

ANÁLISE DA TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO NO ENSAIO JOMINY DO AÇO SAE1045 E CORRELAÇÕES NUMÉRICAS DOS PERCENTUAIS DE FASES E DUREZA EM FUNÇÃO DAS TAXAS DE RESFRIAMENTO¹

Patrich Daniel Damasseno Silveira²

César Rolando Nunura³

Jaime Alvares Spim Junior (in memoriam)⁴

Resumo

A temperabilidade de um aço constitui um parâmetro fundamental para a determinação das condições de tratamentos térmicos que este pode ser submetido visando obter as propriedades desejadas e projetadas para um produto ou componente. Neste sentido, o ensaio *Jominy* é um teste padronizado, empregado para caracterizar este parâmetro. Este trabalho aborda uma correlação numérica experimental da influência de um dos fatores que podem afetar a temperabilidade de um aço, a temperatura de austenitização. O aço SAE1045 foi submetido ao ensaio em três diferentes temperaturas, com o auxílio de um sistema de aquisição de dados foi possível realizar a análise térmica buscando obter as curvas de resfriamento. A partir do cálculo das taxas de resfriamento, análise metalográfica, percentual de fases e o levantamento do perfil de dureza medidos e calculados, conseguiu-se obter expressões numéricas em função da taxa de resfriamento possibilitando correlacionar a microestrutura com a variação da taxa. Através dos ensaios realizados foram obtidas equações matemáticas que poderão ser utilizadas em rotinas numéricas, as quais ajudarão na previsão das propriedades mecânicas e metalúrgicas dos materiais.

Palavras-chave: SAE 1045; Temperatura de austenitização; Taxas de resfriamento.

AUSTENITIZING TEMPERATURE ANALYSIS IN THE QUENCH TEST AND NUMERICAL CORRELATIONS WITH PERCENTAGE PHASES AND HARDNESS AS FUNCTION OF COOLING RATES

Abstract

This work presents a numerical-experimental correlation of the factors that may affect the hardenability of steel SAE 1045 after the Jominy end quench test in three different austenitizing temperatures: 800°C, 850°C e 900°C. This correlation was made from the calculation of cooling rates based on thermal analysis of the test. For this purpose, thermocouples were placed at predefined points in the test specimen of evidence in order to obtain the cooling curves. Metallographic analysis and the generation of the hardness profile Jominy (using the Rockwell C scale) allowed to evaluate the hardenability of the steel in question in the three austenitizing temperatures. The calculations of the percentage of phases present from the metallography of the microstructure and microhardness testing applied at the phases estimate allowed global hardness values that were compared with the results of Rockwell C hardness mentioned above. Finally, numerical expressions were obtained by correlating the percentage of phases present in the microstructure and hardness profile depending the cooling rates.

Key words: SAE1045; Austenitizing temperatures; Cooling rates.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, Mestrando em processos de fabricação, PPGEM, Laboratório de Fundição, UFRGS, RS, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Mestre. Doutorando em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUC-RS. Porto Alegre, RS, Brasil.

⁴ Engenheiro Elétrico e Materiais, Mestre e Dr. em Mecânica, Professor Adjunto, Laboratório de Fundição, UFRGS, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A máxima dureza de qualquer aço ao carbono esta associada com uma microestrutura totalmente martensítica. Esta microestrutura, contudo, só pode ser produzida se as transformações controladas por difusão da austenita puderem ser suprimidas por um resfriamento suficientemente rápido. Existe um número de fatores que afetam as taxas de resfriamento de uma peça e a resposta de um dado aço a estas taxas. Assim a formação da martensita de alta dureza pode variar consideravelmente através de uma dada seção transversal. O assunto temperabilidade trata destas últimas variações. A temperabilidade é definida como a “susceptibilidade ao endurecimento por resfriamento rápido” ou “a propriedade, em ligas ferrosas, que determina a profundidade e distribuição de dureza produzida por têmpera”. Ambas as definições enfatizam dureza. Como discutido acima, a fonte de endurecimento é a formação e presença de martensita, sendo que uma terceira definição de temperabilidade pode ser apresentada “é a capacidade de um aço se transformar parcial ou totalmente de austenita para martensita a uma dada profundidade quando resfriado sob certas condições”. Uma abordagem para avaliação da temperabilidade é o emprego do ensaio da ponta temperada ou ensaio *Jominy*, a amostra é resfriada em uma ponta por uma coluna de água, experimentando assim um faixa de taxas de resfriamento, desde aquela associada com o resfriamento em água até aquela que se desenvolve no resfriamento ao ar. O objetivo do presente trabalho é observar o comportamento da microestrutura durante o tratamento térmico, possibilitando a aquisição de equações matemáticas que preveem a taxa de resfriamento em função da posição, o que torna possível correlacionar a dureza *HRC*, juntamente com o percentual de fases em função das taxas de resfriamento impostas durante o processo, as quais ajudarão na previsão das propriedades mecânicas e metalúrgicas dos materiais. Publicações mostram o interesse do estudo deste ensaio assim como a compreensão dos fenômenos de transferência de calor e decomposição da austenita durante o resfriamento.⁽¹⁻³⁾ Atualmente destaca-se o desenvolvimento de modelos numéricos para a simulação das curvas de resfriamento, a previsão da formação microestrutural, tanto a análise das fases presentes quanto o perfil de dureza obtido durante o ensaio.⁽⁴⁻⁶⁾ Alguns ensaios *Jominy* foram realizados isolando termicamente as laterais do corpo de prova, para estudar os efeitos das perdas de calor radiais e a sua influência na temperabilidade.⁽⁷⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente estudo utilizou-se o aço SAE/ABNT 1045, o resultado da análise química da composição do material é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Composição Química do Aço SAE 1045

