reportados na literatura especializada, quais sejam: (i) método da Norma ASTM-255 (Di), (ii) método de JUST, (iii) método da Secante Hiperbólica. Foi utilizado, também, uma variação do método de Just, que foi denominado “Just Modificado”, com o fim de se obter valores de dureza para as distâncias Jominy abaixo de 6mm, já que nesse método somente são definidos valores de dureza Rockwell C para posições Jominy a partir de 4/16” (J4).

3.4.1 Método Teórico da Norma ASTM A255 (Di)

O método da Norma ASTM A255 utiliza os teores dos elementos C, Mn, Si, Ni, Cr, Mo, Cu, V, Zr, dentro dos intervalos dados pela Tabela 3.4. A partir desses teores, é calculado o valor do diâmetro ideal (Di) teórico, considerando *Fatores de Multiplicação* para cada elemento químico listados na Norma. É também calculado o valor da dureza máxima a partir do teor de C, através de outra tabela contida naquela norma.

Tabela 3.4 – Faixa de composição admissível para o método da norma ASTM A255 (Di)

	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%V	%Zr
Faixa de Composição	<0,90	<1,95	<2,00	<3,50	<2,50	<0,55	<0,55	<0,20	<0,25

A partir desses dados (Di e HRc máx.), são utilizados os coeficientes (valores tabelados na Norma ASTM A 255), que dependem do Di, para dividir o valor da máxima dureza, obtendo-se um valor HRC para cada posição Jominy. As posições Jominy consideradas por este método, múltiplos de 1/16” são: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28, 32.

O método difere levemente dependendo do aço conter ou não o elemento químico Boro, sendo que o cálculo do Di e a tabela com os fatores de divisão são diferentes dependendo dessa classificação.

O método da Norma ASTM A255 (Di) considera que o tamanho de grão da Austenita (TG γ – Número ASTM) é fixo e igual a 7. Os valores calculados para os aços utilizados neste trabalho foram obtidos através das tabelas 2, 4, 6, 7 e 10 da Norma ASTM A-255/2010.

3.4.2 Método de Just

A equação de Just foi desenvolvida nos anos 1950 a partir de análises por regressão linear de curvas Jominy para um número considerável de aços temperáveis, com suas composições químicas e valores de dureza associados. Este método apresenta-se como um método capaz de fornecer gráficos Jominy teóricos para aços dentro de uma ampla faixa de composição química. Assim, todos os 5 aços estudados nesse trabalho encontram-se na faixa admissível de composição para o uso da fórmula apresentada no Tabela 2.1. (TOTTEN, 2007)

3.4.3 Adaptação ao Modelo de Just

O modelo de Just não é definido para as 3 primeiras posições de distância Jominy. Isto se deve ao fato de que o método procura atender uma ampla variedade de composições químicas de aços, no que resulta numa grande diferença nas suas temperabilidades: aços que apresentam extenso patamar de dureza máxima (trechos de distâncias em que o teor da fase Martensita é próximo a 100%), até aqueles em há uma acentuada diminuição de dureza já a partir da extremidade temperada (representativo dos aços em que há pouco ou nenhuma Martensita localmente). Estes comportamentos não conseguem ser descritos a partir da equação proposta por Just.

Esta adaptação consiste em:

(a) Utilizar a Equação 2.1 para calcular o valor de dureza HRC máxima teórica (posição J inicial - extremidade, associada à dureza da Martensita):

(b) Definir uma reta entre este valor de dureza máxima (J inicial) e J4 (primeiro valor da curva proposta por Just (J4)). É feita uma partição nesta reta e por proporcionalidade (semelhança de triângulos) são calculadas as durezas HRC nessas primeiras posições Jominy, conforme apresentado na Figura 3.11.

Posição de Dureza HRCmáx teórica calculada (equação 2.1), na posição J(1/16") do CP Jominy. Para o aço SAE 1020, que possui 50% Martensita abaixo da posição J1, considera-se a borda do CP

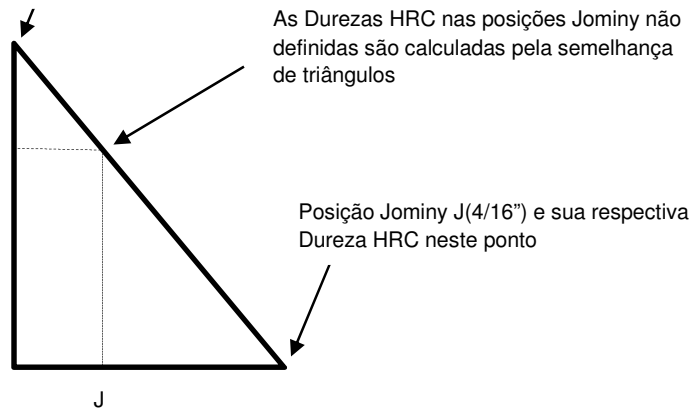


Figura 3.11 – Método para se obter as 3 primeiras posições Jominy na adaptação ao teórico Just

(c) Caso ocorra uma situação em que, para qualquer distância, a dureza calculada pela equação de Just ultrapasse o valor da dureza máxima fornecido pela Equação 2.1, o valor de dureza máxima será aquele calculado pela equação 2.1, como exemplificado na Figura 3.12.

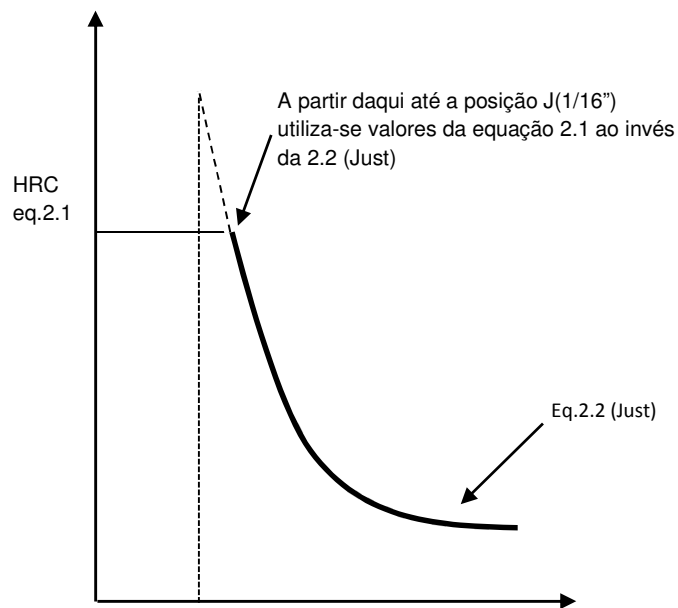


Figura 3.12 – Exemplo da segunda alteração ao Modelo de Just

Assim, os passos de utilização do método Just Adaptado: compara-se os valores de dureza a partir das Equações 2.1 e 2.2. Caso o valor da dureza a partir da Equação 2.2, na posição Jominy J4 (4/16") esteja abaixo do valor da dureza calculado pela Equação 2.1, utiliza-se a Figura 3.11 para calcular os 3 primeiros pontos. Caso contrário utiliza-se a Figura 3.12 para calcular esses pontos.

3.4.4 Método da Secante Hiperbólica

Este método é bastante estudado atualmente, junto com métodos estatísticos, devido à ampla flexibilidade de ajuste permitido pela equação da Secante Hiperbólica (Equação 2.3).

Os coeficientes A, B, C, e D representam, respectivamente, a dureza máxima, amplitude do gráfico ($HRC_{máx} - HRC_{mín}$), posição do ponto de inflexão e ângulo de inclinação no ponto de inflexão. Estes coeficientes são obtidos por métodos estatísticos, e dependem dos teores dos elementos de liga e do TG γ (ASTM).

O método da Secante Hiperbólica vem sendo bastante estudado recentemente, pois a partir dessa equação é possível reproduzir os patamares superiores e inferiores de dureza, assim como quantificar posições relativas aos pontos de inflexão da curva, e o coeficiente angular da curva nestes pontos.

Neste trabalho foram utilizados os coeficientes A, B, C e D, associados aos teores de elementos químicos dos aços, como listados na Tabela 2.2. Entretanto, há restrições quanto às faixas de variação dos teores desses elementos químicos e do tamanho de grão da austenita. Assim, estes coeficientes para obtenção das curvas de temperabilidade somente se aplicariam àqueles aços cujas composições químicas estejam contempladas na Tabela 2.2. No caso do presente estudo, o único aço que atendeu a estas restrições foi o SAE 8620. No caso dos demais aços, se faz necessário o conhecimento de outras equações para a obtenção destes coeficientes. Disso resulta que, pela sua importância tecnológica, há um mercado cujo produto a ser comercializado são as equações relativas a estes coeficientes A, B, C e D, para diversas classes de aços.

3.5 Cálculo das Dispersões entre os gráficos Experimentais e os Teóricos

A dispersão Residual (S), ou Global, entre os valores dos gráficos teóricos e experimentais foi calculada segundo a equação 3.1:

$$S = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n-2}} ; n \text{ posições e: } \Delta = HRC_{\text{experimental}} - HRC_{\text{teórico}} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Essa equação indica que os resultados serão sempre positivos, indicando apenas a diferença entre os valores. Entretanto, não é indicado a posição relativa (acima ou abaixo) das curvas experimental e teórica. Para isso foi adotado o critério da dispersão pontual P, definido por $P = HRC_{\text{exp}} - HRC_{\text{teo}}$. Assim, quando a dispersão pontual apresentar valores positivos, o gráfico experimental, localmente, se situa acima do gráfico teórico; quando negativo a situação é inversa.

4 RESULTADOS

4.1 O Relatório dos Ensaio Jominy

O relatório dos ensaios Jominy, segundo a Norma ASTM A255, deve conter as temperaturas de normalização e austenitização, o TG γ ASTM de austenita prévia e os teores dos elementos químicos de cada aço. As curvas Jominy - posição versus dureza, deverão apresentar também as taxas de resfriamento associada àquelas posições.

4.1.1 Os Teores dos Elementos Químicos nos Aços Utilizados

Os resultados das análises químicas dos aços utilizados neste trabalho estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados das Análises Químicas.

	%Fe	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%P	%V	%Zr	%B
SAE 1020	98,8	0,244	0,44	0,10	0,002	0,05	0,01	0,202	0,015	<0,001	0,0035	<0,0005
SAE 1045	98,4	0,450	0,69	0,23	0,02	0,04	0,06	0,047	0,014	<0,001	0,0026	0,0007
SAE 8620	97,2	0,241	0,95	0,27	0,42	0,52	0,19	0,053	0,013	0,0022	0,0031	0,0006
SAE 4140	96,8	0,383	0,91	0,33	0,05	0,94	0,20	0,211	0,008	0,0028	0,0026	<0,0005
SAE 4340	95,6	0,427	0,68	0,25	1,77	0,73	0,20	0,177	0,014	0,0043	0,0025	<0,0005

4.1.2 O Tamanho de Grão de Austenita Prévia

A Figura 4.1 apresenta as micrografias dos aços em estudo, com destaque para os contornos de grão da austenita prévia. Para cada aço, foram contados em torno de 700 interceptos, distribuídos em várias posições da amostra. O resultado da análise dos TG γ estão apresentados na Tabela 4.2

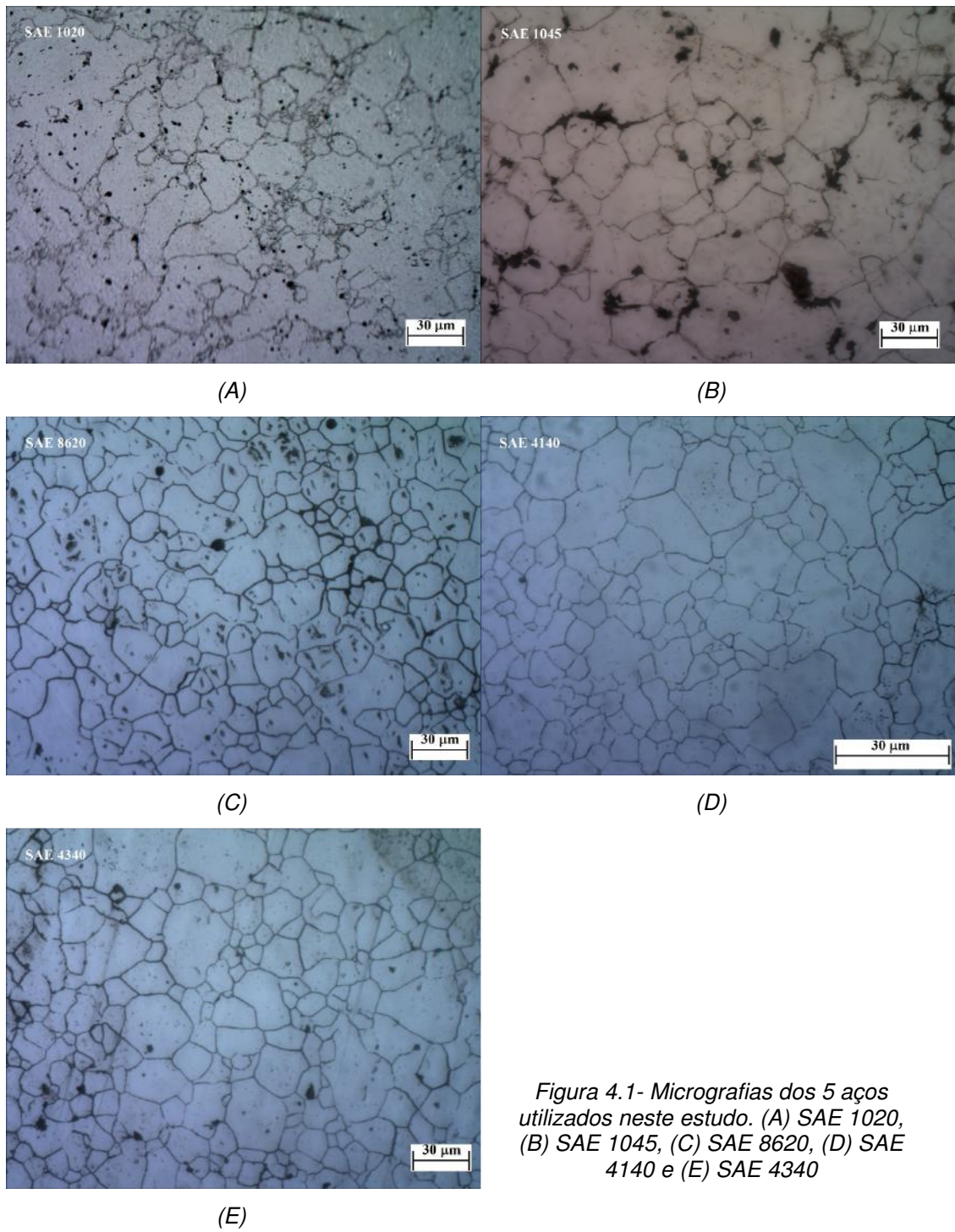


Tabela 4.2- TG_{γ} e $TG_{\gamma}ASTM$ dos aços utilizados neste Trabalho.

