

# Influência do Regime Transiente Sobre a Microdureza e Microestrutura nos Aços ASTM-A36 e SAE-1045 Soldados pelo Processo MAG

Nicollas Freitas de Arruda<sup>1</sup> , Jeferson José de Carvalho<sup>1</sup>, Rubelmar Maia de Azevedo Cruz Neto<sup>2</sup>, Dario Magno Batista Ferreira<sup>3</sup>, Sérgio Duarte Brandi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade de São Paulo – USP, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Faculdade Martha Falcão – FMF, Manaus, AM, Brasil.

<sup>3</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES, Vitória, ES, Brasil.

**Como citar:** Arruda NF, Carvalho JJ, Cruz Neto RMA, Ferreira DMB, Brandi SD. Influência do Regime Transiente Sobre a Microdureza e Microestrutura nos Aços ASTM-A36 e SAE-1045 Soldados pelo Processo MAG. Soldagem & Inspeção. 2019;24:e2414. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.14>

**Resumo:** O regime quase-estacionário pode não ser alcançado em soldagens a arco elétrico de peças de pequenas dimensões e/ou de materiais de maior condutividade térmica. Entretanto, o regime transiente sempre ocorrerá no início e no final da soldagem. Neste regime, a variação do fluxo de energia via calor pode promover variações microestruturais e, conseqüentemente, variações de propriedades físicas. Portanto, o objetivo deste estudo é analisar as variações de dureza e de microestrutura ao longo do cordão de solda nos regimes transiente e quase-estacionário, com o processo GMAW e consumível ER70S-6, nos aços ASTM-A36 e SAE-1045. Foram realizados cordões sobre chapa e coletados ciclos térmicos na face oposta à face soldada, a partir de termopares soldados em diferentes posições ao longo de uma linha paralela à linha central do cordão. Também foram realizados ensaio de microdureza e metalografia. Obtiveram-se maiores taxas de resfriamento no início do cordão, durante o regime transiente, resultando em maiores frações volumétricas de ferrita acicular e menores frações de ferrita de contorno de grão e de Widmanstätten. Conseqüentemente, obteve-se um aumento de dureza em torno de 20% no início do cordão, tendo-se como referência aos valores de dureza do regime quase estacionário.

**Palavras-chave:** Transferência de calor na soldagem; Regimes transiente e quase-estacionário; Microdureza Vickers; Ciclos térmicos; Processo GMAW.

## Influence of the Heat Flow Transient State on the Microstructure and Microhardness of ASTM-A36 and SAE-1045 Steels Welded by GMAW Process

**Abstract:** The quasi-stationary state may not be achieved in electrical arc welding of small parts and/or materials of higher thermal conductivity. However, the transient state will always occur at the beginning and end of the welding. In this case, the variation of the energy flow through heat can promote microstructural variations and, consequently, variations of physical properties. Therefore, the objective of this study is to analyze the hardness and microstructure variations along the weld bead in the transient and quasi-stationary states, with the GMAW process and consumable ER70S-6, in the ASTM-A36 and SAE-1045 steels. The welds were carried on plate and collected thermal cycles on the face opposite the welded face, from thermocouples welded in different positions along a line parallel to the center line of the welds. Also, microhardness test and metallography were carried out. Higher cooling rates were obtained at the beginning of the cord during the transient regime, resulting in larger volumetric fractions of acicular ferrite and smaller fractions ferrite of the grain contour and Widmanstätten. Consequently, a hardness increase was obtained at around 20% at the beginning of the weld, with reference to the hardness values of the quasi-stationary state.

**Keywords:** Heat transfer in welding; Transient and quasi-stationary states; Microhardness Vickers; Thermal cycles; GMAW process.

### 1. Introdução

A soldagem tem recebido grande interesse devido à sua versatilidade nos métodos para fusão ou união de materiais, sendo considerada um processo primordial para construção, união de peças e/ou estruturas [1]. O conhecimento teórico dos fenômenos que acontecem durante a soldagem tem despertado esse interesse. O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc*

Recebido: 08 Out., 2018. Aceito: 20 Jun., 2019.