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Co	%Cu	%Sn
0,45	0,18	0,70	0,02	0,03	0,05	0,05	<0,01	0,12	0,01

2.1 Condições da Amostra

As amostras foram adquiridas em barras de perfil cilíndrico e os corpos-de-prova (CP) foram confeccionados conforme a norma.⁽⁸⁾ Visando garantir a homogeneização das microestruturas e suas propriedades, a amostra foi submetida a um processo de normalização ($T_\gamma = 850^\circ\text{C}$, $t = 1\text{h}$).

2.2 Equipamentos e Implementos

Foi utilizado, sistema de aquisição de dados e termopares tipo K. Para redução do efeito de decarbonetação, empregou-se argônio como atmosfera protetora. Na análise metalográfica utilizou-se as normas.^(9,10) Nos ensaios de dureza foram utilizados os Durômetro *Rockwell "C"*; e Microdurômetro *Vicker's* conforme as normas.^(11,12)

2.3 Montagem no Dispositivo de Ensaio

Após a normalização dos CP's, procedeu-se à montagem de cada. Os termopares foram inseridos nos furos usinados. Adotou-se uma denominação para cada termopar e furo a partir da extremidade esquematizada na Figura 1.

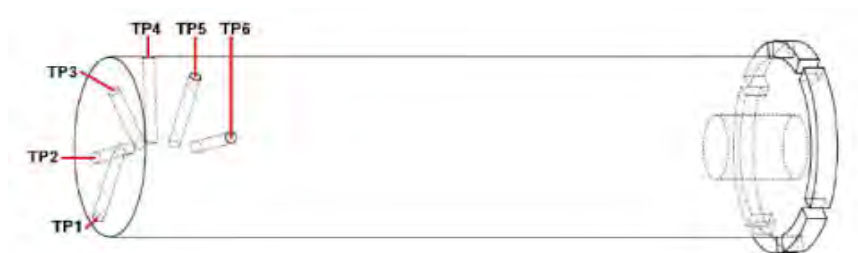


Figura 1. Disposição dos termopares no corpo de prova.

2.4 Austenitização

No intuito de estudar os efeitos da temperatura de austenitização, foram escolhidas três temperaturas seguindo a seguinte metodologia: Com o resultado da análise química do material, procedeu-se o cálculo da temperatura crítica de transformação Ac_3 utilizando a equação (A), empírica da literatura⁽¹³⁾ para o Aço 1045:

$$Ac_3 = 910 - 203\sqrt{(\%C)} - 15,2(\%Ni) + 44,7(\%Si) + 104(\%V) + 31,5(\%Mo) + 13,1(\%W) \quad (A)$$
$$Ac_3 = 781^\circ\text{C}$$

Portanto, as temperaturas de austenitização (T_γ) foram: 800°C , 850°C e 900°C . O tempo de encharque foi de 30 minutos.

2.5 Resfriamento

Após austenitização do CP procedeu-se seu resfriamento, considerando um intervalo de 5 segundos para colocá-lo no dispositivo de resfriamento e acionar a válvula de engate rápido para a saída da água. O tempo de resfriamento foi de 600s.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Curvas de Resfriamento Experimentais

As curvas foram obtidas através das análises térmicas dos ensaios Jominy realizados neste estudo.

Na Figura 2 temos as curvas de resfriamento do aço SAE 1045 obtidas com a $T_{\gamma} = 800^{\circ}\text{C}$.

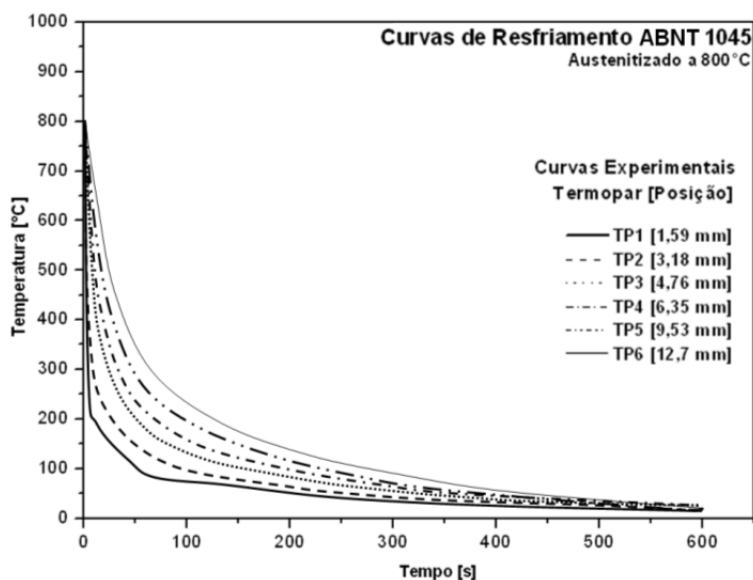


Figura 2. Curva de resfriamento de um ensaio Jominy do aço ABNT1045 austenitizado com $T_{\gamma} = 800^{\circ}\text{C}$.