	Aço 1020	Aço 1045	Aço 8620	Aço 4140	Aço 4340
Interceptos	18 μm	20 μm	15 μm	7 μm	15 μm
$TG_{\gamma} ASTM$	8-9 (8,24)	7-8 (7,93)	8-9 (8,76)	10-11 (10,96)	8-9 (8,76)

4.1.3 Curvas Jominy

São apresentados na Figura 4.2 as curvas de temperabilidade Jominy para cada um dos aços: SAE 1020, SAE 1045, SAE 8620, SAE4140 e SAE 4340. As curvas são obtidas a partir dos valores de Dureza versus Distância Jominy medidos nas amostras ensaiadas de acordo com a Norma ASTM A255. Aços que obtiveram posições Jominy com HRC abaixo de 20 (que a Norma ASTM A255 exclui) tiveram o trecho abaixo de 20HRC marcado em linha pontilhada. Isto ocorreu no SAE 1020 a partir da posição 3/16” e no SAE 1045 apenas na última posição Jominy.

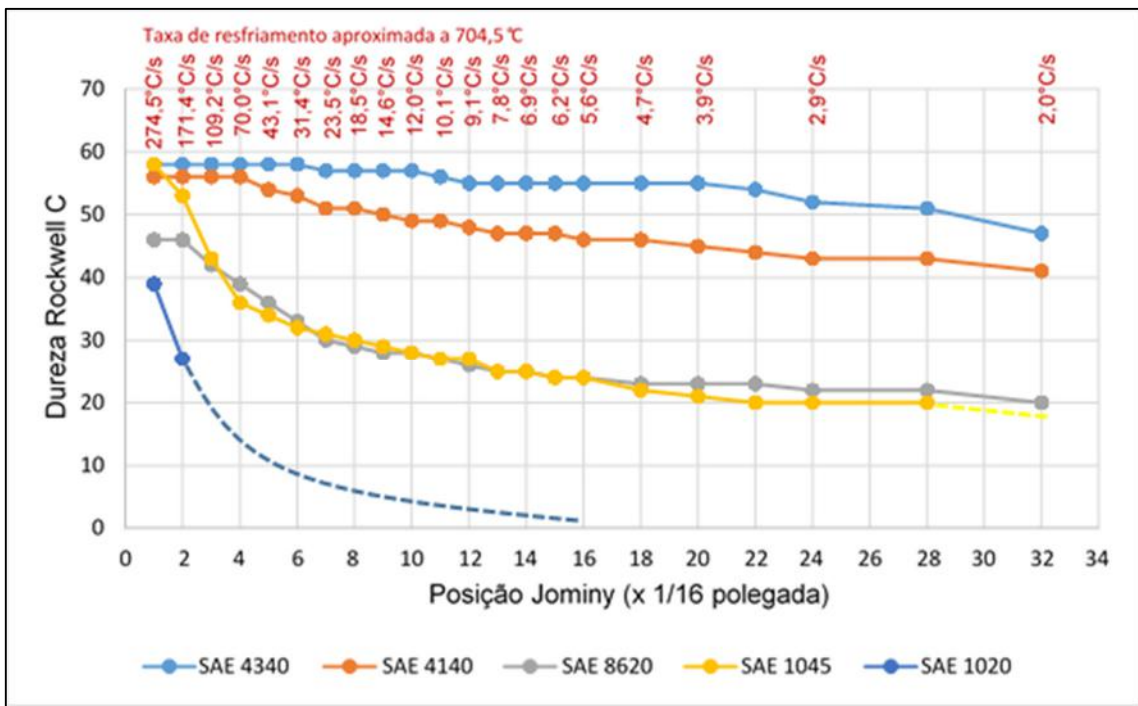


Figura 4.2 – Curvas Jominy obtidas a partir Corpos de Prova de aços tratados de acordo com a Norma ASTM A255

Verifica-se que são bem diferenciados os aços quanto às suas temperabilidades, neste caso representado pela obtenção de máxima dureza e permanência desse valor com o aumento da distância em relação à extremidade temperada.

A seguir serão expostos os resultados comparativos entre os ensaios Jominy experimentais e alguns modelos teóricos criados para simular estes com base na composição química dos aços (o método da Norma ASTM-A255 converte os teores dos aços ao Di destes) e do TG γ ASTM.

4.2 Comparação das Curvas Experimentais e dos Métodos Teóricos

Aço SAE 1020

O resultado do ensaio Jominy experimental do aço SAE 1020 foi comparado à curva do método de Just (e à adaptação ao método de Just), já que sua composição química se enquadra na faixa admissível para este método. O método da Norma ASTM A255 não pôde ser utilizado, pois o D_i mínimo exigido pela Norma é de 1,0", superior ao atingido pelo aço SAE 1020 utilizado (D_i calculado de 0,43"). Os gráficos comparativos e de dispersão de resultados estão apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4.

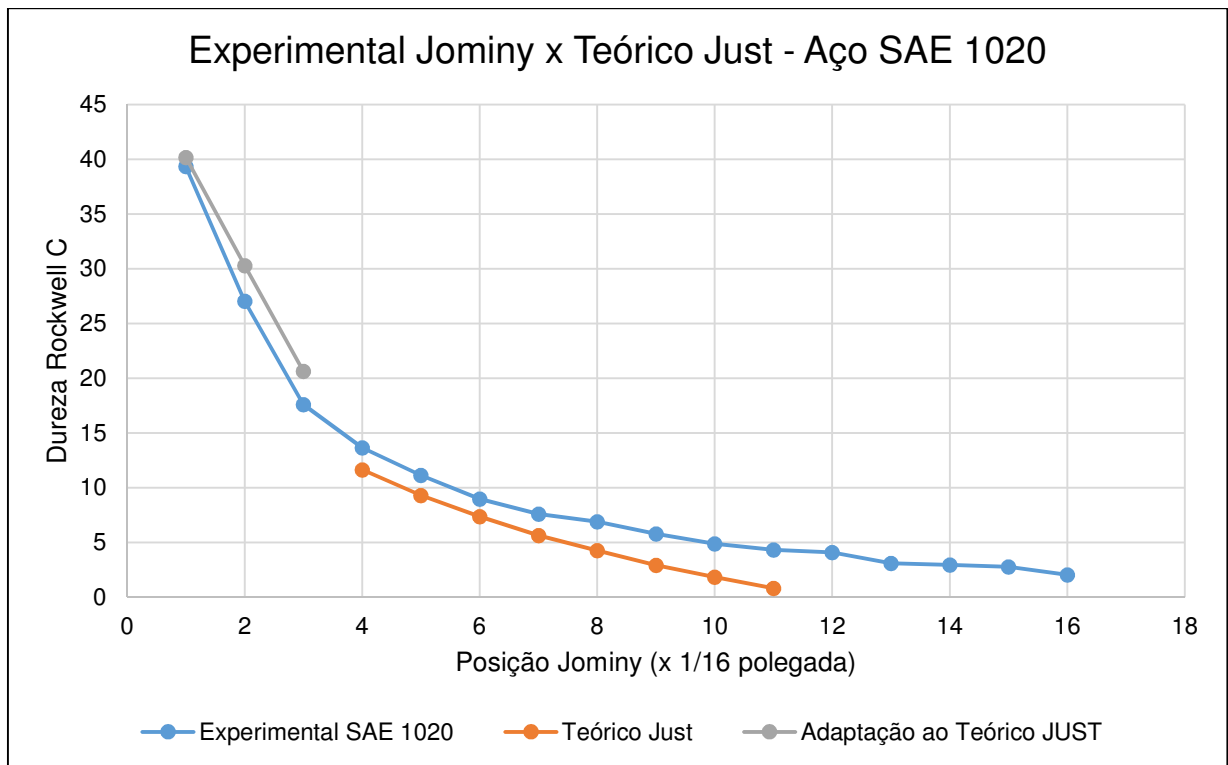


Figura 4.3 – Gráficos Comparativos entre a curva experimental Jominy e o Método Teórico de Just para o aço SAE 1020

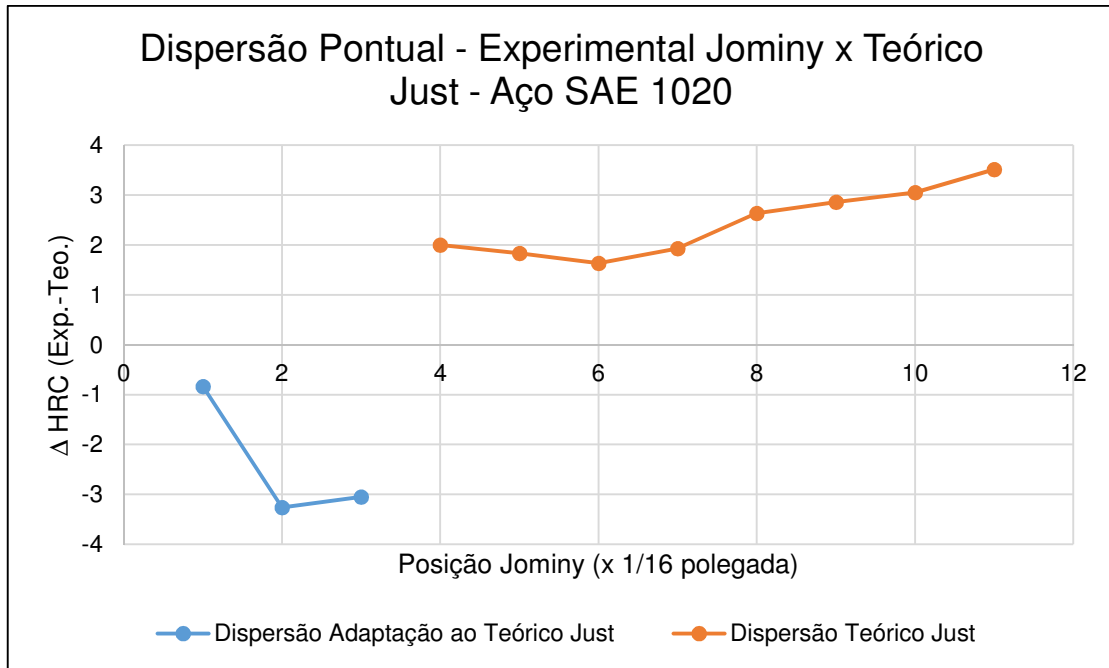


Figura 4.4 – Dispersão Pontual entre o gráfico experimental Jominy do Aço SAE 1020 e o método teórico de Just.

A dispersão residual (S) entre o resultado experimental e o teórico apresentou o valor $S = 2,90$ HRC quando comparado ao método teórico Just (J4 a J11). Quando são adicionados os pontos da adaptação ao método Just, a dispersão residual entre as posições Jominy J1 a J11, o valor de $S = 2,82$ HRC. Nota-se que os pontos adaptados ao método de Just reduziram a dispersão global (residual). Em relação à dispersão pontual, Figura 4.4, nenhum ponto ultrapassou $\Delta HRC > 3,5$ em módulo, o que representa um bom resultado na comparação dos métodos.

SAE 1045

O ensaio Jominy experimental para o Aço SAE 1045 pôde ser comparado tanto em relação ao método teórico de Just quanto ao método da Norma ASTM A255, já que a sua composição química e respectivo D_i calculado (1,13”) se encontram na faixa admissível para ambos os métodos. Os gráficos comparativos das curvas Jominy experimental e as curvas dos métodos teórico de Just e da Norma ASTM 255, e a dispersões desses resultados estão apresentados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7:

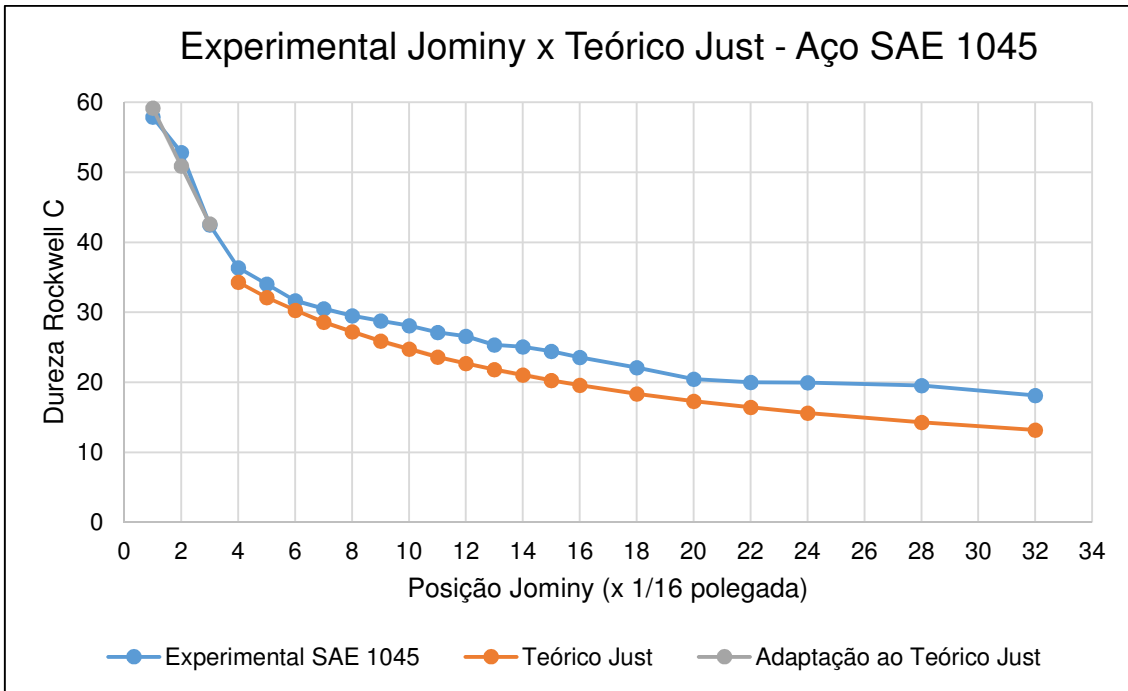


Figura 4.5 - Gráfico Comparativo entre a curva experimental Jominy e o Método Teórico de Just para o aço SAE 1045.

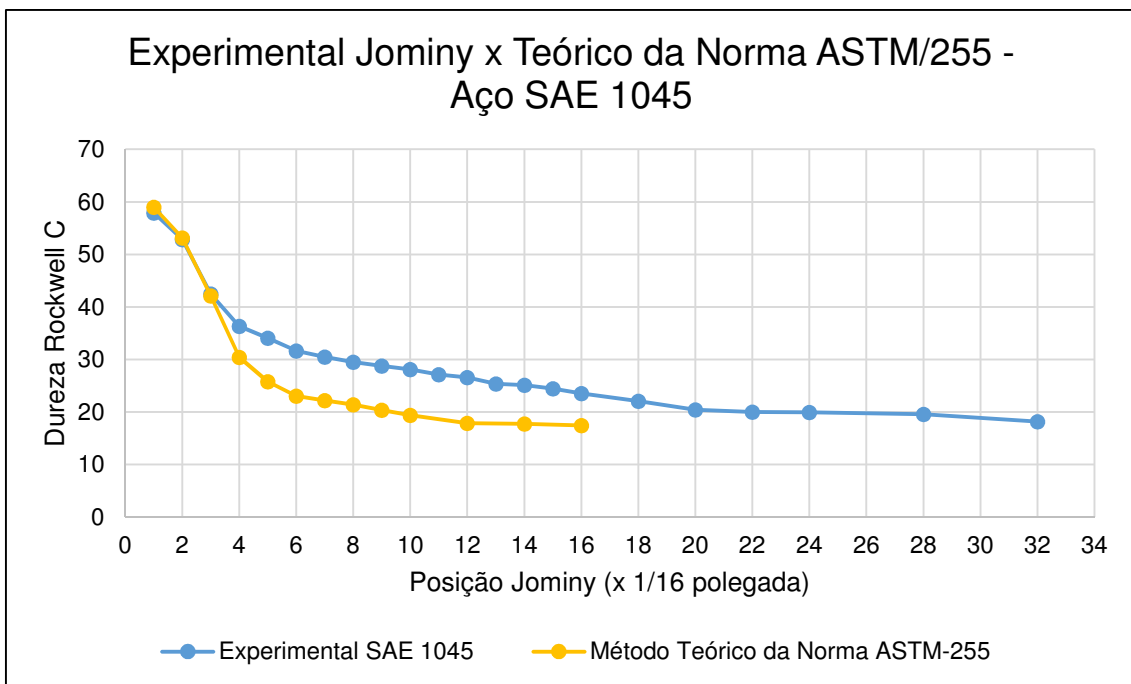


Figura 4.6 - Gráfico Comparativo entre a curva experimental Jominy e o Método Teórico da Norma ASTM A255 para o aço SAE 1045.

