

ANÁLISE DE TEMPERABILIDADE E CORRELAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS AÇOS ABNT 1045 E ABNT 4140*

Davi Alves Marques¹

Pedro Guilherme do Nascimento Pereira²

Roberto Abreu Alencar³

Marcelo José Gomes da Silva⁴

Resumo

Este trabalho visa analisar a temperabilidade dos aços ABNT 1045 e ABNT 4140 através do ensaio Jominy e correlacionar suas propriedades com a variação microestrutural devido ao gradiente de transferência de calor através dos corpos de prova, também como analisar o efeito dos elementos de liga presentes. O ensaio Jominy foi realizado segundo a norma ABNT A255-10. Foi observado que o aço ABNT 4140 apresenta maior temperabilidade que o ABNT 1045 devido à maior profundidade de têmpera e, por conseguinte, apresentou produtos de transformação martensítica em profundidades maiores do corpo de prova. Visto que o teor de carbono em ambos os aços é aproximadamente igual, a maior temperabilidade do ABNT 4140 se dá devido aos elementos de liga presentes. Os elementos de liga do ABNT 4140 contribuem para uma maior percentagem de carbono equivalente, quando comparado ao ABNT 1045, deslocando assim o diagrama de transformação isotérmica para a direita, reduzindo então a taxa de resfriamento crítico.

Palavras-chave: Ensaio Jominy; Caracterização Microestrutural; Temperabilidade.

HARDENABILITY ANALYSIS AND MICROSTRUCTURAL CORRELATION OF ABNT 1045 AND ABNT 4140 STEELS

Abstract

This work aims to analyze the hardenability of ABNT 1045 and ABNT 4140 steels using the Jominy End Quench Test and correlate the properties with the microstructural variation due to the heat transfer gradient through the test subjects, and thus analyze the effect of the alloying elements. The Jominy End Quench Test was performed following the ASTM A 255-10 norm. It was observed that the ABNT 4140 presents a better hardenability than the ABNT 1045 due to the higher quench depth and, consequently, presented more products of martensitic transformations in greater depths of the test subject. Since the content of carbon present in both steels are approximately equal, the better hardenability of the ABNT 4140 is due to the alloying elements. The alloying elements present in the ABNT 4140 contributes to a higher percentage of carbon equivalent, compared to the ABNT 1045 and thus, shifting the isothermal transformation diagram to the right which reduces the critical cooling rate.

Keywords: Jominy End Quench Test; Microstructural Characterization; Hardenability.

¹ Engenharia Metalúrgica, Estudante, Bolsista, Departamento de Engenharia Metalúrgica e materiais, Universidade federal do Ceará, Fortaleza, Ceará e Brasil.

² Engenharia Metalúrgica, Estudante, Departamento de Engenharia Metalúrgica e materiais, Universidade federal do Ceará, Fortaleza, Ceará e Brasil.

³ Engenharia Metalúrgica, Estudante, Departamento de Engenharia Metalúrgica e materiais, Universidade federal do Ceará, Fortaleza, Ceará e Brasil.

- ⁴ *Engenharia Mecânica, Professor Doutor, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e materiais, Universidade federal do Ceará, Fortaleza, Ceará e Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos muitos aços de baixa liga têm sido submetidos a diversos tratamentos térmicos com o intuito de melhorar suas propriedades para aplicações diversas. Com a crescente utilização de tratamentos térmicos, torna-se importante tanto o estudo das propriedades mecânicas quanto o estudo das microestruturas, afim de compreender melhor o processo.

O estudo foi realizado através do Ensaio Jominy nos aços ABNT 1045 e ABNT 4140 com o intuito de investigar o efeito dos elementos de liga na temperabilidade do aço. A análise microestrutural foi realizada em cinco seções de cada aço para correlacionar a dureza obtida pela têmpera nas diferentes microestruturas geradas pelo gradiente de fluxo de calor existente entre a base resfriada por jato d'água e o topo da peça.

1.1 Tratamentos Térmicos

Entende-se por tratamentos térmicos quaisquer combinações de aquecimento e resfriamento sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, cujo objetivo é a alteração de propriedades. Neste trabalho abordaremos com mais ênfase a têmpera, um dos diversos tratamentos térmicos existentes.

A têmpera, no caso metais ou ligas metálicas, é um tratamento térmico que visa a transformação martensítica da fase estável em temperatura elevada. Consiste em aquecer a peça até o campo austenítico seguido de um resfriamento controlado de maneira a evitar transformações difusionais.

Aços de diferentes composições possuem capacidades diferentes de sofrer têmpera. Um método comumente utilizado na avaliação dessa capacidade é o ensaio Jominy, que mede a temperabilidade dos aços. Neste ensaio, um corpo de prova cilíndrico, de 25,4mm de diâmetro por 101,6mm de comprimento é aquecido até o campo austenítico e resfriado por aplicação de um jato de água em uma extremidade, sob condições controladas pressão e temperatura. Depois de resfriado, retifica-se as duas superfícies paralelas e opostas e mede-se a sua dureza, a distâncias pré-determinadas por norma, a partir da extremidade resfriada pelo jato d'água, como mostra a Figura 1.