Podemos ver as variações das temperaturas à que é submetido o CP ao longo do ensaio, as maiores taxas de resfriamento são obtidas nos termopares mais próximos a base devido ao contato direto com a água.

A Figura 3 mostra as curvas resultantes do ensaio com o Cp austenitizado à 850°C .

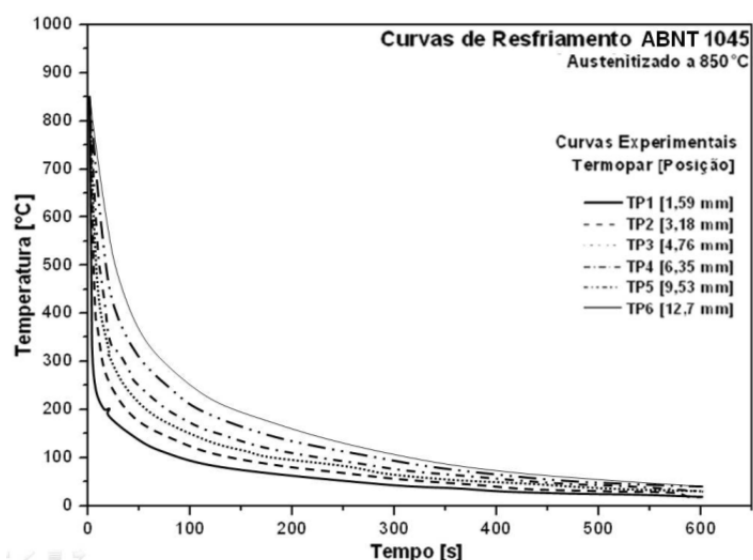


Figura 3. Curva de resfriamento de um ensaio Jominy do aço ABNT1045 austenitizado com $T_{\gamma} = 850^{\circ}\text{C}$.

Podemos ver na Figura 4 as curvas resultantes do ensaio com o Cp austenitizado à 900°C.

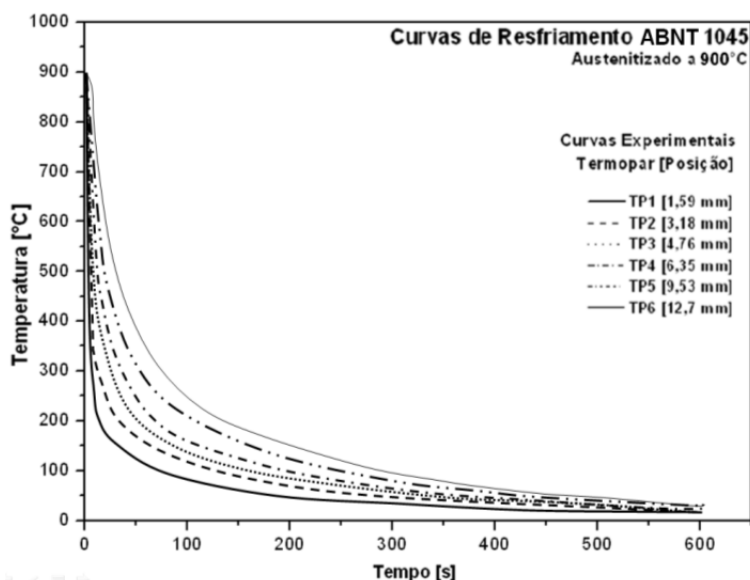


Figura 4. Curva de resfriamento de um ensaio Jominy do aço ABNT1045 austenitizado com $T_{\gamma} = 900^{\circ}\text{C}$.

De posse dessas curvas foi possível calcular as taxas de resfriamento obtidas de forma experimental que os CP's foram submetidos ao longo dos três ensaios.

3.2 Taxas de Resfriamento (\dot{T}) Experimentais

Foram calculadas as taxas para cada posição do termopar e temperatura os valores das taxas em função da posição foram ajustados numericamente (Figura 5).