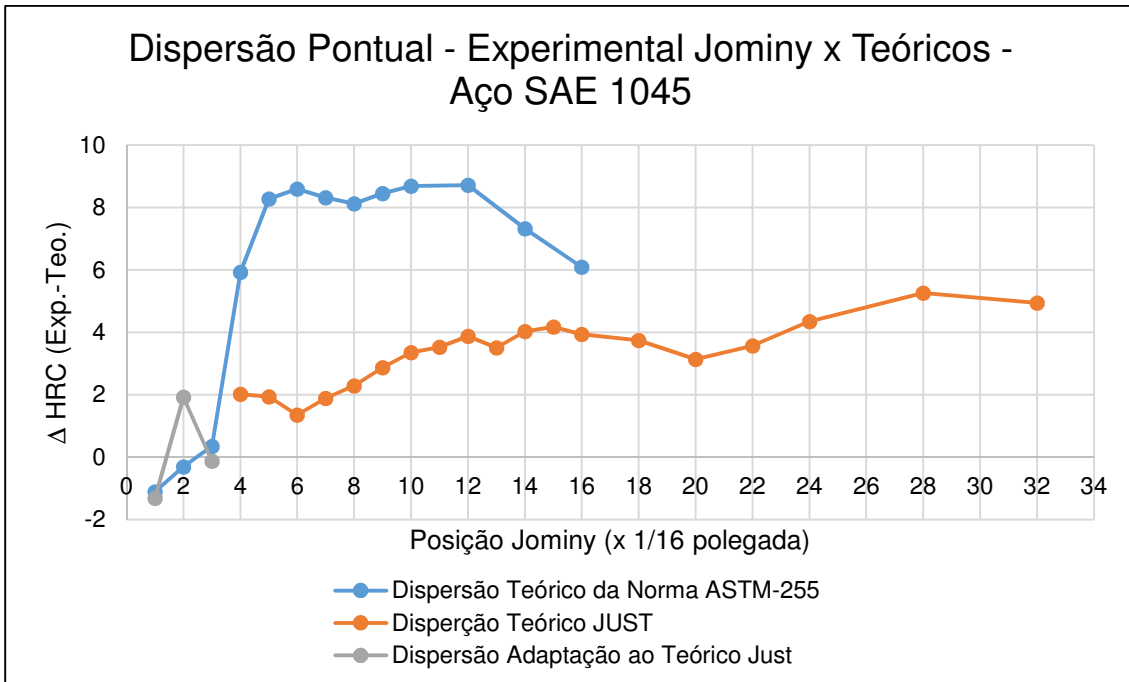


Figura 4.7 – Dispersão Pontual entre o gráfico experimental Jominy do Aço SAE 1045 e os 2 métodos teóricos aos quais foi comparado.

A dispersão residual entre o gráfico experimental para o aço SAE 1045 e o método teórico de Just apresenta valor de $S = 3,72$ HRC. Quando são adicionados os 3 primeiros pontos da adaptação ao método de Just, este valor da dispersão é reduzido: $S = 3,47$ HRC. Ambos os valores considerados bons (pequena dispersão). Apenas os 3 últimos pontos excedem o patamar de 4HRC, chegando a um máximo de 5,27 HRC de dispersão no penúltimo ponto.

Em relação ao método teórico (DI) da Norma ASTM A255, este aço apresentou uma significativa diferença entre os resultados considerando-se a curva experimental e a teórica. As 3 primeiras posições Jominy possuem dispersões próximas de zero, mas a partir da posição J4 todos os pontos possuem dispersão superior a 6 HRC, com um valor máximo de 8,72 HRC na posição J12. A dispersão residual ficou em $S = 7,56$ HRC, valor bastante elevado.

Aço SAE 8620

A curva experimental do ensaio Jominy do aço SAE 8620 foi comparado a 3 métodos teóricos: Just, Norma ASTM-255 e Secante Hiperbólica. A sua composição química se enquadrou ao método de Just e aos coeficientes do modelo da Secante Hiperbólica utilizados neste trabalho, além do que o D_i deste aço foi calculado e apresenta valor de 2,43” (maior do que 1”), o que o torna compatível ao método da

Norma ASTM A255. As curvas Jominy experimental e as dos modelos teóricos estão apresentadas nos gráficos das Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11.

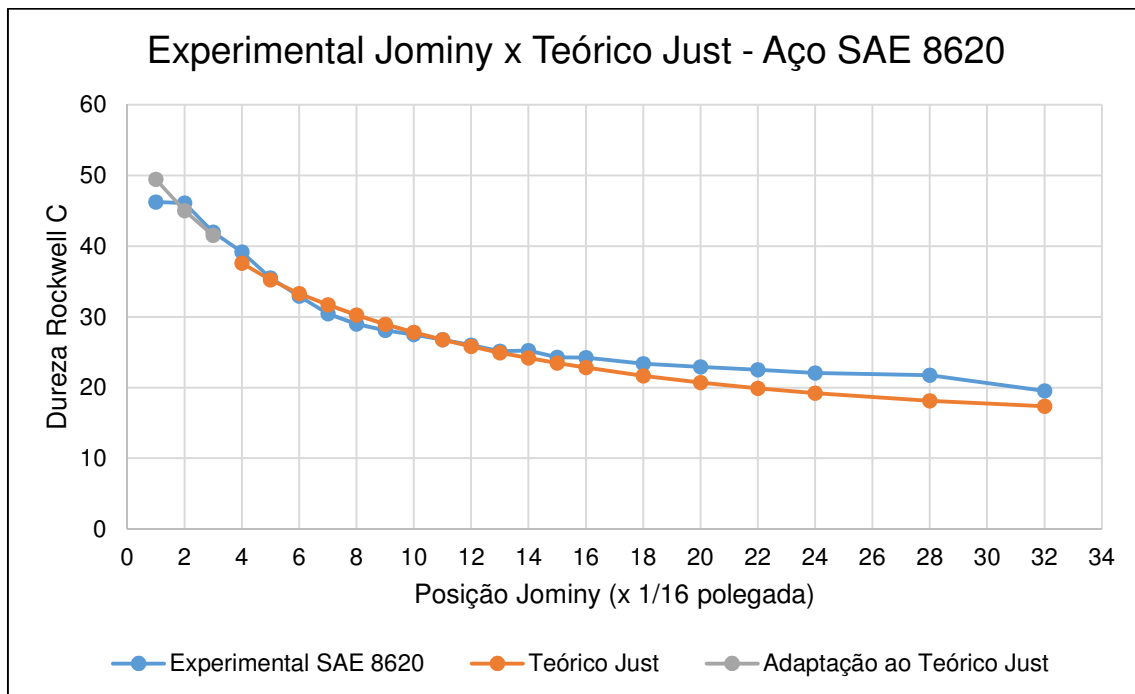


Figura 4.8 - Gráfico Comparativo entre a curva experimental Jominy e o Método Teórico de Just para o aço SAE 8620.

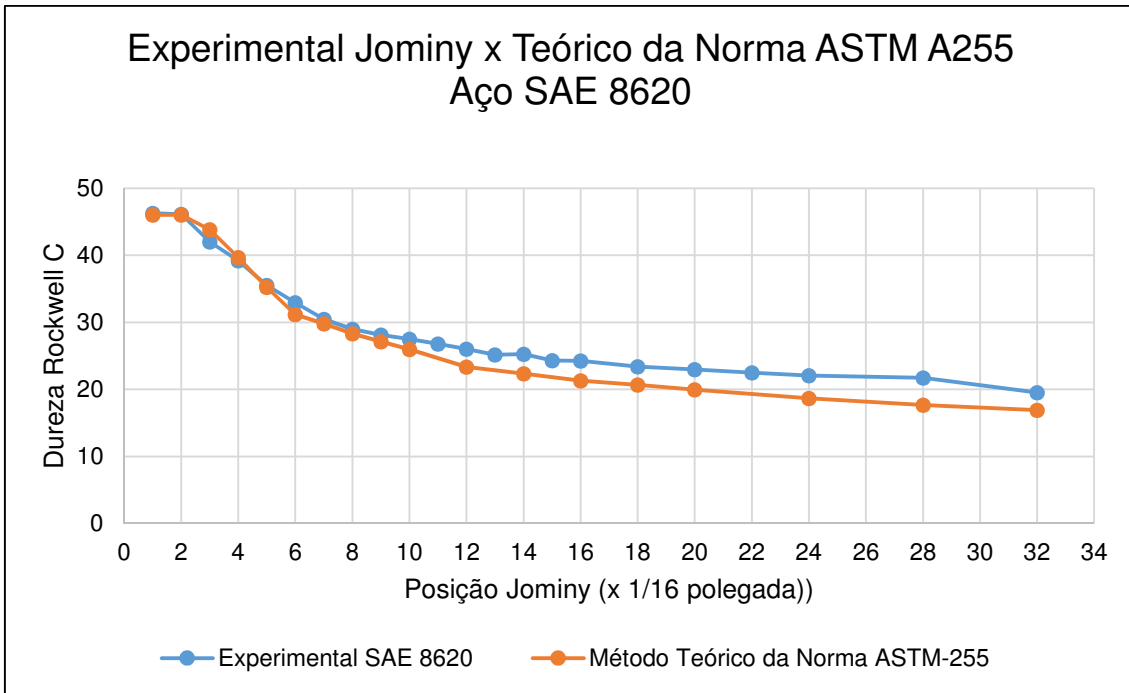


Figura 4.9- Gráfico Comparativo entre a curva experimental Jominy e o Método Teórico da Norma ASTM A255 para o aço SAE 8620

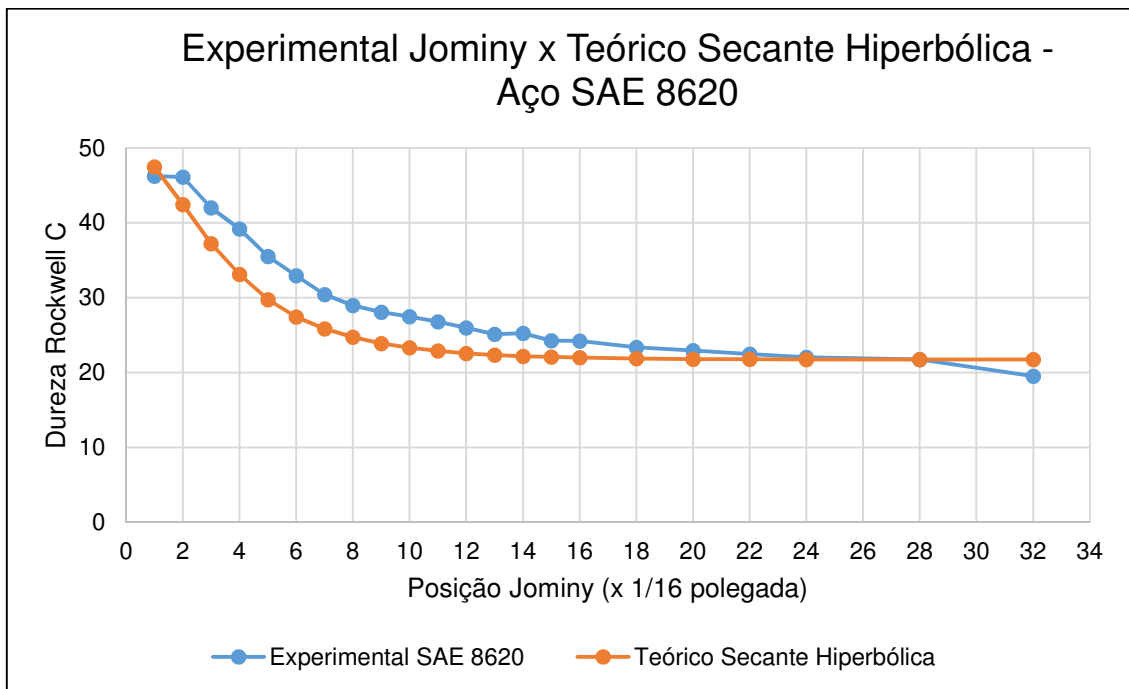


Figura 4.10 - Gráfico Comparativo entre a curva experimental Jominy e o Método Teórico da Secante Hiperbólica para o aço SAE 8620.

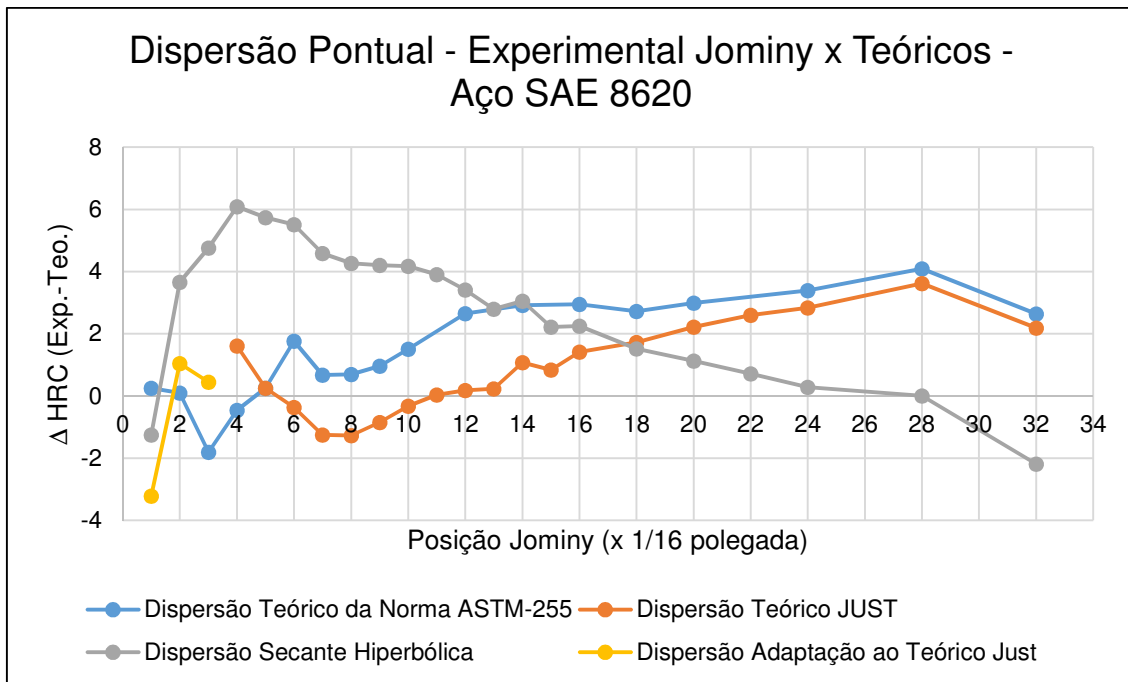


Figura 4.11 - Dispersão Pontual entre o gráfico experimental Jominy do Aço SAE 8620 e os 3 métodos teóricos aos quais foi comparado.