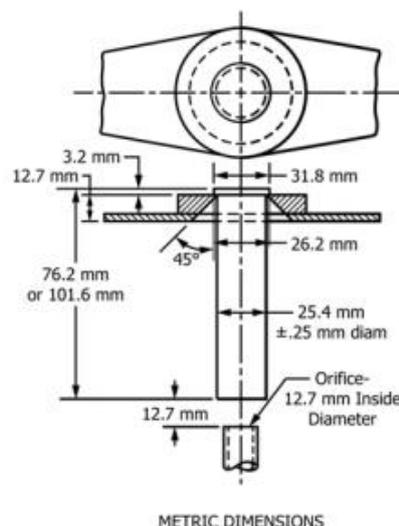


Figura 1. Representação esquemática de um corpo de prova de ensaio Jominy. Fonte: ASTM A255 - 10

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O Laboratório de Pesquisa em Tecnologia de Soldagem (LPTS) - UFC forneceu dois corpos de prova cilíndricos dos aços ABNT 1045 e ABNT 4140, contendo aproximadamente o mesmo teor de carbono e o segundo ligado com cromo e molibdênio como pode ser visto na Tabela 1, que conferem uma melhor usinabilidade e resistência à corrosão. Os corpos de prova possuem dimensões de 25,4mm de diâmetro por 101,6mm de comprimento que pode ser vista na Figura 2.

Tabela 1. Composição química especificada dos aços 1045 e 4140

ABNT	C	Mn	P máx.	S máx.	Si	Cr	Mo
1045	0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,040	0,050	-	-	-
4140	0,38 – 0,43	0,75 – 1,00	0,030	0,040	0,15 – 0,35	0,8 – 1,10	0,15 – 0,25

Fonte: NBR NM 87:2000.



Figura 2. Corpo de prova (adaptado devido à falta de material nas dimensões adequadas). Fonte: Elaborada pelo autor

2.2 Métodos

2.2.1 Tratamentos Térmicos

Na etapa do tratamento térmico, as amostras foram normalizadas utilizando um forno, do tipo MUFLA, a 915°C com tempo de permanência de 1h e resfriados ao ar calmo. O tratamento de normalização foi realizado com o intuito de refinar os grãos grosseiros e produzir uma microestrutura mais uniforme e homogênea. Em seguida, as amostras foram austenitizadas a 925°C com tempo de permanência de 30min.



Figura 3. Forno tipo MUFLA contendo as amostras ABNT 1045 e ABNT 4140, à esquerda e direita respectivamente, ao serem retiradas na etapa de normalização. Fonte: Elaborada pelo autor

2.2.2 Ensaio de temperabilidade

A avaliação da temperabilidade dos aços ABNT 1045 e ABNT 4140 foi conduzida pelo método do ensaio Jominy, segundo a norma ASTM A255 – 10 (1), com pequenas adaptações devido à falta de material com as dimensões adequadas. Foram usados corpos de prova de 25,4 mm de diâmetro por 101,6 mm de comprimento.



Figura 4. Dispositivo utilizado para o resfriamento, produzido na Universidade Federal do Ceará.
Fonte: Elaborada pelo autor

O fluxo de água foi aplicado a peça por um tempo de 10 min de acordo com (1).

2.2.3 Ensaio de dureza

As amostras foram preparadas de acordo com (1).

As avaliações de dureza Rockwell C (HRC) foram conduzidas no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) da Universidade Federal do Ceará - UFC e no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE. A medição da dureza HRC foi conduzida de acordo com a o especificado na norma NBR NM ISO 6508-1(3).

2.2.4 Caracterização Microestrutural

Para a análise microestrutural, utilizaram-se amostras extraídas dos corpos de prova sendo elas uma como recebida e outras 4 extraídas a partir da extremidade resfriada por água, após a realização do ensaio Jominy, de dimensões aproximadas de 15mm de comprimento.

As amostras foram preparadas utilizando lixas d'água com as seguintes granulometrias: 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. Em seguida, foram polidas com pasta de diamante de 3 μ e 1 μ respectivamente. As amostras foram atacadas utilizando reagente nital 2% com tempo de exposição variando de 2 a 6 segundos.

As imagens das microestruturas foram obtidas pelo microscópio óptico Zeiss localizado no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) – UFC e pelo microscópio óptico Leica localizado no Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados

3.1.1 Temperabilidade

Um método quantitativo de determinar a temperabilidade de um aço é expresso pelo DI, que se refere ao máximo diâmetro de uma barra de aço que produz 50% martensita no seu centro ao ser temperado. Embora seja uma maneira

teórica, o valor de DI é um excelente para comparar a temperabilidade de diferentes aços.