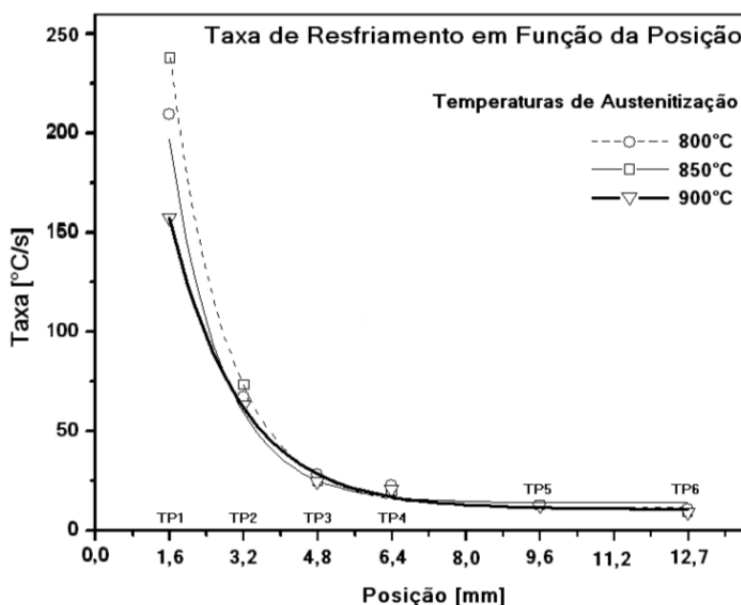


Figura 5. Ajuste numérico das taxas de resfriamento em função da posição.

Observa-se que para diferentes temperaturas de resfriamento, há diferença nas taxas das duas primeiras posições do corpo de prova. A partir da posição TP3, as taxas de resfriamento são praticamente iguais, independente da temperatura de

austenitização. Com as curvas obtidas foi possível gerar expressões numéricas da taxa de resfriamento em função da posição no CP, as quais são descritas nas equações (B), (C) e (D):

$$T^{\circ} Aust.: 800^{\circ}C \rightarrow \dot{T} = 844,7. \exp \left[-\frac{posição}{1,21} \right] + 11,7 \quad (B)$$

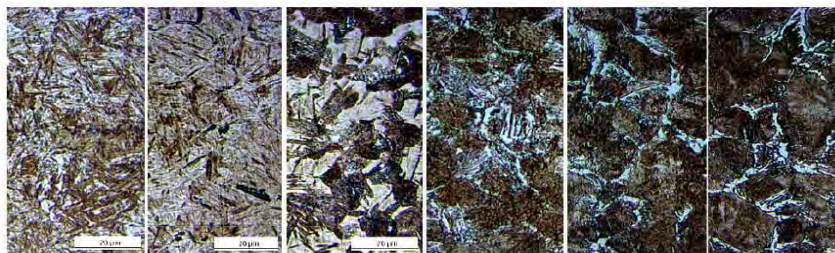
$$T^{\circ} Aust.: 850^{\circ}C \rightarrow \dot{T} = 739,8. \exp \left[-\frac{posição}{1,14} \right] + 13,9 \quad (C)$$

$$T^{\circ} Aust.: 900^{\circ}C \rightarrow \dot{T} = 423,2. \exp \left[-\frac{posição}{1,51} \right] + 10,6 \quad (D)$$

3.3 Análise Metalográfica

3.3.1 Temperatura de austenitização de 800°C

A Figura 6 mostra a microestrutura do Aço SAE 1045, nas posições TP1 e TP2, observa-se uma matriz predominantemente martensítica. Em TP3, temos a formação da estrutura bainítica com algumas colônias de perlita num fundo martensítico. Na posição TP4, já ocorre à formação de ferrita e perlita devido às baixas taxas de resfriamento nesta posição e provavelmente ainda existe a presença de uma martensita. Nas posições TP5 e TP6 observa-se uma estrutura predominantemente perlítica – ferrítica.

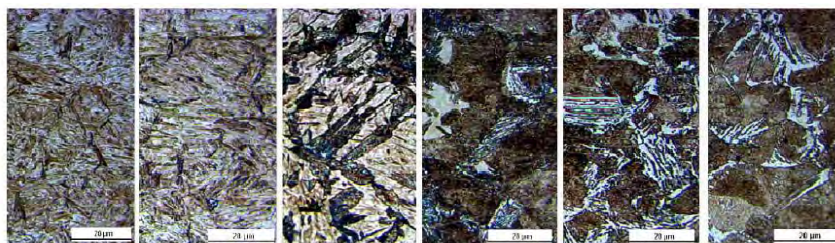


TP1 (1,6 mm) TP2 (3,2 mm) TP3 (4,8 mm) TP4 (6,4 mm) TP5 (9,6 mm) TP6 (12,7 mm)

Figura 6. Microestrutura, após austenitização a 800°C, nas diferentes posições.

3.3.2 Temperatura de austenitização de 850°C

Nas posições TP1 e TP2 da Figura 7, observa-se a matriz martensítica, em TP3 temos a formação da estrutura bainítica com algumas colônias de perlita num fundo de martensita, e na posição TP4 é notória a formação de ferrita e perlita com a presença de uma martensita. Para as posições TP5 e TP6 observa-se uma estrutura predominantemente perlítica envolta numa rede de ferrita.