O método teórico de Just obteve uma boa convergência com a curva experimental do aço SAE 8620, com uma dispersão residual $S = 1,74$ HRC. Há um aumento para $S = 1,77$ HRC, quando adicionados os pontos iniciais da curva (método Just Adaptado). A curva relativa ao método teórico da Norma ASTM A255 (Di) apresenta dispersão muito reduzida ($S=2,33$). Para ambos os métodos não são registrados pontos com dispersão superior a 4 HRC.

Em relação ao método da curva da Secante Hiperbólica, com os coeficientes adotados, a dispersão residual alcançou o valor de $S = 3,71$. O valor alcançado pode ser considerando bom, considerando-se que os coeficientes adotados levavam em conta apenas 5 elementos químicos, dois a menos do que no teórico de Just e 3 no caso da norma.

Aço SAE 4140

Os resultados das curvas Jominy experimental foram comparados com as curvas obtidas pelos métodos teóricos de Just e da Norma ASTM A255 (Di). A composição química e o diâmetro ideal deste aço se enquadram nos requisitos desses dois métodos numéricos. Os gráficos para estas análises comparativas e a dispersão dos resultados estão apresentados nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14:

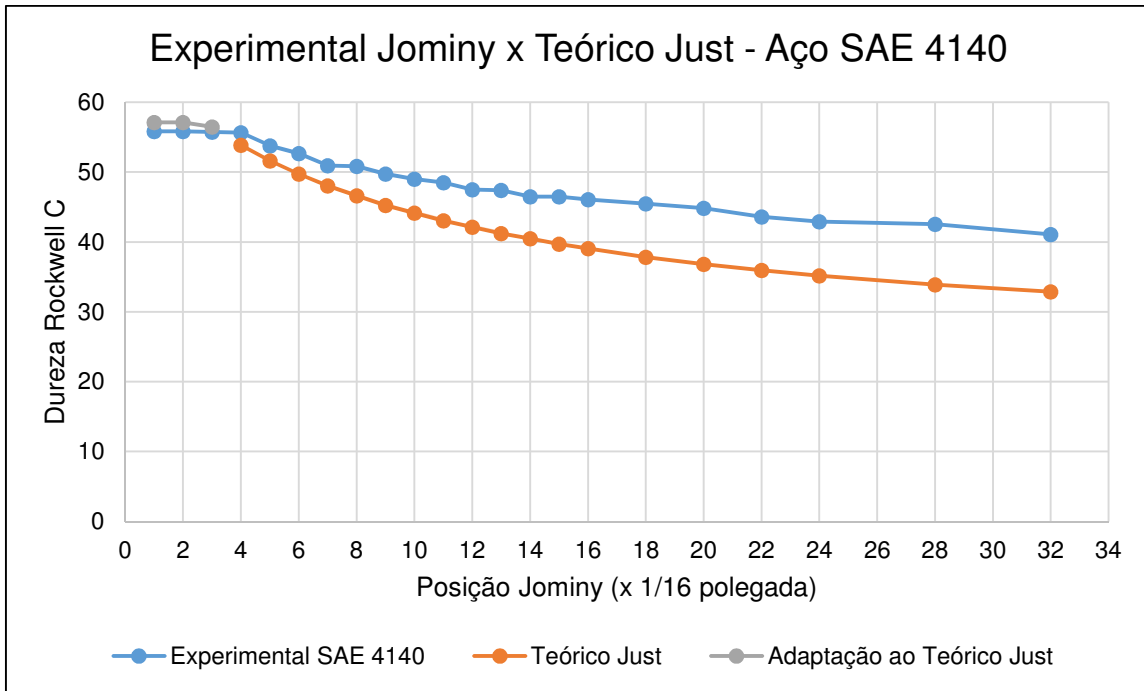


Figura 4.12 - Gráfico Comparativo entre a curva experimental Jominy e o Método Teórico de Just para o aço SAE 4140.

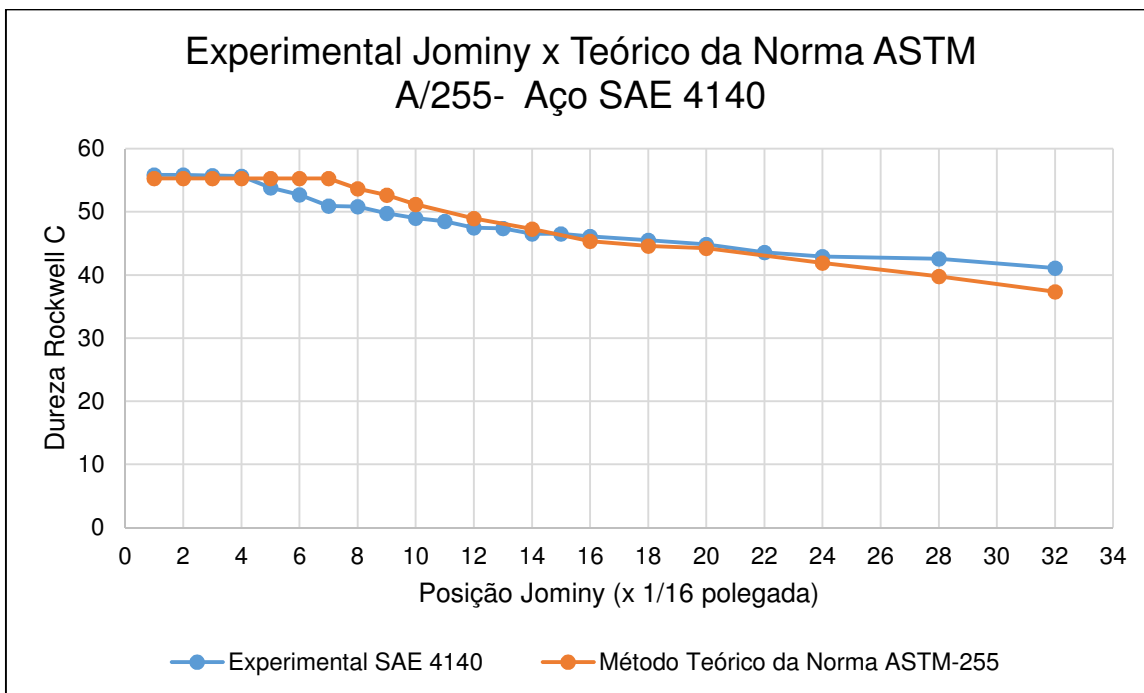


Figura 4.13 - Gráfico Comparativo entre a curva experimental Jominy e o Método Teórico da Norma ASTM A255 para o aço SAE 4140

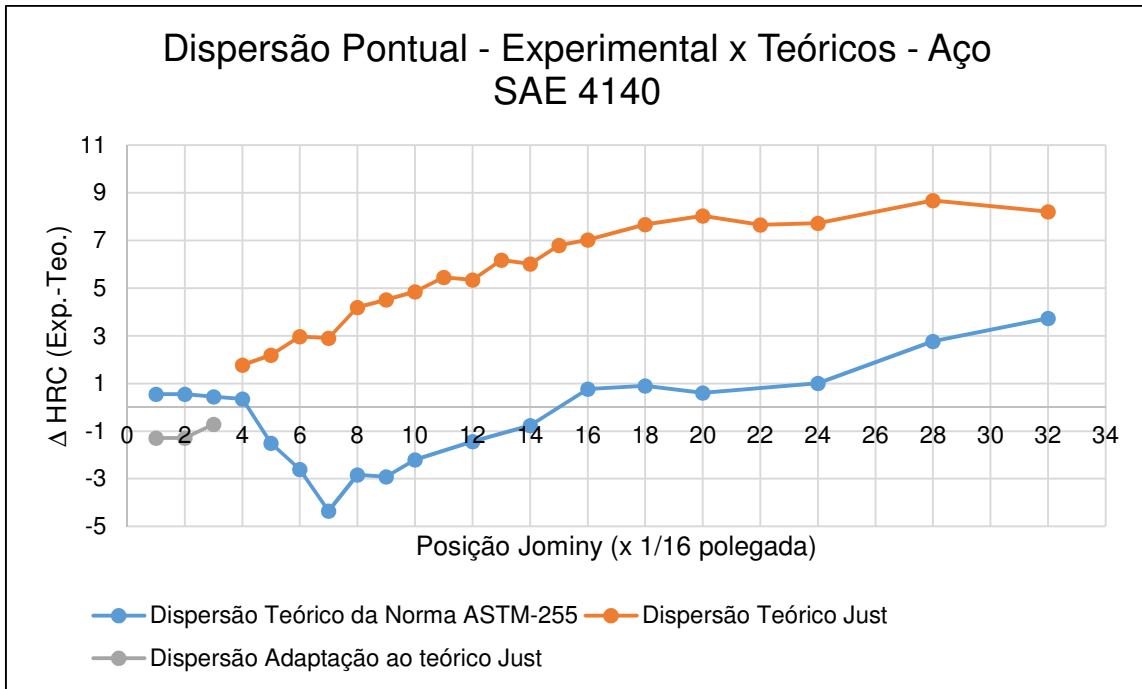


Figura 4.14- Dispersão Pontual entre o gráfico experimental Jominy do Aço SAE 4140 e os 2 métodos teóricos aos quais foi comparado.

A curva do método de Just não se adaptou à curva experimental do aço SAE 4140. A dispersão residual alcançou o valor $S = 6,42$ HRC, bastante alta. Quando é realizado a inserção dos pontos de dureza inicial (adaptação do método de Just), o valor da dispersão S foi reduzido para $5,93$ HRC, mesmo assim bastante alta. Todas as posições Jominy após J8 obtiveram dispersão pontual acima de 4 HRC, chegando a um valor máximo de S da ordem de 9 HRC na posição J28.

Em contrapartida, a curva associada ao método da Norma ASTM A255 obteve resultados consistentes, com o valor de $S = 2,20$ HRC, considerando um valor baixo de dispersão.

SAE 4340

Os resultados do ensaio Jominy experimental do SAE 4340 foi comparado aos métodos teóricos de Just e da Norma ASTM-255. A comparação entre os resultados experimental e teórico estão apresentados nos gráficos das Figuras 4.15, 4.16 e 4.17:

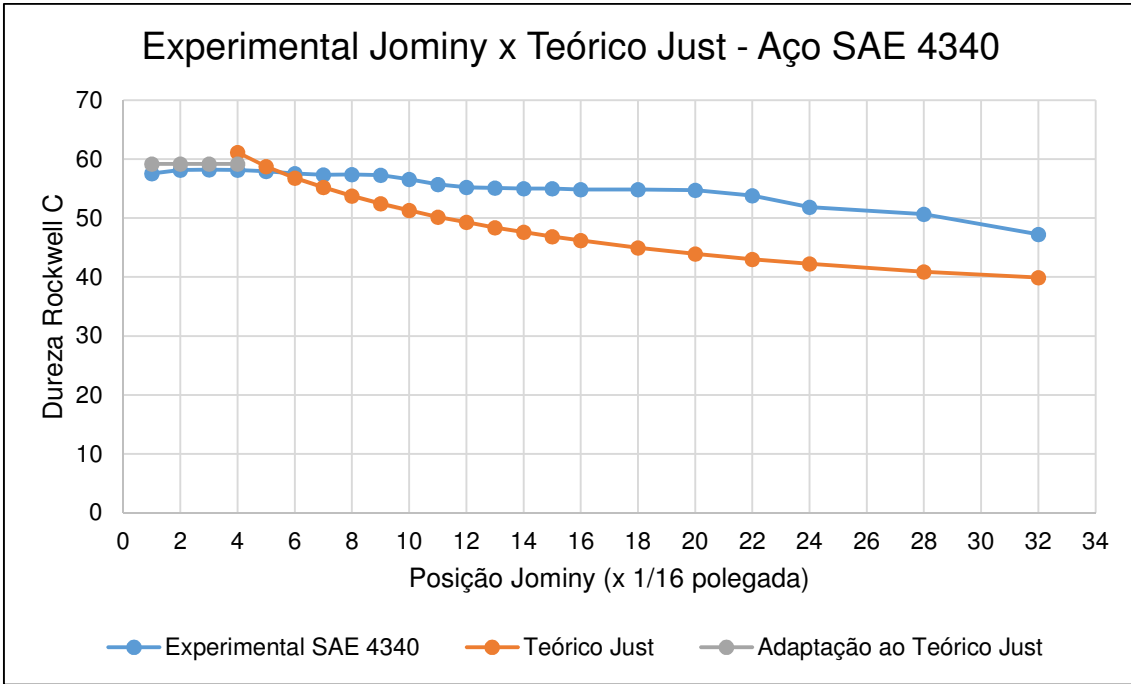


Figura 4.15 - Gráfico Comparativo entre a curva experimental Jominy e o Método Teórico de Just para o aço SAE 4340.

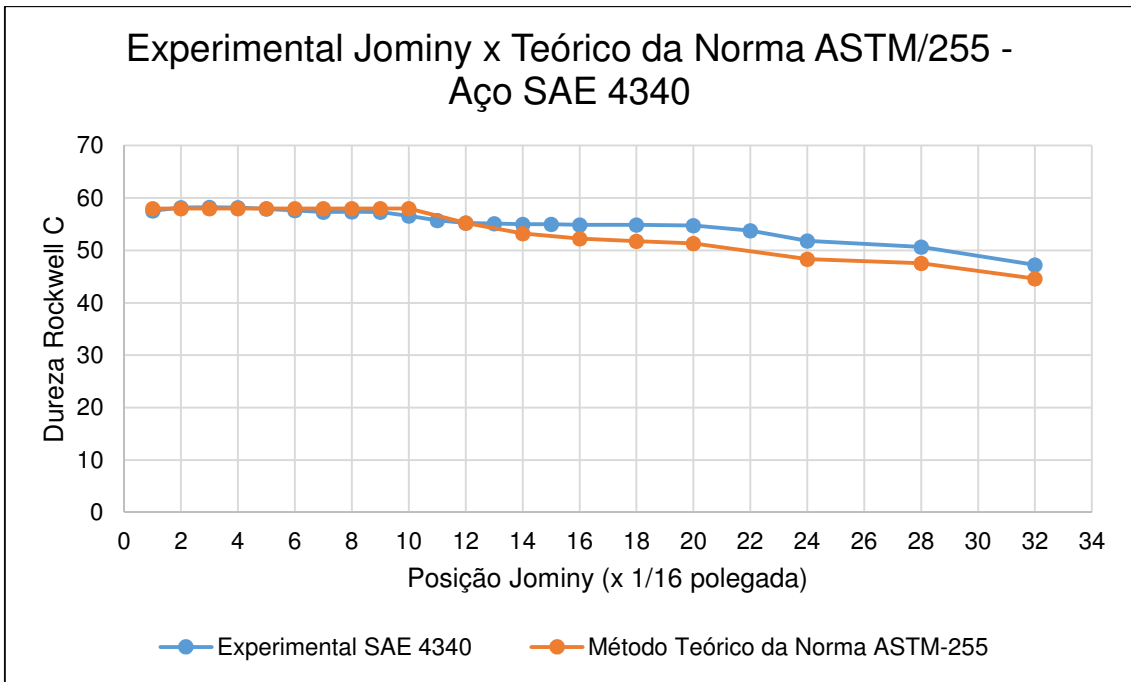


Figura 4.16 - Gráfico Comparativo entre a curva experimental Jominy e o Método Teórico da Norma ASTM A255 para o aço SAE 4340.