E-mails: nicollasarruda@gmail.com (NFA), jeh.00@hotmail.com (JJC), rubelmar.neto@usp.br (RMACN), dariomagno@usp.br (DMBF), sebrandi@usp.br (SDB)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença [Creative Commons Attribution Non-Commercial](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais e que o trabalho original seja corretamente citado.

*Welding*) tornou-se amplamente utilizado substituindo grande parte das aplicações do processo SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). A sua ampla utilização está relacionada às suas vantagens, sendo as principais: soldagens em altas velocidades, pode ser executada em todas as posições, alta taxa de deposição, maior penetração, alimentação contínua e não há necessidade de remoção de escória [2].

Na soldagem, necessita-se conhecer a intensidade do fluxo de energia via calor durante a soldagem, *i.e.*, conhecer as temperaturas máximas e as velocidades de resfriamento, uma vez que as transformações de fase, as propriedades finais e as tensões/deformações da junta soldada resultam dos mesmos [3,4]. Em vista disso, frequentemente os profissionais de soldagem realizam estimativas das taxas e tempos de resfriamento através do uso de equações preditivas, tendo como finalidade obter informações acerca das transformações de fase anteriormente a execução da soldagem. Estando estas equações em função dos parâmetros de soldagem, dimensões e materiais das peças a serem unidas. Entretanto, as equações preditivas de taxas e tempos de resfriamento, oriundas dos modelos analíticos, são válidas apenas se o regime *quase-estacionário* for de fato alcançado durante a soldagem. O regime *quase-estacionário* foi primeiramente definido por Rosenthal [5], em seu trabalho clássico de 1941, assumindo-se um observador posicionado na fonte de calor (arco elétrico), o regime *quase-estacionário* será alcançado a partir do momento que o observador não notar variação na distribuição de temperaturas a sua volta [5]. Todavia, pode-se imaginar que o regime *quase-estacionário* pode não ser alcançado em soldagens a arco de peças de pequenas dimensões e/ou de materiais de maior condutividade térmica (ligas de alumínio). Por outro lado, o regime *transiente*, inerentemente ao processo, sempre ocorrerá no início e no final da soldagem. Portanto, poder-se-ia presumir uma variação do fluxo de energia via calor no início do cordão, resultando em possíveis variações microestruturais e, conseqüentemente, variações de propriedades mecânicas.

Tanto em aplicações na indústria quanto em laboratórios de pesquisa são adotadas duas hipóteses em relação ao regime *transiente* na soldagem. A primeira é que a duração do regime *transiente* é curta em relação ao tempo total de soldagem. A segunda hipótese é que a variação do fluxo de energia via calor durante o regime *transiente* cause variações nas propriedades físicas no início do cordão. Vale atentar que a segunda hipótese é adotada, implicitamente ou explicitamente, ao se utilizar da prática de descartar trechos do início e fim do cordão para as análises microestruturais e/ou confecção de corpos de prova para ensaios destrutivos.

Em 1991, Granjon [6] desenvolve uma metodologia para identificar a transição do regime *transiente* para o regime *quase-estacionário* na soldagem a arco, *i.e.*, momento do término do regime *transiente* do início da soldagem. A metodologia proposta consiste em observar a evolução das temperaturas máximas dos ciclos térmicos, posicionando-se os termopares em uma linha paralela à linha central do cordão de solda. O regime *quase-estacionário* é alcançado a partir do momento em que fossem obtidos valores redundantes de temperaturas máximas e/ou taxas de resfriamentos dos ciclos térmicos.

Dentro do contexto exposto, o objetivo deste trabalho é analisar a influência do regime transiente sobre a dureza e variações microestruturais ao longo do cordão de solda obtido com o processo GMAW, com metal de adição ER70S-6, nos aços ASTM-A36 e SAE-1045, nos regimes *transiente* e *quase-estacionário* da transferência de energia via calor.

## 2. Metodologia Experimental

Para realização das soldagens foram utilizadas duas chapas de dimensões 200 mm × 120 mm × 6,35 mm (comprimento × largura × espessura), dos aços ASTM-A36 e SAE-1045 por possuírem temperabilidades diferentes. A vazão do gás foi de 15 l/min sendo uma mistura de 75%Ar-25%CO<sub>2</sub>, metal de adição ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm, mantendo a distância do bocal e a peça (DBCP) em 12 mm, velocidade de alimentação do eletrodo em 3,6 m/min. A tensão nominal foi de 19 V. Utilizou-se um deslocador linear mecanizado para manter a velocidade de soldagem constante no valor de 5,34 mm/s. Foi realizado um cordão sobre chapa, para cada material, com comprimento de 100 mm centralizados conforme mostra a Figura 1. As chapas foram esmerilhadas para remoção de óxidos existentes em suas superfícies para não influenciar na emissividade das chapas [7]. Pode ser observado na Tabela 1 a composição química dos metais de base e do arame consumível.