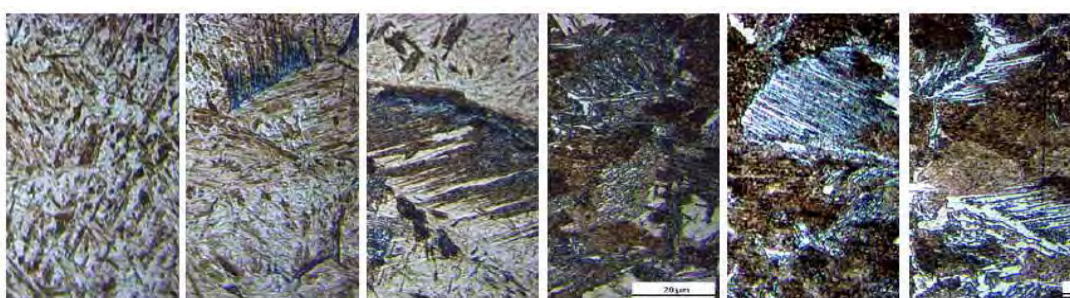
TP1 (1,6 mm) TP2 (3,2 mm) TP3 (4,8 mm) TP4 (6,4 mm) TP5 (9,6 mm) TP6 (12,7 mm)

Figura 7. Microestrutura, após austenitização a 850°C, nas diferentes posições.

3.3.3 Temperatura de austenitização de 900°C

Na posição TP1 da Figura 8 observa-se uma matriz predominantemente martensítica. Em TP2, a estrutura martensítica já apresenta a formação de bainita.

Na posição TP3 observa-se a formação de bainita com poucos núcleos de perlita num fundo de martensita. Na posição TP4 à formação de ferrita e perlita com a presença de uma martensita. Este fato pode estar relacionado a um eventual crescimento de grão devido ao aumento na temperatura diminuir as áreas de contato e dificultar a precipitação de fases ou microconstituintes como a ferrita ou a perlita, o que resulta num aumento na dureza constatado no perfil de dureza *Jominy*. Finalmente nas posições TP5 e TP6 observa-se uma estrutura predominantemente perlítica com uma rede de ferrita acicular que penetra as colônias de perlita. Segundo Colpaert:⁽¹⁴⁾ esta textura agulhada da ferrita geralmente está associada a uma granulação grosseira.



TP1 (1,6 mm) TP2 (3,2 mm) TP3 (4,8 mm) TP4 (6,4 mm) TP5 (9,6 mm) TP6 (12,7 mm)

Figura 8. Microestrutura, após austenitização a 900°C, em diferentes posições.

3.3.4 Percentual de fases

A Tabela 2 mostra as porcentagens de fases formadas a partir da extremidade resfriada do corpo de prova em função das três temperaturas.

Tabela 2. Porcentagens de fases

	% Martensita			%Bainita			% Perlita			% Ferrita		
	800°C	850°C	900°C	800°C	850°C	900°C	800°C	850°C	900°C	800°C	850°C	900°C
TP1	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TP2	98,0	100,0	87,6	2,0	0,0	12,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TP3	29,3	56,8	71,2	31,1	22,6	14,4	39,6	20,6	14,4	0,0	0,0	0,0
TP4	10,3	10,1	16,4	0,0	0,0	0,0	83,4	79,7	67,0	6,3	10,2	16,6
TP5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	91,4	84,4	77,6	8,6	15,6	22,4
TP6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	92,9	89,2	72,4	7,1	10,8	27,6

3.4 Ensaios de Dureza

3.4.1 Dureza Rockwell C

A Figura 9 mostra o perfil de dureza HRC em função da extremidade temperada medidos experimentalmente nota-se um perfil de dureza um pouco mais elevado para a amostra austenitizada a 900°C.

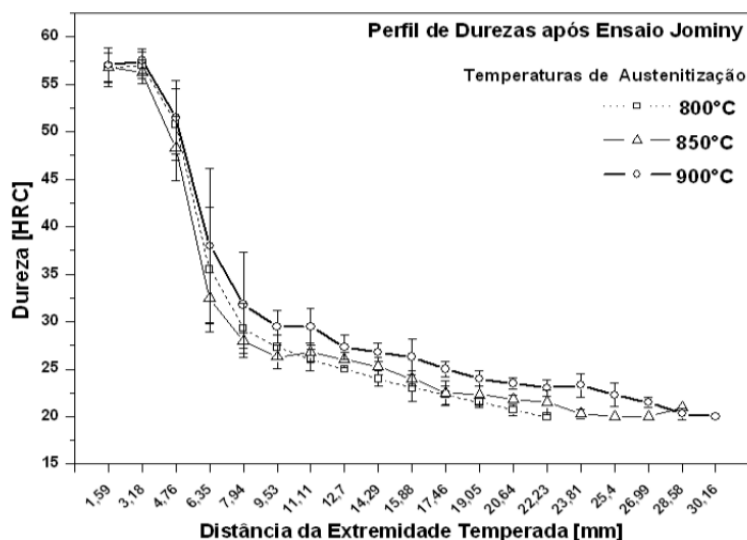


Figura 9. Perfil de dureza Jominy em função da extremidade temperada.

3.4.2 Microdureza Vickers

Os resultados da microdureza das fases podem vistos na Tabela 3, para as três temperaturas de análise.