A norma ASTM A 255 – 02 indica para assumirmos um tamanho de grão austenítico No. 7 para realizar o cálculo do DI, que é obtido pelo produto dos fatores de temperabilidade, expressos em polegadas, da tabela 6 da mesma, como indicado na equação 1.

$$DI = fC \times fMn \times fSi \times fNi \times fCr \times fMo \quad (1)$$

Utilizando os valores médios de composição dos aços ABNT 1045 e 4140, obtemos os valores de DI apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Fatores de temperabilidade especificada dos aços 1045 e 4140 em polegadas

ABNT	C	Mn	Si	Cr	Mo
1045	0,226	3,500	-	-	-
4140	0,213	3,933	1,175	3,052	1,60

Fonte: ASTM A 255-02.

Multiplicando os fatores acima e convertendo para mm obtemos os valores de DI para os aços ABNT 1045 e 4140 que são respectivamente 20,09 e 122,10.

A Figura 5 mostra as curvas de temperabilidade Jominy dos aços ABNT 1045 e ABNT 4140, obtidas experimentalmente, representados pela dureza Rockwell C (HRC) em função da distância absoluta da extremidade temperada (mm). É possível observar que o aço ABNT 4140 possui uma maior temperabilidade, visto que os valores obtidos para as durezas são superiores aos obtidos para o aço ABNT 1045. Isto está relacionado ao maior valor do carbono equivalente, que pode ser visto na equação 2, retirada de (4):

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni}{15} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr}{5} + \frac{\%Cu}{13} \quad (2)$$

Tabela 3. Carbono equivalente

ABNT	Carbono equivalente (%)
1045	0,575
4140	0,787

Fonte: Elaborado pelo autor

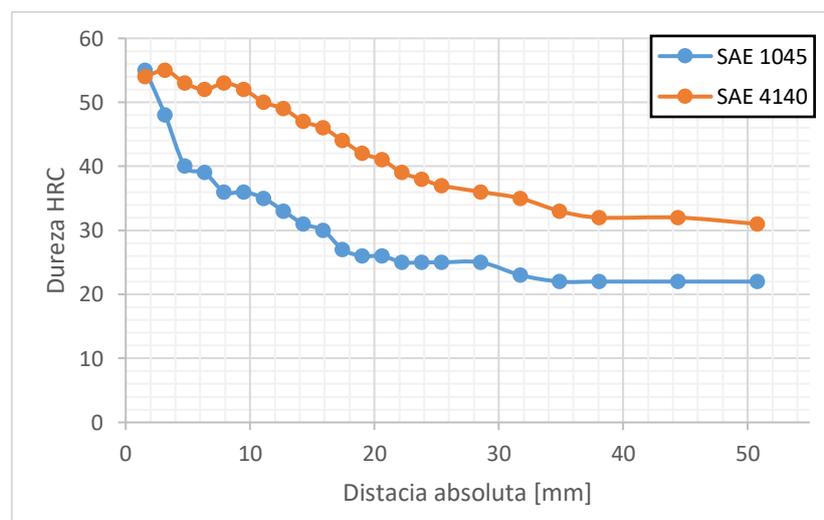


Figura 5. Curva de temperabilidade Jominy dos aços ABNT 1045 e ABNT 4140. Fonte: Elaborada pelo autor

Tanto os resultados experimentais quanto o teórico de temperabilidade confirmam a maior temperabilidade do aço ABNT 4140.

3.1.2 Caracterização Microestrutural

Inicialmente, foram analisadas as estruturas dos dois aços no estado de como recebidas.

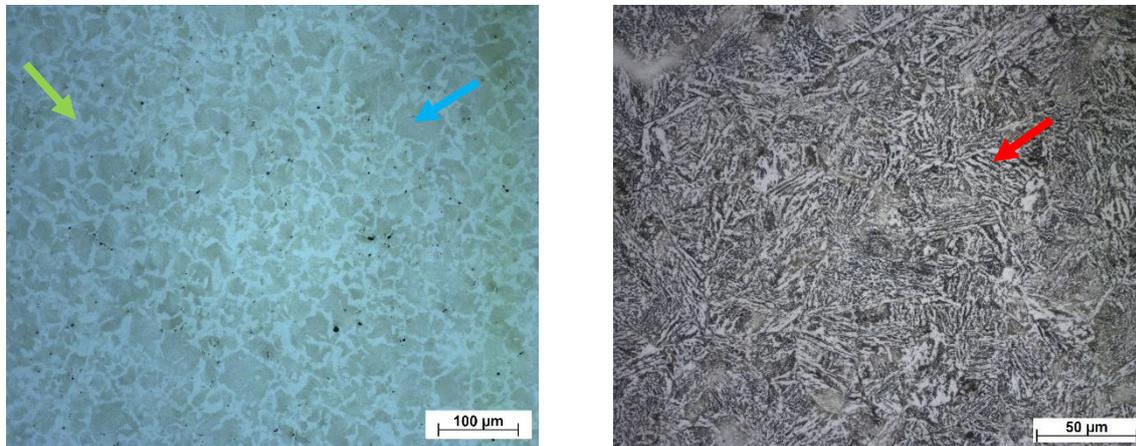


Figura 6. Micrografias de como recebidas dos aços ABNT 1045 (esquerda, 200X) e ABNT 4140 (direita, 500X). Fonte: Elaborada pelo autor.