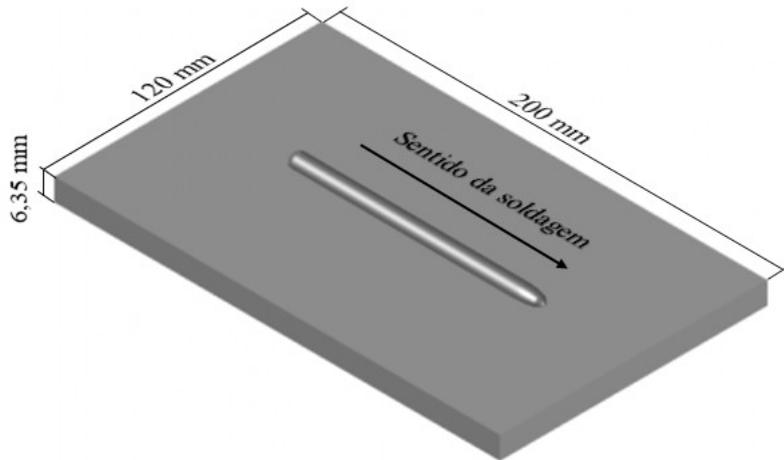


Figura 1. Esquema do cordão sobre chapa.

Tabela 1. Composição química dos metais de base e do arame consumível.

(%)	ASTM-A36	SAE-1045	ER70S-6
C	0,140	0,480	0,083
Si	0,007	0,200	0,830
Mn	0,546	0,650	1,430
P	0,017	0,024	0,013
S	0,010	0,004	0,015
Cr	0,014	0,020	0,027
Mo	-	-	0,010
Ni	0,006	0,010	0,019
V	0,001	0,001	0,002
Cu	-	-	0,100
CE*	0,251	0,594	0,337

$$CE_{IIW} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \left( \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \right) + \left( \frac{\%Cu + \%Ni}{15} \right)$$

\*Carbono equivalente (CE) foi calculado segundo o IIW (*International Institute of Welding*).

### 2.1. Aquisição de dados

Os dados instantâneos de tensão, corrente e temperatura dos ciclos térmicos obtidos através de termopares foram coletados com um sistema de aquisição (Figura 2) com uma taxa de 5000 pontos por segundo durante todo tempo de arco aberto. Os valores médios dos parâmetros estão apresentados na Tabela 2. A energia de soldagem foi calculada pelo cálculo da potência média instantânea.

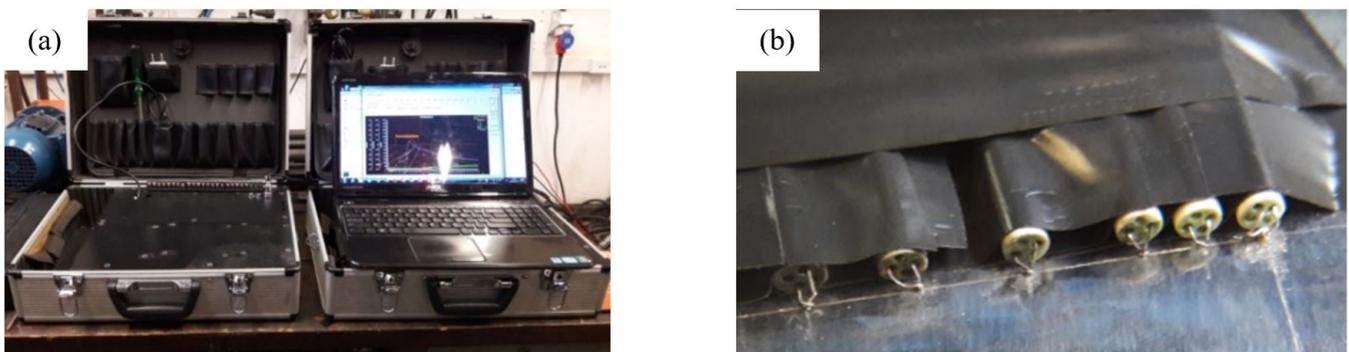


Figura 2. Aquisição de dados durante o processo de soldagem. (a) Sistema de aquisição de dados de tensão, corrente e temperatura; (b) Termopares soldados.