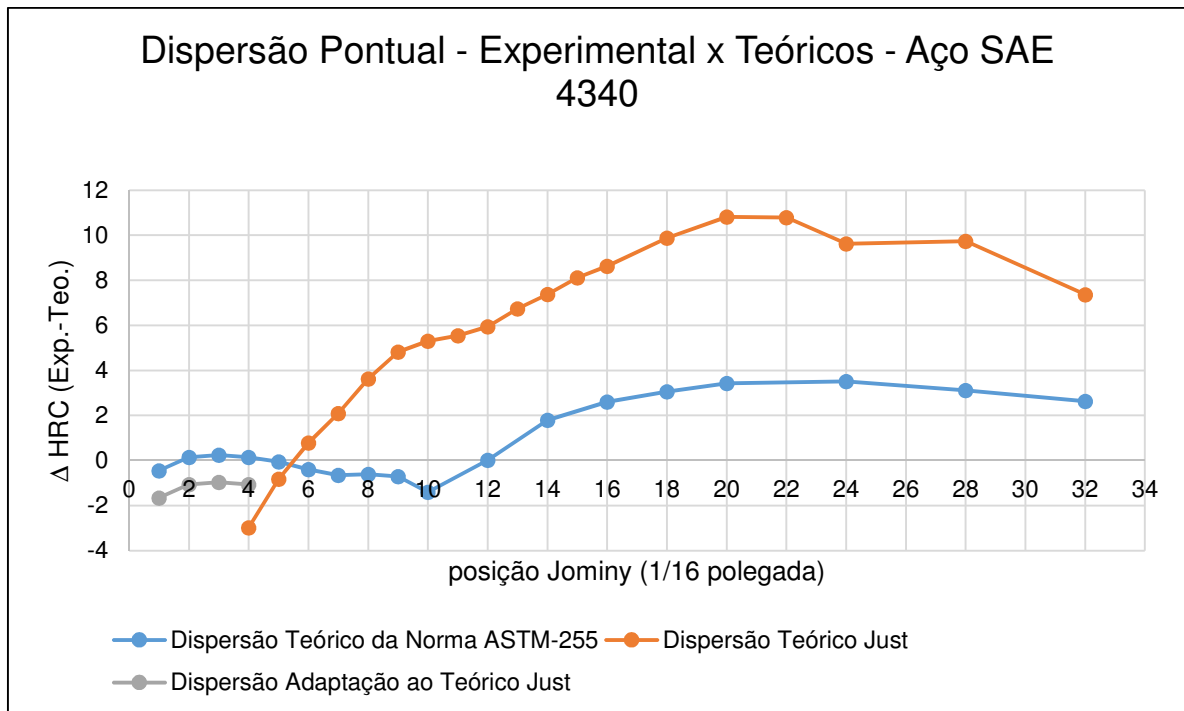


Figura 4.17- Dispersão Pontual entre o gráfico experimental Jominy do Aço SAE 4340 e os 2 métodos teóricos aos quais foi comparado.

No caso do aço SAE 4340 a comparação da curva experimental com aquela do método teórico Just teve o seu pior resultado: $S = 7,50$ HRC. Quando acrescentados os pontos de dureza iniciais (método Just Adaptado) o resultado foi de $S = 6,91$ HRC. A dispersão pontual máxima alcançou o valor de $10,81$ HRC na posição J20. Um resultado considerado sofrível.

Em contrapartida, quando se compara a curva experimental com aquela do método teórico da Norma ASTM A255 verifica-se o valor de $S = 2,00$, e dispersão pontual máxima foi de $3,52$ HRC (posição J24), valores representativos de baixa dispersão na comparação dessas curvas.

4.3 Dispersões Residuais

As dispersões residuais de cada um dos métodos teóricos em relação à curva do ensaio Jominy experimental são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Dispersões Residuais obtidas na comparação do ensaio experimental com o método teórico.

N/A: o método não é aplicável para aquele aço.

	SAE 1020	SAE 1045	SAE 8620	SAE 4140	SAE 4340
JUST	2,90 HRC	3,72 HRC (!!)	1,74 HRC	6,42 HRC	7,50 HRC
JUST Adaptado	2,82 HRC	3,47 HRC (!!)	1,77 HRC	5,93 HRC	6,91 HRC
Secante Hiperbólica	x	x	3,71 HRC	x	x
Norma (DI)	N/A	7,56 HRC (!!)	2,33 HRC	2,20 HRC	2,00 HRC

4.4 Diâmetros Ideais Teóricos Calculados para os 5 Aços.

A Tabela 4.4 apresenta os valores dos Diâmetros Ideais (Di) calculados para cada aço segundo a composição química dos aços (Tabela 4.1), seguindo as determinações da Norma ASTM-A255 e considerando-se o Tamanho de Grão Médio γ ASTM = 7.

Tabela 4.4 – DI teórico calculado com base nas composições químicas, levando em conta $TG\gamma_{ASTM}=7$

	SAE 1020	SAE 1045	SAE 8620	SAE 4140	SAE 4340
DI para $TG\gamma=7$	0,43"	1,13"	2,54"	5,48"	6,21"

4.5 Posição Calculada da distância Jominy para a ocorrência de 50% de Martensita (50% M) – Norma ASTM A255.

A Tabela 4.5 apresenta a posição Jominy (em múltiplos de 1/16"), em que ocorre o valor esperado de 50% de Martensita, segundo a Norma ASTM-255, considerando-se o Tamanho de Grão Médio ASTM = 7.

Tabela 4.5 – Posição Jominy aproximada onde ocorre o mínimo de 50% de Martensita, considerando-se $TG\gamma_{ASTM}=7$

	SAE 1020	SAE 1045	SAE 8620	SAE 4140	SAE 4340
J 50% M para $TG\gamma_{ASTM}=7$	<J1	J2-J3	J6-J7	J22-J23	J30-J31

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Curvas de Temperabilidade Jominy Experimental

A partir da Figura 4.2 observa-se que a ordem decrescente de temperabilidade se dá de acordo com a lista dos aços que se segue: SAE 4340, SAE 4140, SAE 8620, SAE 1045 e SAE 1020.

Os aços SAE 4340 e 4140 apresentam patamares de máxima dureza da ordem de 57 HRC até as distâncias J4 e J6 respectivamente, e os menores valores de dureza (40-48 HRC) estão na extremidade final da amostra (J32). Portanto, a diferença máxima de dureza entre as extremidades da amostra (distâncias Jominy J1-J32) está na faixa de 10 HRC. Verifica-se uma ligeira queda nos valores de dureza para o aço SAE 4140, com uma diferença para menos na faixa de 5-7 HRC para este aço no intervalo J5-J32.

Esta temperabilidade destacada dos aços SAE 4340 e 4140 (patamares de valores de dureza elevados com a distância Jominy) está relacionada com o teor de Carbono (0,4%) e à presença de elementos de liga desses aços, que promovem um deslocamento do cotovelo das transformações Austenita → Ferrita/ Perlita para tempos mais longos nos seus diagramas TTT (Figura 2.4). Assim, as transformações Austenita → Martensita (e Bainita) são garantidas, mesmo para os menores valores de velocidades de resfriamento ao longo do corpo de prova Jominy (associadas aos maiores valores da distância Jominy).

O aço SAE 1045 apresenta a máxima dureza (57 HRC) na sua extremidade (J1), bem próximo aos valores observados para os aços SAE 4340 e SAE 4140, mas há um rápido decréscimo da dureza com o aumento da distância Jominy. A curva Jominy desse aço apresenta claramente a inflexão correspondente à formação de 50% de Martensita próximo ao ponto J(2-3), decrescendo sua dureza rapidamente a partir desse ponto para alcançar valores da ordem de 20 HRC, na forma de um patamar inferior dos valores de dureza (J16-J32). O valor máximo de dureza está associado ao seu teor de Carbono (0,45%), na mesma faixa dos teores dos aços SAE 4340 e 4140 (0,39-0,42%). Essa dureza é associada à dureza da Martensita, que depende apenas do teor de C. A ausência de elementos de liga nesse aço desloca o cotovelo da transformação Austenita → Ferrita / Perlita para a esquerda no seu diagrama de TTT, diminuindo portanto a sua temperabilidade.

O aço SAE 8620 apresenta a máxima dureza na extremidade J1, alcançando valor da ordem de 45 HRC, com um patamar pequeno que se estende até a posição J2. A partir daí, a curva Jominy desse aço rapidamente se aproxima da curva do aço SAE 1045 a partir do ponto J3. O menor valor de dureza na extremidade (J1) é explicado pelo menor teor de Carbono deste aço (0,24%). Entretanto, não apresenta uma queda muito acentuada na dureza com o aumento da distância Jominy devido à presença de elementos de liga desse aço, levando a uma curva Jominy comparável aquela do aço de maior teor de Carbono mas sem elementos de liga (SAE 1045). O ponto de inflexão no gráfico Jominy do SAE 8620 claramente se situa próximo aos pontos J(4-6).

Industrialmente, o aço SAE 8620, de menor teor de C mas com elementos de liga, é destinado à fabricação de peças que vão ser submetidas a tratamentos de carbonetação / cementação – aumento do teor de Carbono na superfície da amostra por métodos difusionais (termoquímicos). Assim, o aumento do teor de carbono, localmente, juntamente com os elementos de liga presentes no material, vão conferir nessa camada carbonetada uma maior temperabilidade (aumento do teor de C + elementos de liga), fazendo com que a dureza na superfície da peça, após os tratamentos térmicos de cementação e têmpera, alcance valores elevados, mesmo quando utilizados meios brandos de têmpera, enquanto que no núcleo da peça as durezas se situem em valores mais baixos. Por outro lado, antes da cementação, esse aço apresenta baixa dureza quando são utilizados meios de resfriamento brando após a austenitização dos tarugos, o que favorece a usinagem das peças (a usinagem dos aços é mais fácil e rápida quando os valores de dureza são mais baixos). Assim, só é alcançada a dureza desejada na peça após os tratamentos térmicos de cementação e têmpera final.

O aço SAE 1020 apresenta baixo valor de dureza (40 HRC) na sua extremidade (J1) caindo rapidamente para o valor da ordem de 27 HRC (J2). A partir desta distância os valores na escala de dureza HRC caem para valores abaixo de HRC 20, e de acordo com a Norma ASTM A255 não devem ser apresentados neste gráfico. Essa baixíssima temperabilidade desse aço se explica pelo baixo teor de C (0,2%) e ausência de elementos de liga. Mesmo para velocidade de resfriamento muito elevada (extremidade J1) não é possível a obtenção de uma quantidade significativa de Martensita. Isso se explica pelo deslocamento do cotovelo relativo à transformação Austenita → Ferrita / Perlita para a esquerda no diagrama TTT desse aço devido ao baixo teor de C e ausência de elementos de liga, não permitindo que ocorra uma quantidade significativa de transformação da Austenita em Martensita.

5.2 Curvas Jominy Experimental e Curvas Teóricas - Métodos de Just e Di (ASTM A255): Análises das Diferenças Relativas

Os resultados obtidos neste trabalho, com as dispersões residuais apresentadas na Tabela 4.3, indicam uma tendência: para valores mais elevados de diâmetro ideal (D_i) o método teórico da Norma ASTM A255 apresentou resultados bastante homogêneos e com baixa dispersão residual. Verifica-se que isso ocorre para os aços SAE 8620 ($S=2,33$ HRC), SAE 4140 ($S=2,20$ HRC) e SAE 4340 ($S=2,00$ HRC). Mesmo com TG γ ASTM mais refinados, como os obtidos nos aços em estudo (TG-ASTM entre 9 e 11), quando comparado com o valor da Norma ($ASTM=7$), a convergência entre as curvas foi considerável. A maior dispersão pontual foi de 4,25 HRC (na posição Jominy J7) no aço SAE 4140. Esta diferença poderá estar associada à diferença entre os valores dos TG γ ASTM: 11 no aço da curva experimental e 7 na curva teórica). Mesmo neste caso o resultado global da dispersão foi bem pequena: $S = 2,20$ HRC. O aço SAE 1020 não pôde ser analisado a partir do método da Norma ASTM 255, já que possui diâmetro ideal menor do que 1 polegada.

De maneira contrária aos bons resultados de convergência entre as curvas experimentais e aquelas obtidas pelo método da norma ASTM 255, as curvas obtidas pelo método de Just obteve melhores resultados de convergência para os 3 aços com D_i mais baixo (SAE 1020, 1045 e 8620). No caso do aço SAE 8620, que apresenta a melhor aproximação entre a curva teórica e curva experimental dentre os aços deste trabalho, a dispersão apresenta valor $S = 1,74$ HRC. No caso do aço SAE 1020 também foi obtida uma dispersão residual bem pequena ($S = 2,90$). Vale ressaltar que para o caso do aço SAE 1020, só há 2 pontos válidos de acordo com o critério da Norma ASTM A255 (dureza acima de HRC 20).

A adaptação que foi feita ao método de Just, para definir as posições Jominy abaixo de J4, mostrou-se bastante eficaz para os 5 aços analisados neste trabalho. A dispersão pontual máxima ficou em 3 HRC para todos os aços. Assim, de acordo com os resultados obtidos neste trabalho, verifica-se que:

- Para aços com D_i abaixo de 2,54", a convergência das curvas Jominy experimentais e as curvas obtidas pelo modelo de Just foi significativa, com ressalvas para o aço SAE 1045, o qual será analisado em tópico específico.
- Para aços com D_i acima de 2,54", inclusive, a convergência das curvas experimentais com aquelas obtidas a partir do modelo teórico da Norma ASTM A255 foi excelente.

Essa convergência, que leva a uma melhor aproximação entre as curvas experimentais e aquelas teóricas, apresenta-se melhor com o aumento do diâmetro ideal do aço (D_i).

Observe-se que no caso dos 3 aços de maior temperabilidade (SAE 8620, 4140 e 4340) os valores dos $TG\gamma$ ASTM se situavam entre 9 e 11 (a Norma ASTM A255 estabelece o $TG\gamma$ ASTM em 7). Mesmo com essa diferença, verifica-se que os gráficos experimentais e teóricos convergiram. Para casos em que o $TG\gamma$ ASTM se situa fora desta faixa, é prudente analisar em detalhes o efeito do tamanho de grão γ sobre o comportamento das curvas de temperabilidade Jominy.

5.3 Efeitos do $TG\gamma$

O aumento do $TG\gamma$ (grãos grosseiros) retarda o início das transformações difusionais da Austenita, deslocando a cotovelo dos gráficos TTT/CCT para a direita, e assim favorecendo a transformação da Austenita em Martensita. Portanto, quando o tamanho de grão austenítico diminui ($TG\gamma$ ASTM aumenta), o valor do temperabilidade do aço, representado pelo parâmetro Diâmetro Ideal, tende a cair.

Este efeito é evidenciado nos resultados relativos ao aço SAE 4140 ($TG\gamma$ ASTM=11), o maior valor observado entre as amostras dos aços estudados neste trabalho, e assim aquele que apresentou valor de grão austenítico mais refinado. Na comparação entre o gráfico experimental e o gráfico teórico da Norma ASTM A255, baseado no DI, que considera $TG\gamma$ ASTM=7, o gráfico experimental diminui do seu valor de patamar superior (100% M), em comparação com a curva teórica, numa extensão de 3 distâncias Jominy (3/16"), como apresentado na Figura 4.13.