Nas micrografias acima, viu-se que no aço 1045 apresentava estrutura predominantemente perlítica em amarelo, e com ferrita pró-eutetóide nos contornos de grão, indicado em verde enquanto o aço 4140 apresentava estrutura martensítica indicada em vermelho.

Foi analisado individualmente, as imagens das amostras de cada aço a partir da superfície resfriada.

Na figura 7 e as seguintes, exibem as imagens a partir da extremidade resfriada do aço 1045, onde foi possível perceber formação de estrutura martensítica em grande parte da amostra, como indicado em vermelho

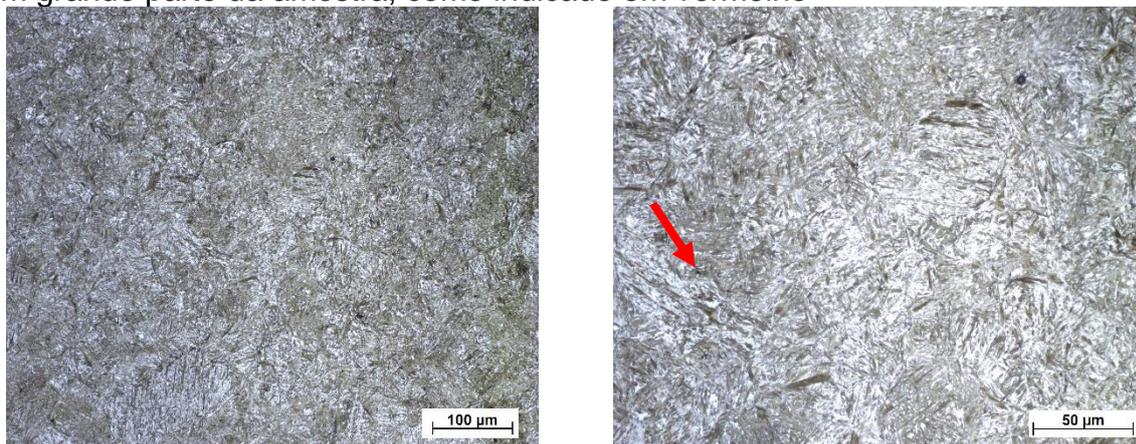


Figura 7. Micrografias de peças na extremidade resfriada do corpo de prova de aço ABNT 1045 com magnificação de 200X (esquerda) e 500X (direita). Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da segunda amostra, foi visualizado diferenças na estrutura. Na figura 8, foi visto a formação de ferrita em morfologia widmanstatten indicada em verde, na matriz austenítica, em amarelo, além de formada em pequenas regiões, estrutura bainítica indicada em azul.

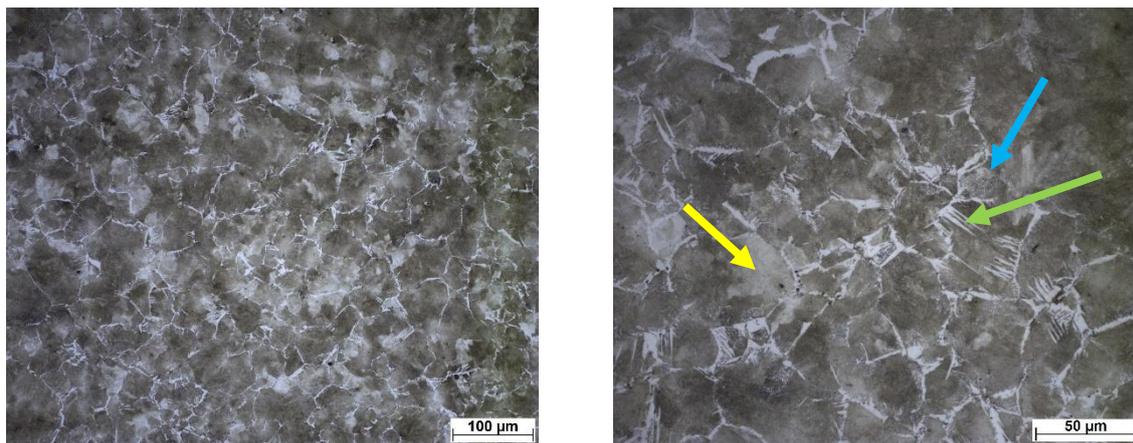


Figura 8. Micrografias de peças a 12,5 mm da extremidade resfriada do corpo de prova de aço ABNT 1045 com magnificação de 200X (esquerda) e 500X (direita). Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 9 percebeu-se a presença de estrutura perlítica (azul) mais distribuída e aparente na matriz bainítica (amarelo), com presença de ferrita alotromórfica no contorno de grão indicada em verde.