Tabela 3. Valores medidos na Microdureza para os diferentes Ensaios

	HV Martensita			HV Bainita			HV Perlita			HV Ferrita		
	800°C	850°C	900°C	800°C	850°C	900°C	800°C	850°C	900°C	800°C	850°C	900°C
TP1	682	682	681	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TP2	642	682	725	-	-	573	-	-	-	-	-	-
TP3	573	573	642	573	514	566	464	464	351	-	-	-
TP4	-	384	463	-	-	-	350	336	336	275	322	315
TP5	-	-	-	-	-	-	330	309	330	268	265	274
TP6	-	-	-	-	-	-	296	286	322	255	255	228

Conhecidos os valores de microdurezas das fases e as porcentagens das mesmas, pode ser aplicada a equação (E) para a estimativa da dureza global em cada ponto do corpo de prova a fim de ser comparado com os resultados experimentais de dureza HRC segundo Smoljan.⁽¹⁵⁾

$$HV = [(\%Martensita.HVMartensita) + (\%Bainita.HVBainita) + (\%Perlita.HVPerlita) + (\%Ferrita.HVFerrita)] \quad (E)$$

Com base nestes resultados, foram calculados valores de durezas a fim de comparar aos obtidos experimentalmente como mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Comparação entre os valores de dureza medidos e calculados

Ty	800°C			850°C			900°C			
	Posição (mm)	HRC Medido	HRC Calculado	Desvio	HRC Medido	HRC Calculado	Desvio	HRC Medido	HRC Calculado	Desvio
	1,6	57	59	1,41	57	59	1,41	57	59	1,41
	3,2	57	57	0,00	57	59	1,41	58	60	1,41
	4,8	51	51	0,00	51	52	0,70	52	55	2,12
	6,4	35	35	0,00	35	35	0,00	38	36	1,41
	9,5	28	33	3,53	28	31	2,12	30	33	2,12
	12,7	25	29	2,82	25	28	2,12	28	29	0,70

Observa-se que com uma maior temperatura de austenitização houve um incremento na dureza calculada, como também foi constatado no perfil de durezas experimentais da Figura 9.

3.5 Correlação Entre a Dureza e as Taxas de Resfriamento

Pode-se estabelecer uma correlação entre a dureza e as taxas de resfriamento calculadas. A Figura 10 mostra a relação da Taxa de Resfriamento e Dureza HRC em função da posição no CP Jominy. Essas curvas foram obtidas de posse das Taxas de resfriamento oriundas da Figura 5, juntamente com os valores de dureza medidos no ensaio de dureza Rockwell para cada posição no CP Jominy.

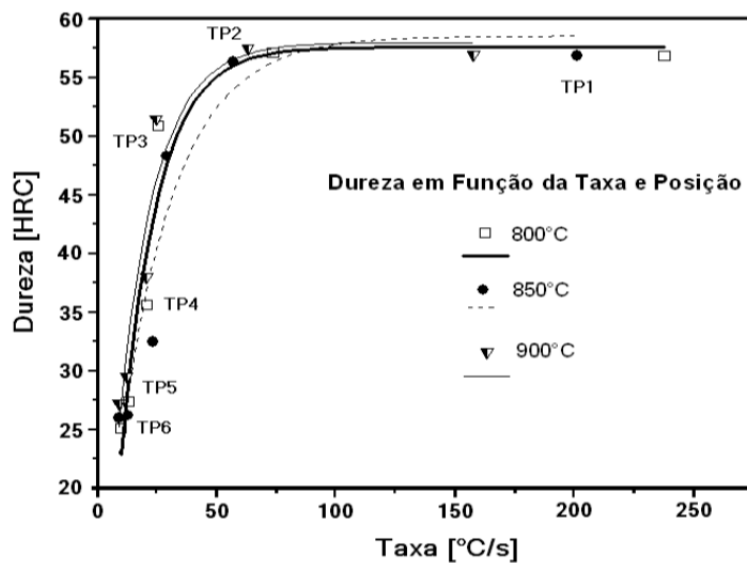


Figura 10. Correlação entre dureza e taxa de resfriamento em função da posição.

Dos dados das curvas da Figura 10 é possível obter as expressões numéricas (F), (G) e (H) para o cálculo aproximado da dureza HRC em função da taxa de resfriamento.

$$T^{\circ}\gamma: 800^{\circ}\text{C} \rightarrow HRC = -64,5 \exp\left[-\frac{\dot{T}}{15,2}\right] + 57,5 \quad (F)$$

$$T^{\circ}\gamma: 850^{\circ}\text{C} \rightarrow HRC = -51,6 \exp\left[-\frac{\dot{T}}{23,2}\right] + 58,4 \quad (G)$$

$$T^{\circ}\gamma: 900^{\circ}\text{C} \rightarrow HRC = -58,2 \exp\left[-\frac{\dot{T}}{15,5}\right] + 57,6 \quad (H)$$

3.6 Correlação Entre a Porcentagem de Fase e a Taxa de Resfriamento

Com os resultados das porcentagens de fases presentes na microestrutura e taxas de resfriamento, foram obtidas as curvas mostradas abaixo. Na Figura 11, podemos verificar o percentual de fases que podem ser formadas para cada taxa de resfriamento empregada para a $T_{\gamma} = 800^{\circ}\text{C}$