A dispersão pontual relativa às distâncias Jominy maiores atinge um valor máximo em torno de 4 HRC na posição J7, ou seja: a quantidade relativa de Martensita diminui lentamente nesta faixa de distâncias. Com o aumento da distância Jominy os dois gráficos convergem, ficando com dispersões pontuais inferiores a 2 HRC, somente aumento para os 2 últimos pontos Jominy, onde novamente as diferenças se aproximam de 4 HRC. O gráfico experimental apresenta valores de dureza levemente superiores a partir da posição Jominy J16 até o seu final (Figura 4.13).

A dispersão residual total de 2,20 HRC entre os dois gráficos (muito pequena) deve ser ressaltada, mesmo havendo diferença de tamanho de grão médio $TG\gamma$ ASTM de 4 unidades (11 no gráfico experimental e 7 no gráfico da Norma baseado no DI).

A aparente independência do resultado da dispersão residual em relação a grande variação de TG_{γ} pode ser creditada à alta temperabilidade do aço SAE 4140 conferida pelos elementos de liga presentes nesse aço. Isto pode ser verificado a partir da posição do ponto de inflexão da curva Jominy, associada à presença de 50% de Martensita (considerando-se TG_{γ} ASTM 7): 22/16", conforme apresentado na Tabela 4.5. Ou seja, mesmo na parte final da curva Jominy (distâncias associadas às baixas velocidades de resfriamento) forma-se 50 % de Martensita. Do ponto de vista do uso da curva Jominy associada à presença da Martensita como uma garantia da máxima dureza de uma peça deste aço, é possível afirmar que, mesmo para as velocidades mais baixas de resfriamento associadas às maiores distâncias Jominy, há garantias de elevadas quantidades dessa fase, mesmo quando o tamanho de grão austenítico do aço seja refinado.

Os resultados deste trabalho parecem indicar que no caso dos aços de elevada temperabilidade (SAE 4340 e 4140) o efeito do tamanho de grão da austenita exerce um papel secundário em relação aquele dos elementos de ligas, como evidenciado no valor de dispersão entre as curvas experimentais e teóricas. No caso dos aços de baixa temperabilidade (que pode ser associado aqueles aços de menores valores de D_i), predomina o ramo da curva de dureza decrescente com a distância, o que caracteriza uma diminuição da quantidade relativa de Martensita e o predomínio das demais fases (Bainita, Perlita e Ferrita). Para estas fases, a diminuição do tamanho de grão da Austenita resulta em refino de grão da fase transformada, que por sua vez está associado ao aumento dos valores de dureza (Equação de Hall-Petch). Assim, os tamanhos de grão mais finos (curvas experimentais – TG_{γ} ASTM 9-11) tenderiam a apresentar valores mais elevados quando comparados com aqueles das curvas teóricas, em que o TG da Austenita adotado é maior (ASTM 7), resultando em maiores dispersões entre as curvas experimental e teórica.

5.4 Dispersão dos Resultados

A Tabela 4.3 indica que para os aços que apresentam maiores valores de D_i (SAE 8620, 4140 e 4340) as curvas numéricas obtidas a partir desse parâmetro são aquelas que registraram menores valores de dispersão na comparação com as curvas experimentais (métodos da Norma ASTM A255), mesmo que os tamanhos de grão dos aços temperados (TG_{γ} ASTM 9-11) sejam diferentes daqueles adotados pelo método numérico (TG_{γ} ASTM = 7): SAE 8620 ($S=2,33$ HRC), SAE 4140 ($S=2,20$ HRC) e SAE 4340 ($S=2,00$ HRC). A maior dispersão pontual foi registrada para o aço SAE 4340 na posição J7: 4,25 HRC. A maior dispersão residual ($S = 7,56$) foi verificado para o aço

SAE 1045. O aço SAE 1020 não pode ser analisado pelo método numérico da Norma, tendo em vista que o seu $D_i < 1,0$ polegada.

Quando são analisados os valores de dispersão considerando-se as curvas experimentais e aquelas do método de Just, os melhores resultados são para os aços que apresentam valores de D_i mais baixos - SAE 1020, SAE 1045 e SAE 8620. Respectivamente: $S = 2,90$ e $3,72$. No caso do aço SAE 8620, o valor de $S = 1,74$, melhor inclusive comparativamente ao valor de dispersão obtido pelo método de D_i . Merece registro o fato de que a proposição feita nesse trabalho (Just Adaptado) para a determinação de durezas abaixo de J4 apresentou-se eficaz: a dispersão pontual máxima verificada para todos os 5 aços alcançou o valor máximo de 3 HRc. Portanto, os dados indicam que para os aços com D_i abaixo de 25,4mm (baixa temperabilidade), a convergência das curvas experimental e teórica, considerando-se o método de Just, apresenta-se boa. Para os aços com valores de D_i acima de 25,4mm (alta temperabilidade) as melhores aproximações com a curva experimental se deram quando adotado o método numérico proposto na norma ASTM A255. É de se notar que essas convergências ocorreram mesmo que os tamanhos de grão dos aços utilizados nas curvas experimentais foram menores (ASTM γ 9-11) que os grãos adotados nos métodos numéricos (ASTM γ 7).

Método da Secante Hiperbólica

Os gráficos obtidos a partir do modelo da Secante Hiperbólica são calculados a partir de 4 coeficientes: A, B, C e D, os quais dependem dos teores dos elementos de liga e do $TG\gamma$ ASTM. Cada um dos parâmetros tem a sua associação com a curva como se segue: A = patamar superior (dureza máxima); B = contorno final, ou amplitude do gráfico (dureza máxima menos a dureza mínima observada); C = posição do ponto de inflexão (associado a 50% de Martensita) e D = curvatura no ponto de inflexão. Considerando-se as equações associadas a estes parâmetros (Tabela 2.2), tem-se:

- A dureza máxima só depende do teor de Carbono
- Cr, Mo, Mn, Si, Ni diminuem a amplitude, gerando durezas finais mais elevadas.
- Cr, Mo, Mn, Si, Ni atrasam a ocorrência do ponto de inflexão
- Cr, Mo, Mn, Si, Ni diminuem o nível de curvatura no ponto de inflexão
- O $TG\gamma$ ASTM mais refinado (número maior desse parâmetro) diminui a amplitude.

É de destaque o fato de que os coeficientes do modelo da Secante Hiperbólica utilizados neste trabalho consideram 5 elementos químicos além do Carbono: Cr, Mo, Mn, Si e Ni. O modelo teórico da Norma ASTM A255 (Di), utiliza 8 elementos químicos e o modelo de Just 7 elementos químicos.

Com relação ao coeficiente associado ao $TG\gamma$ ASTM: -1,72, verifica-se que para cada aumento de uma unidade do número ASTM (refinamento de grão), a amplitude do gráfico diminui 1,72 (HRC). No caso do aço SAE 8620 utilizado neste trabalho, que tem grão ASTM 9, a posição Jominy J32 possuiria um valor 3,44 HRC mais elevado em relação aquele para o $TG\gamma$ ASTM 7 da Norma (Di = 2,4”). Este efeito do tamanho de grão austenítico para um aço de menor temperabilidade (SAE 8620) está apresentado nos gráficos abaixo: curvas Jominy baseadas em grão γ ASTM 7 e 9, e sua dispersão pontual.

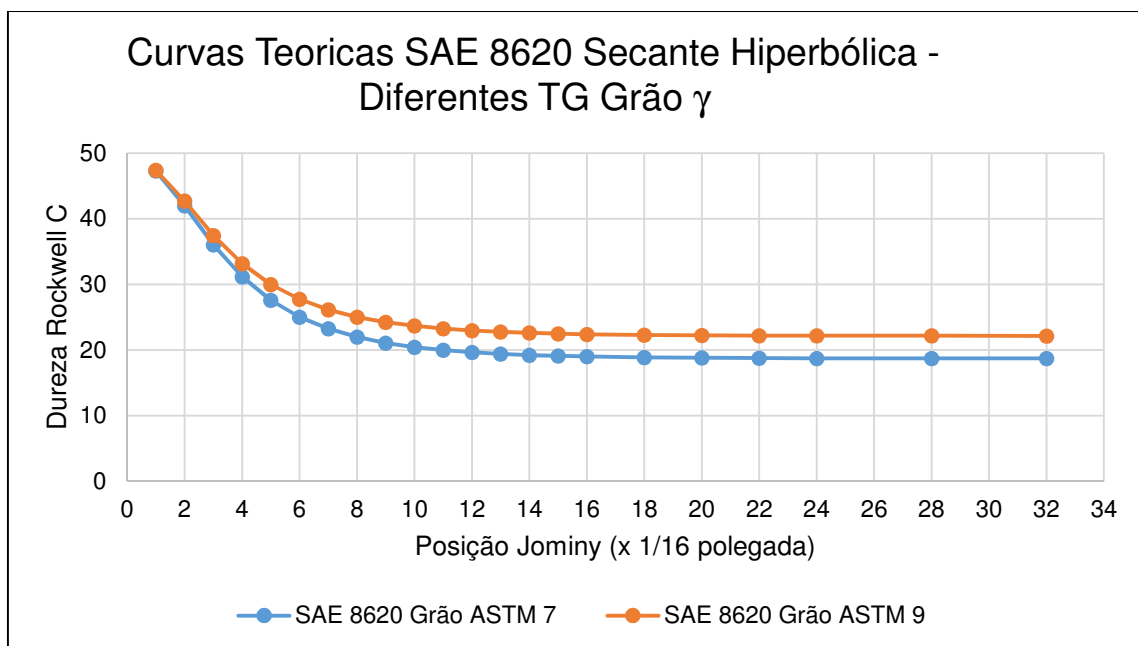


Figura 5.1 – Gráfico teóricos do aço SAE 8620, pelo método da Secante Hiperbólica para dois valores do $TG\gamma$.

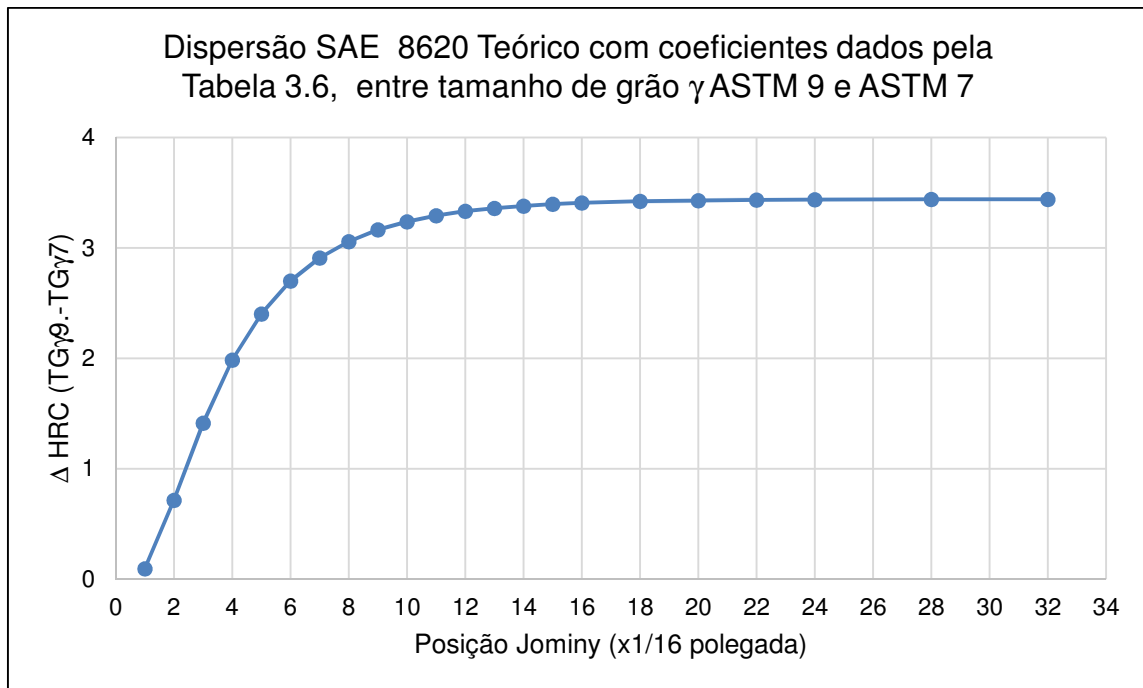


Figura 5.2 – Dispersão entre os gráficos teóricos do Aço SAE 8620 por Secante Hiperbólica: TG γ ASTM 7 e 9.

Os gráficos acima nos mostram que, para aços menos temperáveis, o tamanho de grão mais refinado eleva o trecho final da curva.

A contribuição dos coeficientes de gráficos de Secante Hiperbólica (valor máximo de dureza, amplitude, posição e grau de inclinação do ponto de inflexão) levam a uma discussão sobre a contribuição dos elementos químicos e TG γ na constituição das curvas Jominy. Foi considerado como exemplo o aço SAE 8620. Verifica-se que, mesmo utilizando a contribuição de 5 elementos de liga (e do TG γ ASTM), obteve-se uma boa aproximação com a curva experimental: dispersão residual $S = 3,71$ HRC.

Outro aspecto a ser considerado no uso dos gráficos de Secante Hiperbólica (SH): é possível traçar a curva da SH que melhor se aproxime do gráfico da curva Jominy experimental, determinando os coeficientes desse ajuste. A partir desses resultados (coeficientes associados - Tabela 5.1) pode ser verificado o efeito dos elementos químicos e do TG austenítico na temperabilidade. Os gráficos da Figura 5.3 apresentam as curvas Jominy para os cinco aços deste estudo levantadas a partir das equações de Secante Hiperbólica, com ajuste dos coeficientes de modo a produzir uma dispersão $S \approx 1$ HRC.