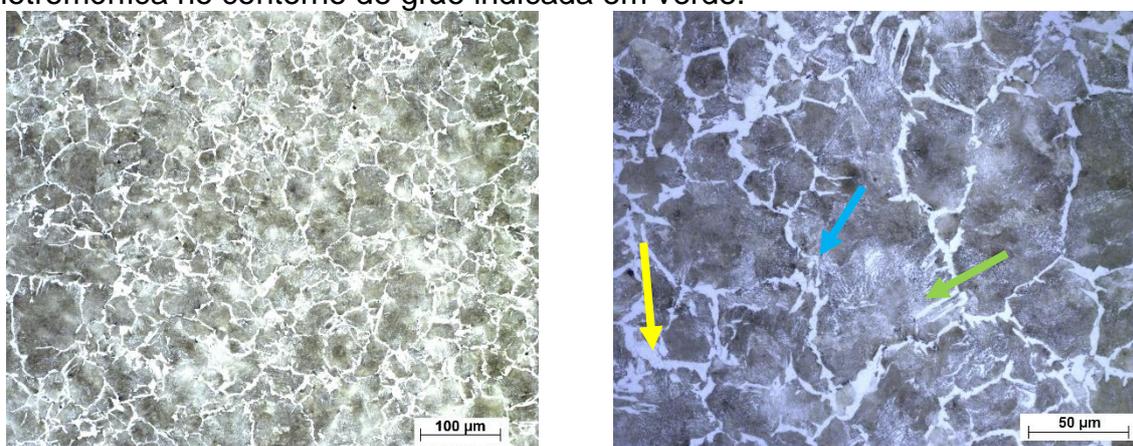


Figura 9. Micrografias de peças a 25 mm da extremidade resfriada do corpo de prova de aço ABNT 1045 com magnificação de 200X (esquerda) e 500X (direita). Fonte: Elaborada pelo autor

Na figura 10, foi visualizado apenas uma matriz ferrítica (verde) com perlitas (amarelo).

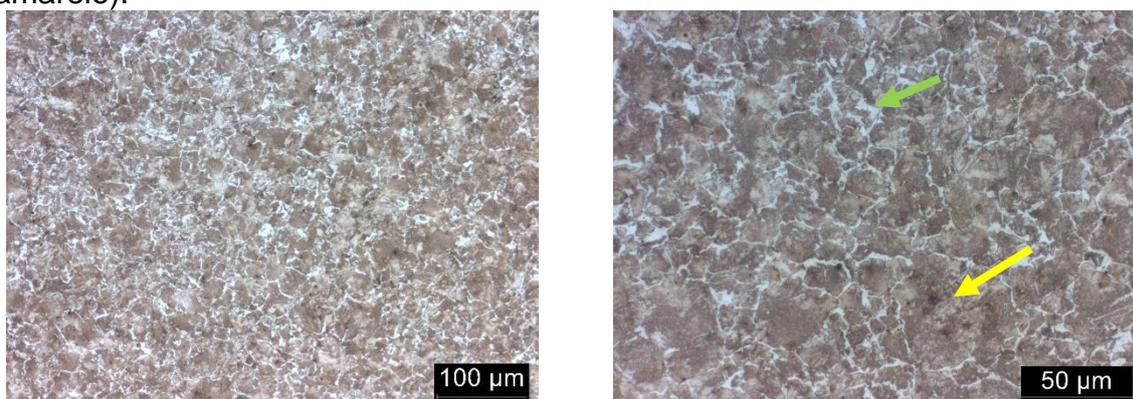


Figura 10. Micrografias de peças a 37,5 mm da extremidade resfriada do corpo de prova de aço ABNT 1045 com magnificação de 200X (esquerda) e 500X (direita). Fonte: Elaborada pelo autor.

As figuras 11, 12, 13 e 14 mostram as imagens a partir da extremidade resfriada do aço 4140.