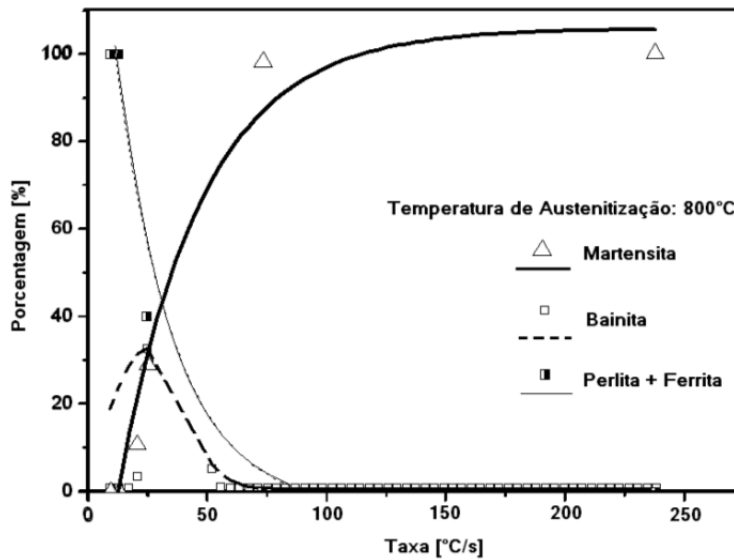


Figura 11. Porcentagem de fases em função da taxa de resfriamento para temperatura de austenitização de 800°C.

Utilizando as curvas da Figura 11 foram obtidas as expressões numéricas (I), (J) e (L) para a temperatura de 800°C que descrevem o percentual de fases formadas em função da Taxa de resfriamento empregada.

$$\%Martensita = -149,6 \exp \left[-\frac{\dot{T}}{35,2} \right] + 105,7 \quad (I)$$

$$\%Bainita = 0,51 + 32,2 \exp \left[\left(\frac{-(\dot{T} - 24,9)}{432,2} \right)^2 \right] \quad (J)$$

$$\%Perlita + Ferrita = 164,8 \exp \left[-\frac{\dot{T}}{24,6} \right] + 4,1 \quad (L)$$

O mesmo procedimento foi utilizado nas demais amostras gerando as seguintes curvas: na Figura 12 para $T_{\gamma} = 850^{\circ}\text{C}$ e na Figura 13 para $T_{\gamma} = 900^{\circ}\text{C}$, temos igualmente os percentuais em função da taxa de resfriamento.

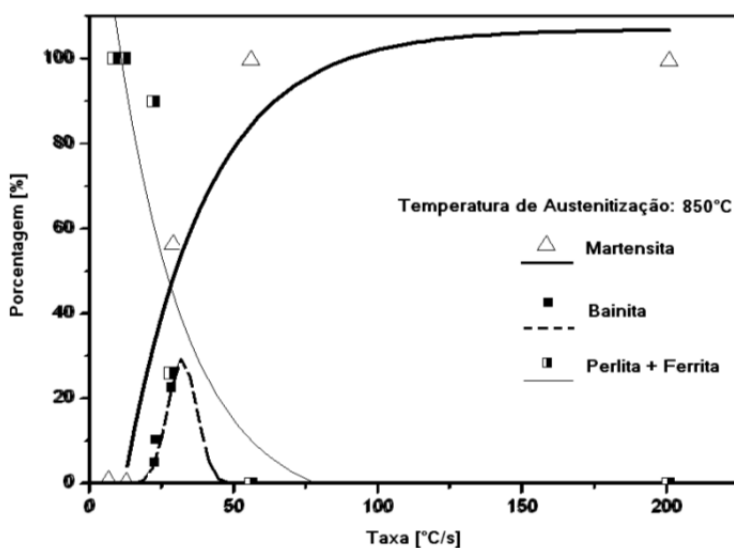


Figura 12. Porcentagem de fases em função da taxa de resfriamento para temperatura de austenitização de 850°C.

As equações (M), (N) e (O) fornecem valores dos percentuais de fases obtidas com a $T_{\gamma} = 850^{\circ}\text{C}$.

$$\%Martensita = -160,9 \exp\left[-\frac{\dot{T}}{28,3}\right] + 106,9 \quad (M)$$

$$Bainita = 3,8 \exp\left[-2\left(\frac{\dot{T} - 32,1}{10,1}\right)^2\right] \quad (N)$$

$$\%Perlita + Ferrita = 168,4 \exp\left[-\frac{\dot{T}}{24,6}\right] + 6,6 \quad (O)$$

Finalmente para a $T_{\gamma}=900^{\circ}\text{C}$ temos as curvas representadas na Figura 12 que mostra também as percentagens de fases formadas em função da Taxa de resfriamento agora para $T_{\gamma}= 900^{\circ}\text{C}$.