**Tabela 2.** Parâmetros de soldagem.

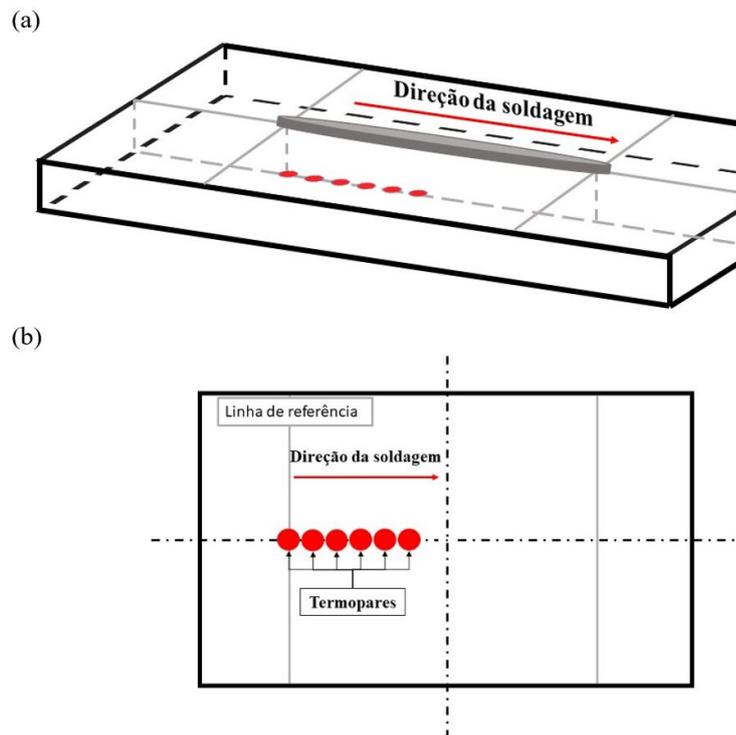
Material	Tensão Média (V)	Corrente Média (A)	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Potência Instantânea Média (W)	Ha* (J/mm)
ASTM-A36	22,67	158,07	5,35	3575,36	668,92
SAE-1045	22,65	160,24	5,35	3642,40	681,46

\*Ha representa energia de soldagem (sem o fator de eficiência) em Joule por milímetros.

## 2.2. Soldagem dos termopares

Conforme citado anteriormente, Granjon [6] desenvolveu uma metodologia para a determinação do início do regime quase estacionário, sugerindo soldar termopares, na face soldada, ao longo de uma linha paralela à linha central do cordão. Utilizou-se no presente estudo uma versão modificada da metodologia de Granjon [6], desenvolvida por Cruz [8], soldando-se os termopares na linha central do cordão, na face oposta à face soldada, e não na face soldada como Granjon [6] propusera. Sendo o primeiro termopar posicionado diretamente abaixo do ponto de abertura do arco, podendo-se visualizar o esquema proposto na Figura 3.

Para a soldagem dos termopares Tipo K, utilizou-se uma fonte capacitiva, que ocasiona um curto circuito entre os termopares e a chapa. Os termopares foram soldados ao longo da linha paralela à linha central do cordão, para o ASTM-A36, foram soldados em 0, 6, 12, 20, 30 e 40 mm em relação à referência, projeção do ponto de abertura do arco na face oposta, e para o SAE-1045, foram soldados em 0, 6, 12, 24, 40 e 48 mm. Para cada material foram obtidos três ciclos térmicos.



**Figura 3.** Soldagem dos termopares. (a) posição dos termopares em relação ao ponto de abertura do arco; (b) face oposta à soldagem.