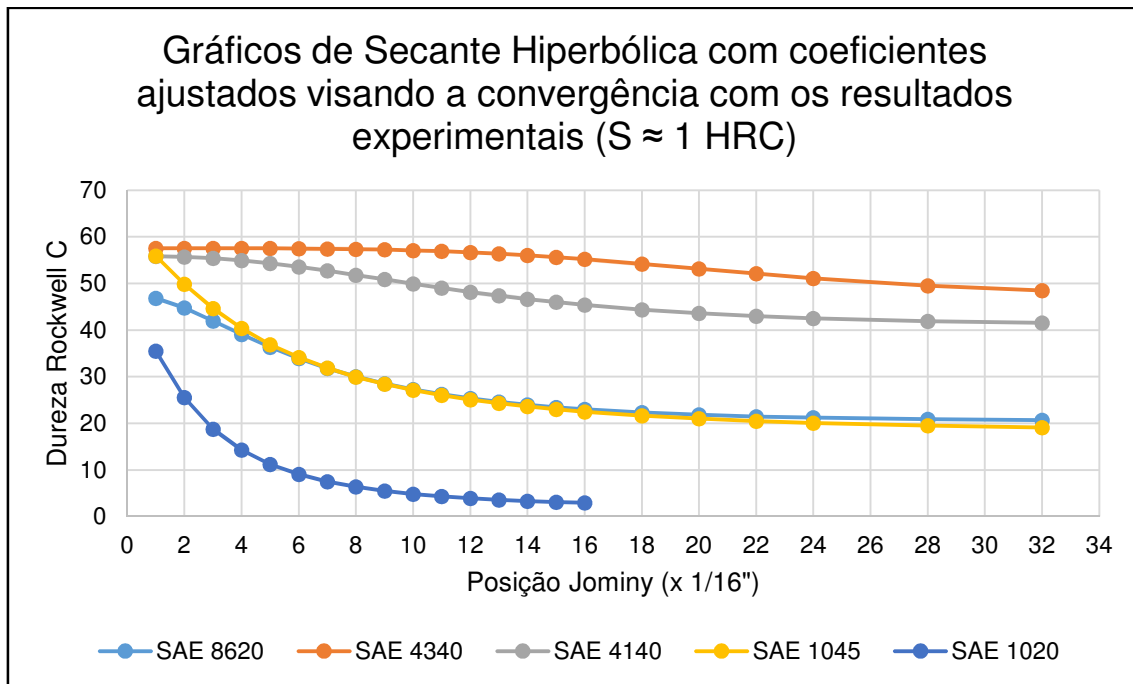


Figura 5.3 – Curvas para os 5 ensaios Jominy descritos por equações da Secante Hiperbólica

Estes resultados foram obtidos fazendo-se uso de uma planilha de cálculos. Isso é obtido a partir de valores atribuídos aos coeficientes das equações (parâmetros A, B, C e D) e estabelecendo-se a dispersão residual desejada / esperada: a Equação 2.1 (Tabela 2.1) define A, ou para aços de maior temperabilidade, a posição J1. A dureza máxima menos J32 definem B, a amplitude. Os coeficientes C e D atuam sobre a posição do ponto de inflexão e o ângulo de inclinação da curva naquele ponto. Atribuindo-se o valor inicial de 0,5 para cada coeficiente, e considerando-se que um número maior antecipa o ponto de inflexão (Em relação ao ângulo de inflexão, o efeito é contrário), pode-se começar o ajuste. Com pequenos incrementos, é analisado o comportamento do gráfico e a dispersão residual entre as curvas (teórica e experimental) controlando-se o ajuste até o desejado. As funções que descrevem os 5 ensaios Jominy deste trabalho são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1– Equações de ajuste para os ensaios Jominy experimentais, com dispersão $S \approx 1$ HRC

$HRCXXXX(J) = (A - B) + B * \{sech[C * (J - 1)^D]\}$, onde J é a posição Jominy em mm	
$HRC1020(J) = 2,05 + 37,3 * \{sech[0,65 * (J - 1)^{0,6}]\}$	(Equação 5.1)
$HRC1045(J) = 18,15 + 39,75 * \{sech[0,441 * (J - 1)^{0,59}]\}$	(Equação 5.2)
$HRC8620(J) = 20,433 + 26,7 * \{sech[0,235 * (J - 1)^{0,8}]\}$	(Equação 5.3)
$HRC4140(J) = 41,1 + 14,75 * \{sech[0,055 * (J - 1)^{1,11}]\}$	(Equação 5.4)
$HRC4340(J) = 47,25 + 10,3 * \{sech[0,0021 * (J - 1)^{1,842}]\}$	(Equação 5.5)
OBS.: $0 < J < 50,8$ mm. Para o SAE1020 $0 < J < 25,4$ mm. Para aços com pontos de inflexão além de 2" o campo de leituras Jominy deve ser estendido para que o ensaio possa ser descrito por equações deste tipo.	

As equações da Tabela 5.1 fornecem informações importantes: (i) o coeficiente C apresenta a sequência de temperabilidade experimental dos aços utilizados neste trabalho: SAE 4340 > SAE 4140 > SAE 8620 > SAE 1045 > SAE 1020; (ii) a sequência dos valores do coeficiente D (inflexão) também pode ser apresentado: SAE 4340 < SAE 4140 < SAE 8620 < SAE 1045 = SAE 1020; é possível determinar o ponto de inflexão das curvas a partir da sua segunda derivada.

5.5 O Aço SAE 1045 – Análise da Dispersão de Resultados

Verifica-se que a dispersão residual para os aços SAE 1020, 8620, 4140 e 4340 ficou abaixo de $S = 3$ HRC. Entretanto, para o aço SAE 1045, o melhor resultado foi $S = 3,71$, e no caso do método da Norma ASTM A255, para este aço obteve-se uma dispersão de $S = 7,56$, bem superior quando comparado com os demais aços. Esse crescimento da dispersão se torna significativo considerando-se que a Norma ASTM A255 utiliza como referência $TG \gamma_{ASTM} = 7$, e os aços SAE 4340, 4140 e 8620, que utilizamos possuem $TG \gamma_{ASTM}$ na faixa de 9 – 11, apresentando resultados de S na faixa de 2 HRC. O aço SAE 1045 utilizado neste trabalho possui o maior $TG \gamma$ comparativamente aos demais aços desse estudo, $TG \gamma_{ASTM} = 7-8$. Portanto, é aquele que mais se aproxima do valor de tamanho de grão da Norma ($TG \gamma_{ASTM} = 7$).

Quando as análises são realizadas tomando-se como referência o método de Just o aço SAE 1045 apresenta o valor de $S = 3,71$, que é superior àquele obtido para o aço SAE 8620 ($S = 1,74$). É importante ressaltar que o método de Just apresentou uma melhor aproximação no caso dos aços de menor temperabilidade (Di menores). No entanto, no caso do aço SAE 1045 o ajuste não foi tão bom quanto no SAE 1020 e SAE 8620.

No caso da comparação aos métodos teóricos, uma explicação para a discrepância poderia ser o maior refino de grão, principalmente pelo fato do aço SAE 1045 ser pouco temperável e a norma utilizar grão ASTM $\gamma = 7$. O modelo de Just computa o fator de tamanho de grão apenas para o patamar superior, que no caso deste aço é pequeno.

Uma outra possível explicação desse comportamento do aço SAE 1045 se refere à presença de Boro na composição química do aço utilizado nesses estudos. O aço SAE 1045 utilizado apresenta teor de B = 0,0007%. Apesar deste valor muito baixo, a literatura considera que valores dessa ordem devam ser levados em conta, tendo em vista o aumento de temperabilidade causado por este elemento químico (CHIAVERINI, 1977). No entanto, o boro, para ser eficaz no endurecimento, deve estar em solução sólida, livre, e não associado a outros elementos. O aço SAE 8620 deste trabalho possui níveis de boro similar ao aço SAE 1045, mas a probabilidade do boro se encontrar livre em aços com maior percentagem de elementos de liga é bem menor. Assim, o efeito do boro neste aço SAE 8620 é menos evidente quando comparado com o aço SAE 1045, sem elementos de liga. Os gráficos da Figura 5.4 mostram a comparação das curvas obtidas pelo método da Norma ASTM A255 considerando este aço com e sem boro, e a curva experimental do aço SAE 1045.

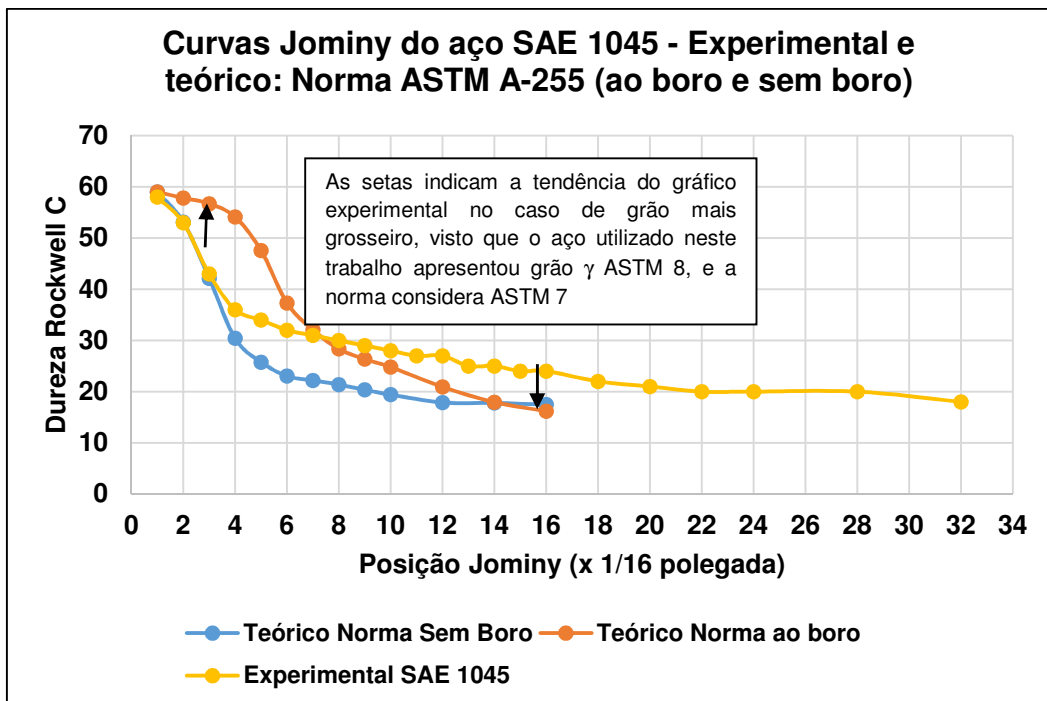


Figura 5.4 – Comparativo entre o teórico da Norma ASTM A255 ao boro e sem boro e o gráfico experimental Jominy do aço SAE 1045

Deve-se observar que a posição Jominy para 50% de Martensita no aço SAE 1045 para $TG\gamma$ ASTM 7 é próxima a posição J2. Com o aumento do $TG\gamma$ do aço SAE 1045, parte final do gráfico experimental deverá apresentar valores mais baixos de dureza, aproximando-se do gráfico teórico da Norma para os aços ao Boro.

6 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que, de modo geral, foi possível obter curvas teóricas que se aproximam dos valores das curvas Jominy experimental. Este fato pode ser comprovado por baixo valores do parâmetro S, relativo à dispersão de resultados entre as duas curvas para cada aço.

O método numérico baseado na Norma ASTM A255 apresentou resultados bastante consistentes na aproximação entre as curvas teóricas e experimentais para os aços de valores de Di mais elevados (maior temperabilidade), com dispersão da ordem de $S = 2$. Já o método de Just logrou melhor êxito nos aços com Di mais baixo. A dispersão residual máxima para este método é da ordem de $S = 2,82 / 3,47$ HRC. O caso de menor dispersão está associado ao aço SAE 8620: $S = 174$ HRC.

O método da Secante Hiperbólica foi utilizado somente na análise do aço SAE 8620, obtendo um bom resultado: $S = 3,71$. Os coeficientes utilizados neste trabalho computam os teores de 5 elementos químicos e o $TG\gamma$, um número inferior quando comparado com os demais métodos: método teóricos de Just utiliza 7 e a Norma ASTM A255 usa 8 elementos químicos. Os gráficos de Secante Hiperbólica apresentam um potencial promissor, tendo em vista que os 4 coeficientes desta equação possuem representação distinta e bem definidas na construção das curvas, permitindo assim uma análise bem detalhada dos efeitos dos elementos químicos e do tamanho de grão da configuração da curva Jominy teórica.

Para a maioria das necessidades da indústria, o uso dos métodos teóricos utilizados neste trabalho, para a obtenção das curvas Jominy são promissores, tendo em vista a análise dos resultados verificados na comparação entre as curvas experimentais e teóricas, que utilizou uma faixa ampla de temperabilidades.

Deve-se ressaltar que aproximações melhores podem ser obtidas, com o método da secante hiperbólica, por exemplo, desenvolvendo-se coeficientes para uma determinada faixa de composição e tamanho de grão, através de pesquisas utilizando regressão linear de resultados Jominy experimentais.

BIBLIOGRAFIA

ABBASCHIAN, R.; ABBASCHIAN, L.; Reed-Hill, R. E., Physical Metallurgy Principles, 4th Ed., Ed. Cengage, p. 606-621, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Metals Handbook, vols. 1,2 e 8, 8^a Ed., 1961.

BROOKS, C. E., Principles of the heat treatment of plain carbon and low alloy steels, Ed. ASM Int., p.43-86, 1966.

CALLISTER JR., WILLIAM D., Materials Science and Engineering, An Introduction, John Wiley & Sons, Inc., 4^a Ed., 1997.

CHIAVERINI, V., Aços e Ferros Fundidos, ABM, 4^o Ed., 1977.

HOEMBERG, D., A Numerical Simulation of the Jominy End Quench Test, 1996

KNAP, M.; FALKUS, J.; ROZMAN, A.; LAMUT, J., Hardenability Prediction Based on Chemical Composition of Steel, RMZ Materials and Geoenvironment, Vol. 56, No. 2, pp. 108-117, 2009

NORMA ASTM A255, American Society for Testing Materials, 2010.

NORMA ASTM E112, American Society for Testing Materials, 2013.

NORMA ASTM A914/A914M, American Society for Testing Materials, 2011

NORMA ASTM A304, American Society for Testing Materials, 2011

SMITH, WILLIAM F., Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais, McGraw-Hill, 3^a Ed., 1998

TARTAGLIA, J.M.; ELDIS, G.T.; GEISSLER, J.J., Hyperbolic Secant Method for Predicting Jominy Hardenability: an Example using 0,2C Ni-Cr-Mo Alloys, Journal of Heat treating, vol.4, 1986

THELNING, K.E., Steel and its heat treatment, 2nd Ed., Editora B.H, p. 144-206, 2000

TOTTEN, GEORGE E., Steel Heat Treatment Handbook, Taylor & Francis Group, 2^a Ed., 2007

ANEXO A – Dados de dureza HRC obtidos nos Ensaios Jominy

Tabela A 1 – SAE 1020

1/16 pol.	Medida1		Medida2		Média das medidas	
	Posição (mm)	HRC	Posição (mm)	HRC	Posição (mm)	HRC
1	1,54	39,70	1,59	39,00	1,57	39,35
2	3,28	26,10	3,07	28,00	3,18	27,05
3	4,82	16,90	4,78	18,30	4,80	17,60
4	6,35	13,80	6,26	13,50	6,31	13,65
5	7,98	10,30	7,87	12,00	7,93	11,15
6	9,59	9,80	9,49	8,20	9,54	9,00
7	11,15	7,30	11,20	7,90	11,18	7,60
8	12,71	6,90	12,71	6,90	12,71	6,90
9	14,40	5,50	14,30	6,10	14,35	5,80
10	15,93	5,00	15,80	4,80	15,87	4,90
11	17,48	4,30	17,37	4,40	17,43	4,35
12	19,02	4,10	19,08	4,10	19,05	4,10
13	20,63	2,20	20,72	4,00	20,68	3,10
14	22,13	2,00	22,21	3,90	22,17	2,95
15	23,75	2,10	23,76	3,50	23,76	2,80
16	25,31	1,10	25,49	3,00	25,40	2,05

Tabela A 2 – SAE 1045

1/16 pol.	Medida1		Medida2		Média das medidas	
	Posição (mm)	HRC	Posição (mm)	HRC	Posição (mm)	HRC
1	1,68	57,50	1,69	58,30	1,69	57,90
2	3,26	51,70	3,23	54,00	3,25	52,85
3	4,85	41,00	4,79	44,00	4,82	42,50
4	6,44	35,50	6,43	37,20	6,44	36,35
5	8,03	33,10	7,96	35,00	8,00	34,05
6	9,60	30,20	9,53	33,10	9,57	31,65
7	11,20	29,40	11,20	31,60	11,20	30,50
8	12,80	28,20	12,68	30,80	12,74	29,50
9	14,38	27,80	14,23	29,80	14,31	28,80
10	15,98	26,70	15,80	29,50	15,89	28,10
11	17,55	26,00	17,52	28,30	17,54	27,15
12	19,10	25,50	18,95	27,70	19,03	26,60
13	20,70	24,00	20,59	26,70	20,65	25,35
14	22,29	23,50	22,15	26,70	22,22	25,10
15	23,90	23,10	23,79	25,80	23,85	24,45
16	25,45	22,80	25,45	24,30	25,45	23,55
18	28,67	20,70	28,65	23,50	28,66	22,10
20	31,82	18,00	31,78	22,90	31,80	20,45
22	35,00	17,30	34,90	22,70	34,95	20,00
24	38,19	17,10	38,14	22,80	38,17	19,95
28	44,54	18,10	44,45	21,00	44,50	19,55
32	50,89	16,10	50,76	20,20	50,83	18,15