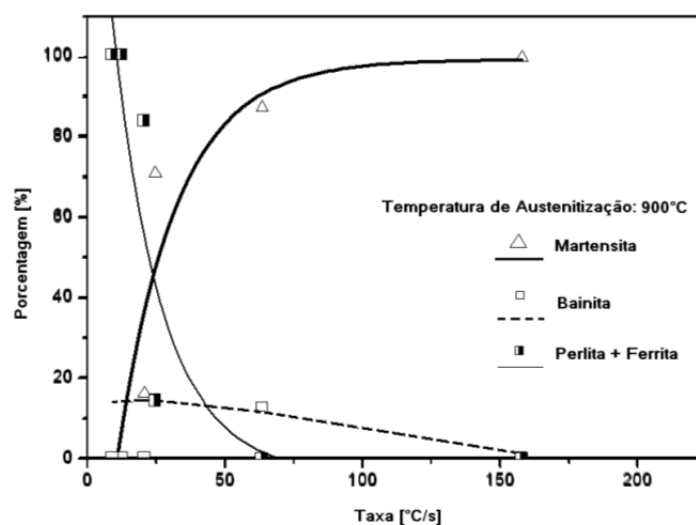


Figura 13. Porcentagem de fases em função da taxa de resfriamento para temperatura de austenitização de 900°C .

Novamente obteu-se as expressões que descrevem a presença de uma determinada fase na microestrutura, à medida que a taxa de resfriamento varia.

$$\%Martensita = -161,9 \exp\left[-\frac{\dot{T}}{21,5}\right] + 99,4 \quad (P)$$

$$\%Bainita = 14,4 \exp\left[-\left(\frac{\dot{T}-24,5}{432,2}\right)^2\right] \quad (Q)$$

$$\%Perlita + Ferrita = 186,9 \exp\left[-\frac{\dot{T}}{17,9}\right] - 3,7 \quad (R)$$

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir deste estudo permitiram concluir:

- as curvas de resfriamento adquiridas apresentaram boa concordância no que se refere à formação microestrutural quando foram comparadas com os diagramas T.T.T apresentados na literatura, os resultados obtidos pela instrumentação do ensaio mostraram-se coerentes;
- as taxas de resfriamento concordaram de modo exponencial decrescente com o percentual de fases e com os valores de dureza medidos dentro do intervalo analisado, de acordo com a literatura;

- observou-se que as morfologias das fases obtidas se alteram em função da temperatura de austenitização.
- Para a temperatura de austenitização de 900°C, ocorre um incremento no perfil de dureza *Jominy*;
- os valores de dureza calculados apresentaram boa concordância com os resultados experimentais; e
- as análises realizadas permitiram observar o comportamento da microestrutura durante o tratamento térmico, possibilitando a aquisição de equações matemáticas que preveem a taxa de resfriamento em função da posição, o que torna possível correlacionar a dureza *HRC*, juntamente com o percentual de fases em função das taxas de resfriamento impostas durante o processo, as quais ajudarão na previsão das propriedades mecânicas e metalúrgicas dos materiais.

REFERÊNCIAS

- 1 SMOLJAN B., Mathematical modeling of austenite during the quenching. 13th International Scientific Conference. Achievements in Mechanical and Materials Engineering. Poland. 2005.
- 2 LE MASSON P., et al. A numerical study for the estimation of a convection heat transfer coefficient during a metallurgical “Jominy end-quench” test. International Journal of Thermal Sciences. Vol 41, pp 517 – 527. 2002.
- 3 HOMBERG D. A Numerical Simulation of the Jominy End-Quench Test. Acta Material. Volume 44, pp 4375 – 4385. 1996.
- 4 SMOLJAN B., et al. An analysis of modified Jominy test. Computacional Materials Science and Surface Engineering. Volume 1. pp 120 – 124. 2009.
- 5 ZEHTAB A., et al. Prediction of hardness at different points of Jominy specimen using quench factor analysis method. Journal of Materials Processing Technology. Volume 99, pp 124 – 129. 2008.
- 6 GEROLDO A., et al. 2008. Heat transfer mathematical modeling during Jominy end-quench test of the SAE 1045. Proceedings of ENCIT 2008 - 12th in Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences. Copyright © 2008 by ABCM.
- 7 YAO X., GU J., HU M., ZHU Z. A numerical study of an insulating end-quench test for high hardenability steels. Scandinavian Journal of Metallurgy. 2003.
- 8 ASTM A 255 – 07, Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel, ASTM, PA, United States, 2007.
- 9 ASTM E 3–95, Practice for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, PA, United States, 1980.
- 10 ASM HANDBOOK. Metallography and Microstructures. ASM, Vol.9, 1985.
- 11 ASTM E 384-08, Microindentation Hardness of Materials, ASTM International, PA, United States, 2008.
- 12 ASTM E 82-03, Vickers Hardness of Metallic Materials, ASTM International, PA, United States, 2003.
- 13 ASM HANDBOOK. Heat Treatment. ASM, Vol.4, 1985.
- 14 COLPAERT H., Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. Quarta Edição. Revisão Técnica: André da Costa e Silva. Editora Blucher. São Paulo. Brasil. 2008.
- 15 SMOLJAN B., Mathematical modeling of austenite during the quenching. 13th International Scientific Conference. Achievements in Mechanical and Materials Engineering. Poland. 2005.