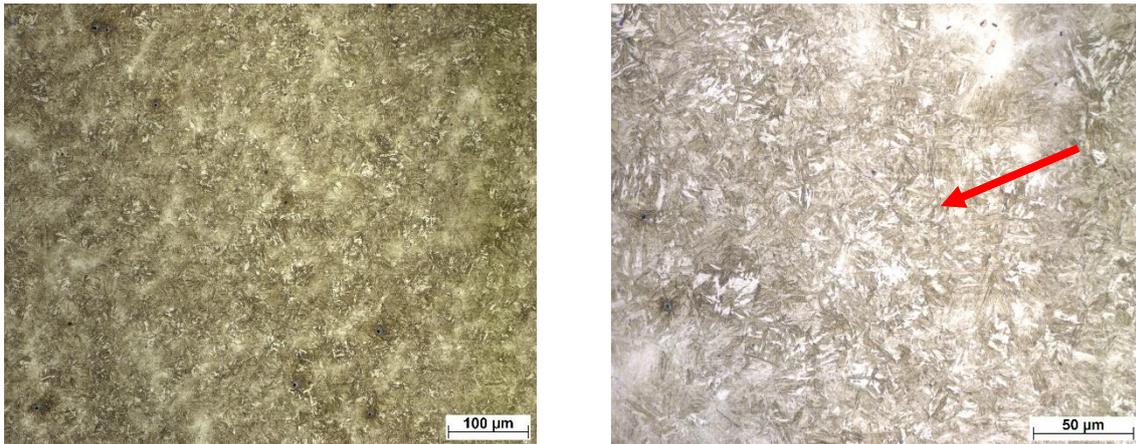


Figura 11. Micrografias de peças na extremidade resfriada do corpo de prova de aço ABNT 4140 com magnificação de 200X (esquerda) e 500X (direita). Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura 11, obteve-se estrutura martensítica formada em toda a região analisada indicada em vermelho.

A figura 12 mostrou estrutura martensítica (vermelho) predominante com algumas regiões contendo o começo de estrutura bainítica (laranja).

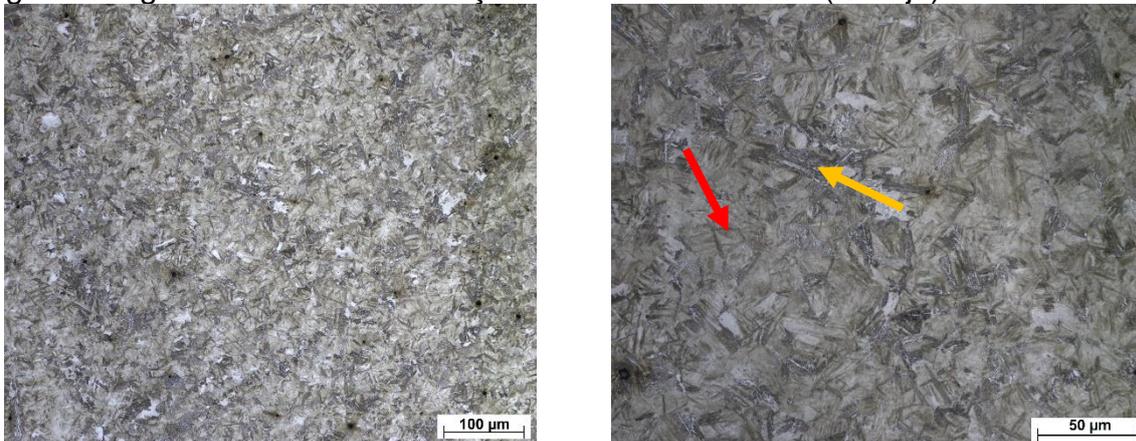


Figura 12. Micrografias de peças a 12,5 mm da extremidade resfriada do corpo de prova de aço ABNT 4140 com magnificação de 200X (esquerda) e 500X (direita). Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura 13 podemos observamos uma estrutura martensítica (vermelho), com a formação também de estrutura bainítica (laranja) mesclada com estrutura perlítica (azul).

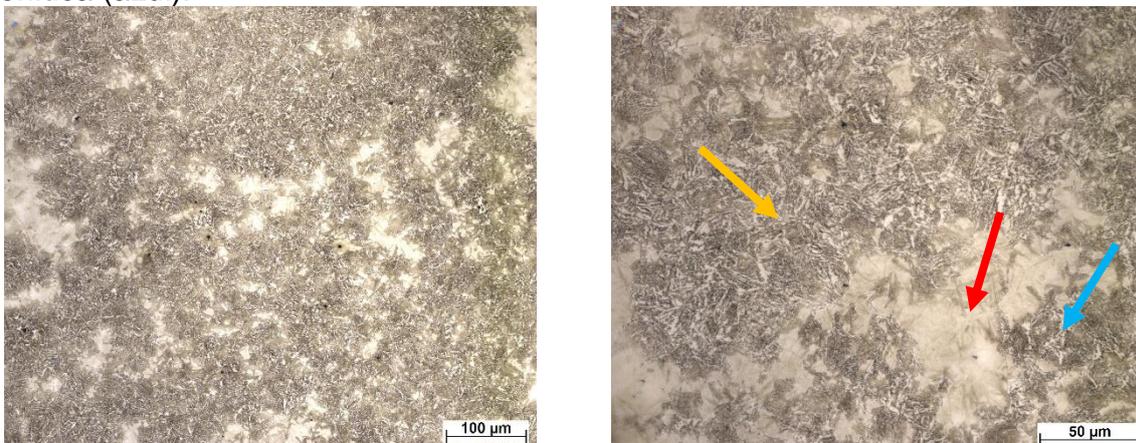


Figura 13. Micrografias de peças a 25 mm da extremidade resfriada do corpo de prova de aço ABNT 4140 com magnificação de 200X (esquerda) e 500X (direita). Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 14 temos uma estrutura predominantemente perlítica (azul) com formações bainíticas (laranja) e martensíticas (vermelho) presentes entre os grãos de perlita.