Tabela A 3 – SAE 8620

1/16 pol.	Medida1		Medida2		Média das medidas	
	Posição (mm)	HRC	Posição (mm)	HRC	Posição (mm)	HRC
1	1,53	45,50	1,54	47,00	1,54	46,25
2	3,20	44,30	3,26	47,90	3,23	46,10
3	4,72	41,00	4,83	43,00	4,78	42,00
4	6,27	37,20	6,26	41,20	6,27	39,20
5	7,85	33,80	7,98	37,20	7,92	35,50
6	9,53	31,10	9,47	34,80	9,50	32,95
7	11,07	29,00	11,02	31,90	11,05	30,45
8	12,63	27,50	12,63	30,50	12,63	29,00
9	14,20	27,20	14,21	29,00	14,21	28,10
10	15,77	26,50	15,78	28,50	15,78	27,50
11	17,37	26,70	17,36	26,90	17,37	26,80
12	18,95	25,30	18,97	26,70	18,96	26,00
13	20,62	25,00	20,67	25,30	20,65	25,15
14	22,15	24,50	22,19	26,00	22,17	25,25
15	23,78	24,10	23,76	24,50	23,77	24,30
16	25,34	24,80	25,30	23,70	25,32	24,25
18	28,50	23,70	28,58	23,10	28,54	23,40
20	31,65	22,80	31,69	23,10	31,67	22,95
22	34,89	23,00	34,87	22,00	34,88	22,50
24	38,05	22,00	38,00	22,10	38,03	22,05
28	44,36	22,50	44,44	21,00	44,40	21,75
32	50,73	19,00	50,72	20,10	50,73	19,55

Tabela A 4 – SAE 4140

1/16 pol.	Medida1		Medida2		Média das medidas	
	Posição (mm)	HRC	Posição (mm)	HRC	Posição (mm)	HRC
1	1,66	55,00	1,68	56,70	1,67	55,85
2	3,25	55,00	3,24	56,70	3,25	55,85
3	4,85	55,00	4,83	56,50	4,84	55,75
4	6,29	54,80	6,45	56,50	6,37	55,65
5	7,97	53,60	7,95	54,00	7,96	53,80
6	9,62	51,90	9,45	53,50	9,54	52,70
7	11,15	49,70	11,08	52,20	11,12	50,95
8	12,66	49,10	12,65	52,60	12,66	50,85
9	14,29	49,00	14,38	50,50	14,34	49,75
10	15,82	48,50	15,86	49,50	15,84	49,00
11	17,53	47,90	17,46	49,10	17,50	48,50
12	18,99	46,30	18,95	48,70	18,97	47,50
13	20,69	46,40	20,68	48,40	20,69	47,40
14	22,24	45,00	22,15	48,00	22,20	46,50
15	23,89	45,00	23,80	48,00	23,85	46,50
16	25,37	44,30	25,32	47,90	25,35	46,10
18	28,61	43,70	28,62	47,30	28,62	45,50
20	31,81	43,40	31,67	46,30	31,74	44,85
22	34,94	42,70	34,83	44,50	34,89	43,60
24	38,10	41,40	38,04	44,40	38,07	42,90
28	44,54	40,90	44,49	44,20	44,52	42,55
32	50,88	40,10	50,79	42,10	50,84	41,10

Tabela A 5 – SAE 4340

1/16 pol.	Medida1		Medida2		Média das medidas	
	Posição (mm)	HRC	Posição (mm)	HRC	Posição (mm)	HRC
1	1,58	57,00	1,59	58,10	1,59	57,55
2	3,19	57,30	3,17	59,00	3,18	58,15
3	4,81	58,00	4,83	58,50	4,82	58,25
4	6,37	58,00	6,36	58,30	6,37	58,15
5	8,03	57,90	7,97	58,00	8,00	57,95
6	9,62	57,50	9,55	57,70	9,59	57,60
7	11,20	57,20	11,05	57,50	11,13	57,35
8	12,77	57,30	12,69	57,50	12,73	57,40
9	14,35	57,00	14,32	57,60	14,34	57,30
10	15,95	56,00	15,79	57,20	15,87	56,60
11	17,55	55,50	17,51	56,00	17,53	55,75
12	19,13	55,00	19,02	55,50	19,08	55,25
13	20,72	54,80	20,69	55,50	20,71	55,15
14	22,31	54,70	22,26	55,30	22,29	55,00
15	23,89	55,00	23,84	55,00	23,87	55,00
16	25,49	54,80	25,34	54,90	25,42	54,85
18	28,65	54,80	28,59	54,90	28,62	54,85
20	31,82	54,50	31,84	55,00	31,83	54,75
22	35,01	53,30	35,00	54,30	35,01	53,80
24	38,19	51,70	38,19	52,00	38,19	51,85
28	44,50	50,00	44,45	51,30	44,48	50,65
32	50,89	45,50	50,83	49,00	50,86	47,25

ANEXO B – Comparação dos Gráficos Experimentais com as “bandas H”.

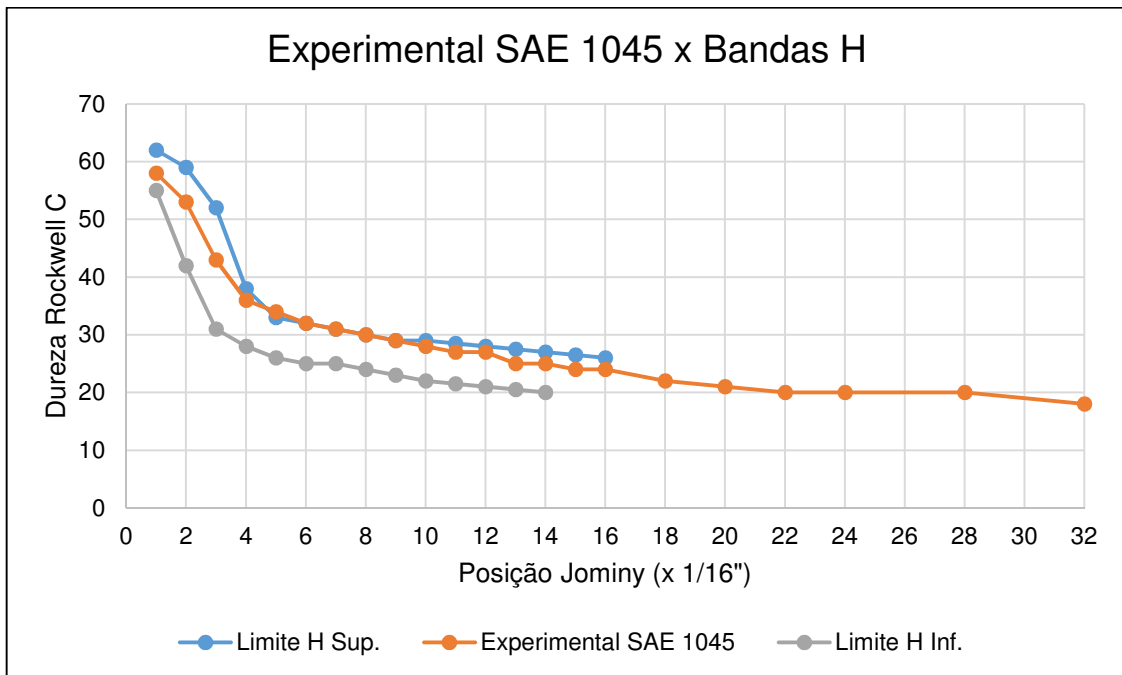


Figura B 1 – Gráfico Experimental Jominy do Aço SAE 1045 comparado a bandas “H”

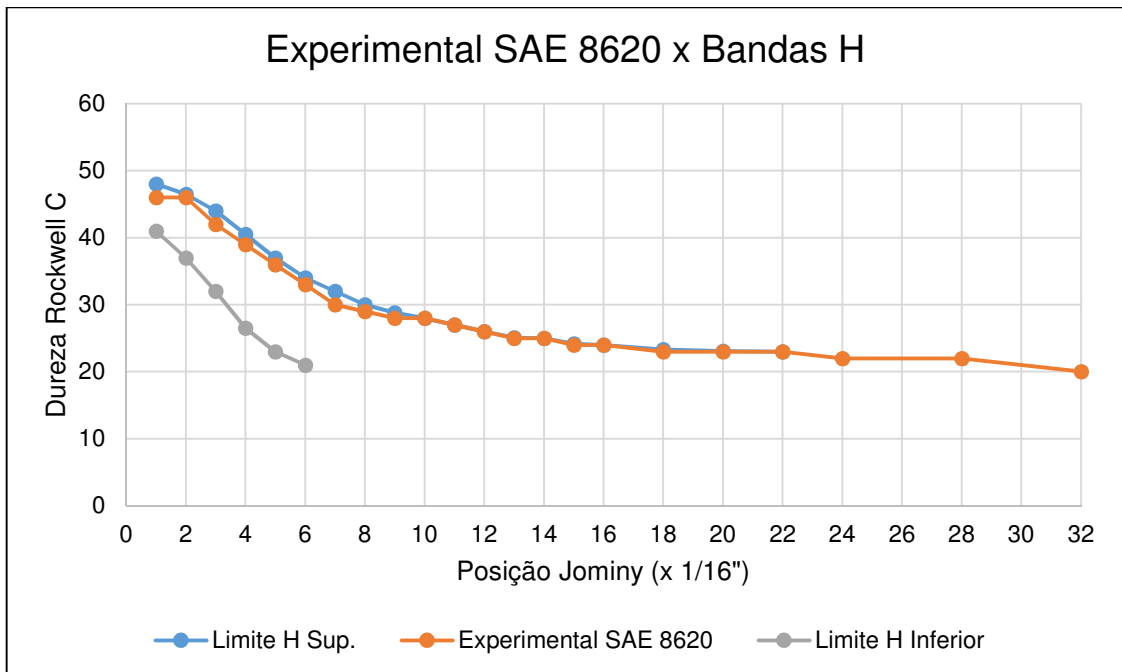


Figura B 2 – Gráfico Experimental Jominy do Aço SAE 8620 comparado a bandas “H”

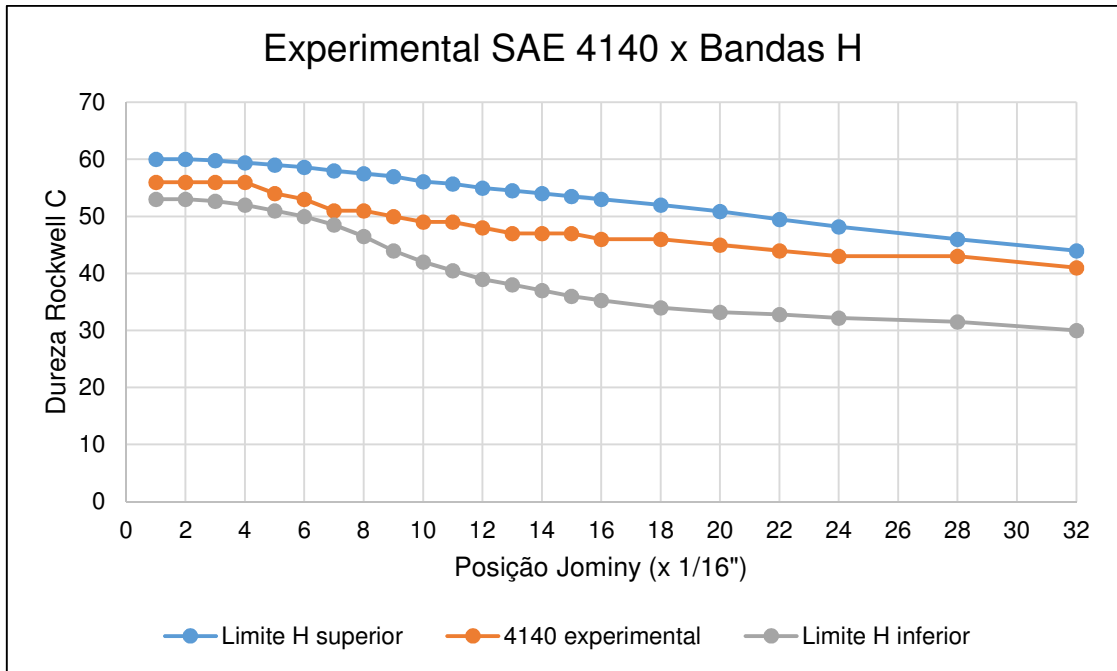


Figura B 3 – Gráfico Experimental Jominy do Aço SAE 4140 comparado a bandas "H"

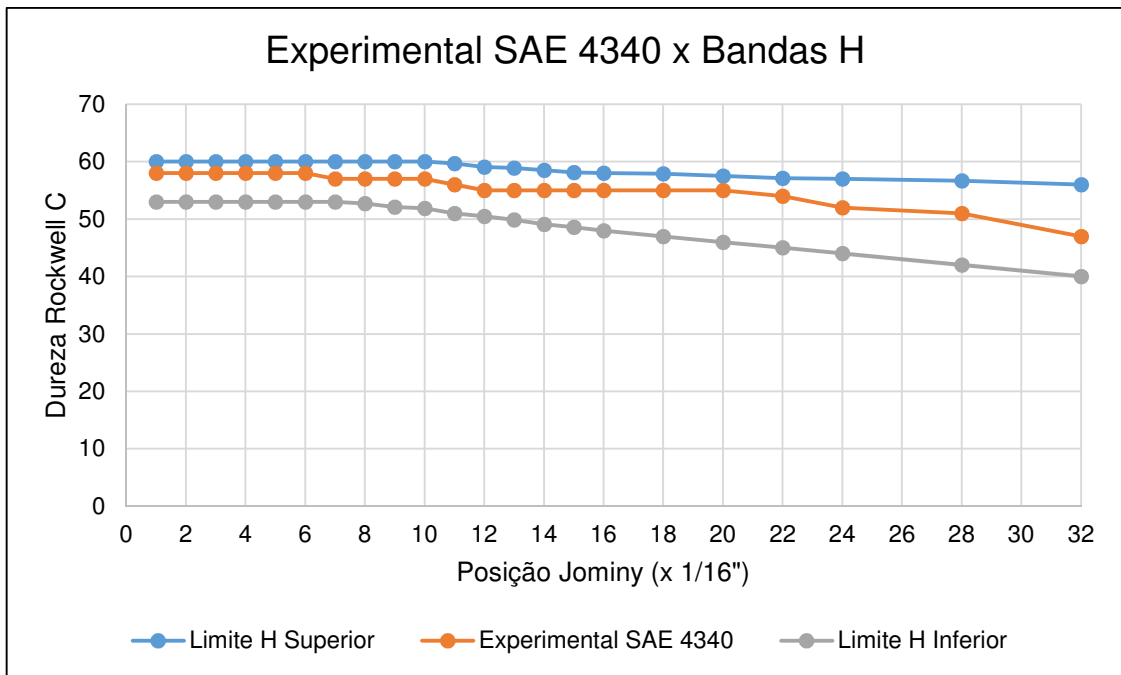


Figura B 4 – Gráfico Experimental Jominy do Aço SAE 4340 comparado a bandas "H"