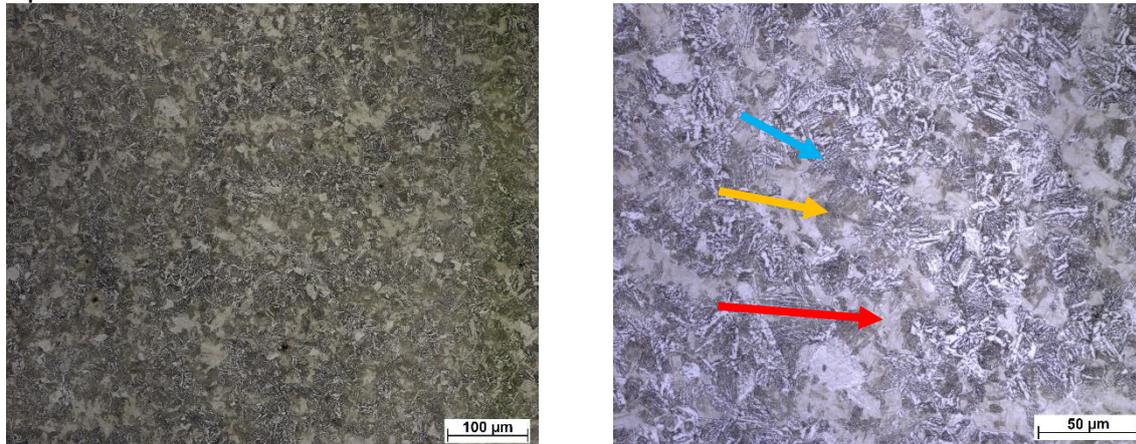


Figura 14. Micrografias de peças a 37,5 mm da extremidade resfriada do corpo de prova de aço ABNT 4140 com magnificação de 200X (esquerda) e 500X (direita). Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Discussão

Na amostra de aço ABNT 1045 houve uma evolução microestrutural de uma estrutura predominantemente martensítica na região que ficou em contato com a água, que apresenta uma alta taxa de resfriamento, para uma estrutura perlítica em uma matriz de ferrita proeutetóide na região de menor taxa de resfriamento. Porém se pode observar que houve uma menor profundidade de formação de fases não-difusionais (martensita e bainita) assim evidenciando a queda mais rápida de sua curva jominy.

Na amostra de aço ABNT 4140 a evolução microestrutural foi menor em relação ao aço ABNT1045 devido à presença de elementos de liga que desloca a curva ttt deste material para a direita evidenciando uma maior temperabilidade do material. Na região da face temperada temos uma estrutura quase que em sua totalidade martensítica, e na região mais distante da face temperada temos uma estrutura perlítica com presença de martensita e bainita entre os grãos de perlita. Assim evidencia a maior temperabilidade do aço 4140, pois há maior formação de estruturas mais duras ao longo de todo o comprimento da peça.

Partindo dos resultados da Figura 5, o ABNT 4140 exhibe uma maior temperabilidade que o ABNT 1045. Isso pode ser constatado na medida de dureza HRC que é aproximadamente igual na extremidade resfriada, 55 HRC para o ABNT 1045 e 54 HRC para o ABNT 4140, pois é a região que mais tende a formar martensita, acarretando assim em uma maior dureza. Já ao longo do corpo de prova é possível notar que o ABNT 4140 manteve uma dureza mais elevada que o ABNT 1045. Isso ocorre devido ao fato que o aumento no carbono equivalente desloca a curva do diagrama TTT para a direita, reduzindo a velocidade crítica de resfriamento, o que permite a formação de martensita para menores gradientes de transferência de calor.

A notável diferença da dureza entre a extremidade inferior, temperada no ensaio Jominy, e a extremidade superior é devido ao gradiente de transferência de calor através da amostra, o que resulta em diferentes transformações de fases ao longo do corpo de prova, formando diferentes microestruturas.

Foi realizado uma simulação da curva de resfriamento das duas extremidades para um aço genérico utilizando o programa de simulação em elementos finitos, ANSYS com os parâmetros referentes ao ensaio Jominy (5).

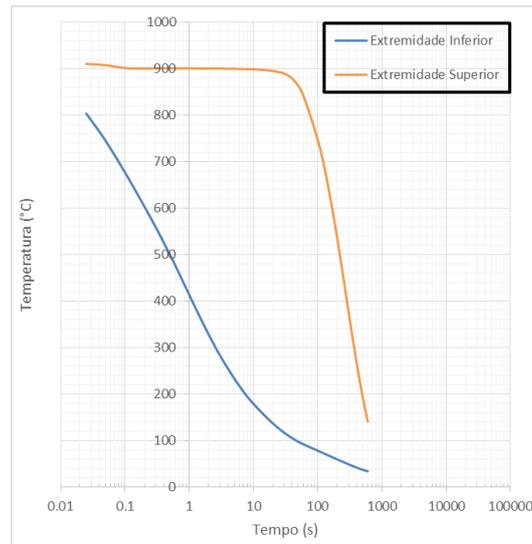


Figura 15. Simulação da curva de resfriamento para um aço genérico. Fonte: Elaborada pelo autor

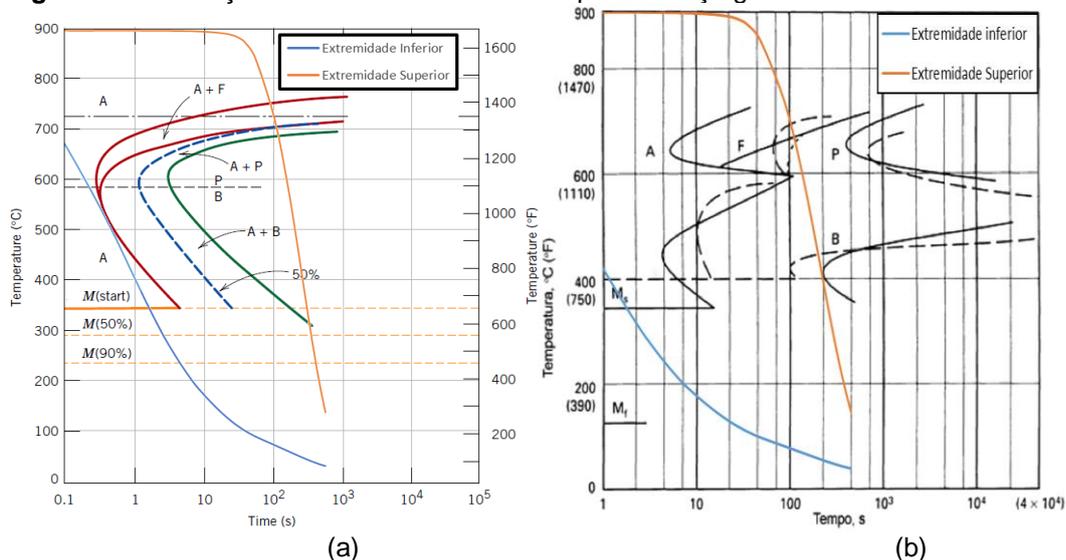


Figura 16. (a) Sobreposição do diagrama TTT do ABNT 1045 e da Figura 6, (b) Sobreposição do diagrama TTT do ABNT 4140 e da Figura 6. Fonte: (a) Callister 8ª edição, (b) www.testmat.com.br/novidades/tratamento-termico-e-grafico-curva-ttt

Devido à essa diferença, a extremidade inferior, que foi submetida a uma maior taxa de resfriamento, resultou em uma maior transformação martensítica, ao passo que a extremidade superior, que foi submetida a uma menor taxa de resfriamento, não formou martensita, resultando em uma estrutura mais macia.

4 CONCLUSÃO

Após a análise e interpretação dos resultados, é possível afirmar que o ABNT 4140 é mais temperável que o ABNT 1045, visto que o primeiro manteve um perfil de dureza mais uniforme ao longo do eixo resfriado como visto na Figura 5. Isso se deve principalmente aos elementos de liga presentes, levando em consideração que a porcentagem de carbono das duas amostras é muito próxima. Todos os elementos de liga, com exceção do cobalto, deslocam a curva do diagrama TTT para a direita, diminuindo a taxa crítica de resfriamento, tornando assim mais suscetível a transformações martensíticas.

As micrografias realizadas apresentam uma maior formação martensítica para maiores profundidades na peça, para o ABNT 4140, confirmando os perfis de dureza obtidos. Isso ocorre visto que, para os aços, a estrutura martensítica apresenta uma maior dureza.

Agradecimentos

Agradecemos ao Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS) da Universidade Federal do Ceará - UFC por disponibilizar os corpos de prova. Ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará - UFC e ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) da Universidade Federal do Ceará - UFC por disponibilizarem os microscópios ópticos e infraestrutura para a realização dos ensaios. Ao Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE pela disponibilização do durômetro.

REFERÊNCIAS

- 1 ASTM A255 - 10. Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel, 2014.
- 2 NBR NM 87. Aço carbono e ligados para construção mecânica – Designação e composição química, 2000.
- 3 NBR NM ISO 6508-1. Materiais metálicos – Ensaio de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensaio (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T), 2008.
- 4 ASTM A 255 - 02. Standard Test Methods for Determining of Steel.
- 5 FORTES, C. Apostila de metalurgia da soldagem, 2004.
- 6 PETERSEN, J.R.B. Determinação do coeficiente de transferência de calor em um aço ABNT/ABNT 1045 através do ensaio Jominy. Dissertação de mestrado PUCRS, Porto Alegre, 2012.
- 7 Callister Jr, W. D. Uma introdução a ciências dos materiais, 2012.
- 8 Tratamento térmico e gráfico curva TTT, Disponível em: <<http://www.testmat.com.br/novidades/tratamento-termico-e-grafico-curva-ttt>> Acesso em: 13 dez. 2016.