## 2.3. Preparação metalográfica

A caracterização dos cordões sobre chapa dos aços ASTM-A36 e SAE-1045 foram realizadas através da macrografia, mapeamento de microdureza e micrografia. Foram analisadas seis seções transversais ao cordão de solda de cada chapa indicadas pelas linhas tracejadas em vermelho (Figura 4), realizando-se os cortes transversais em aproximadamente 0 mm, 8 mm, 16 mm, 24 mm, 32 mm e 40 mm em relação ao ponto de abertura do arco.

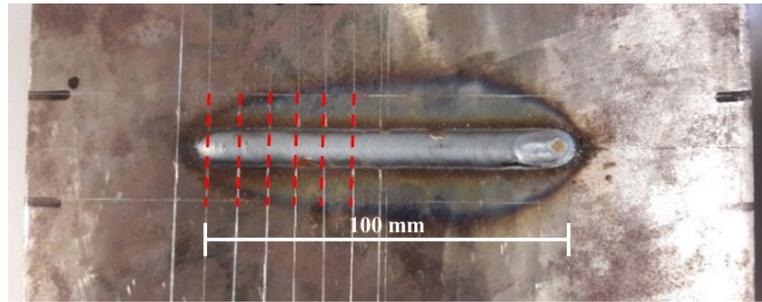


Figura 4. Esquema das seções transversais do cordão sobre chapa para análise metalográfica e de dureza.

Para a determinação da influência do regime transiente no formato do cordão e microestrutura da zona fundida, foram confeccionados corpos de prova (CP) a partir dos cortes descritos na Figura 4. Foi utilizada uma lupa com lente objetiva de 0,3 e aumento de 3,2 vezes, para realizar as fotografias para cálculo da diluição, e para dimensionar a penetração, altura do reforço, extensão da zona afetada pelo calor (ZAC) e suas respectivas sub-regiões. As amostras tiveram as seções analisadas, sendo estas polidas com pasta de diamante até  $1\ \mu\text{m}$  e atacadas com reagente químico em uma solução de ácido nítrico  $2\ \text{ml}$  ( $\text{HNO}_3$ ) +  $98\ \text{ml}$  de álcool etílico ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ) (Nital 2%). Através de microscopia óptica, foram obtidas as micrografias da zona fundida (Figura 5a) na linha central da face (linha de referência).

Os mapas de microdureza foram obtidos através da técnica de microdureza *Vickers*, nos dois aços foram realizados em torno de 900 impressões com a carga de  $500\ \text{g}$  e espaçamento de  $0,3\ \text{mm}$  (Figura 5b).

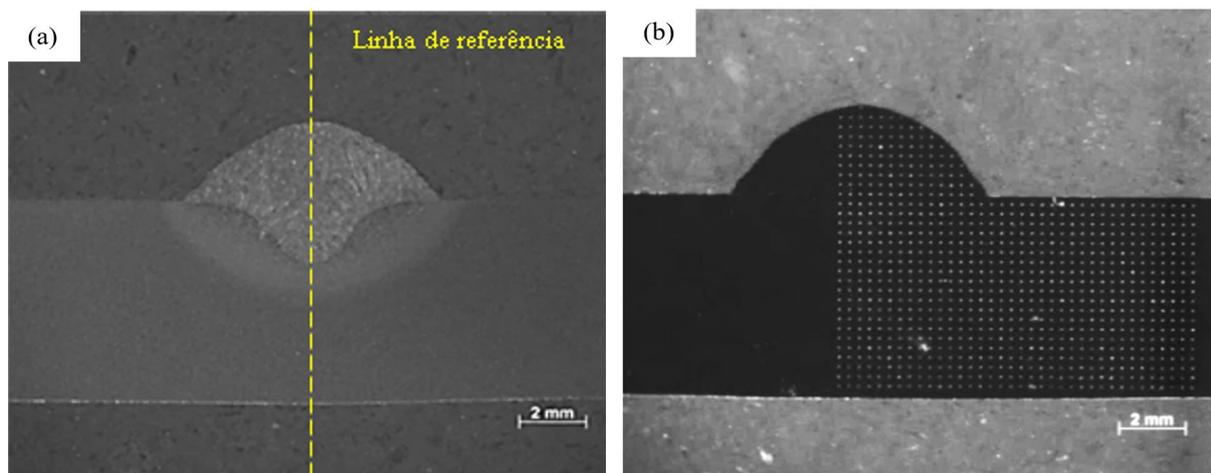
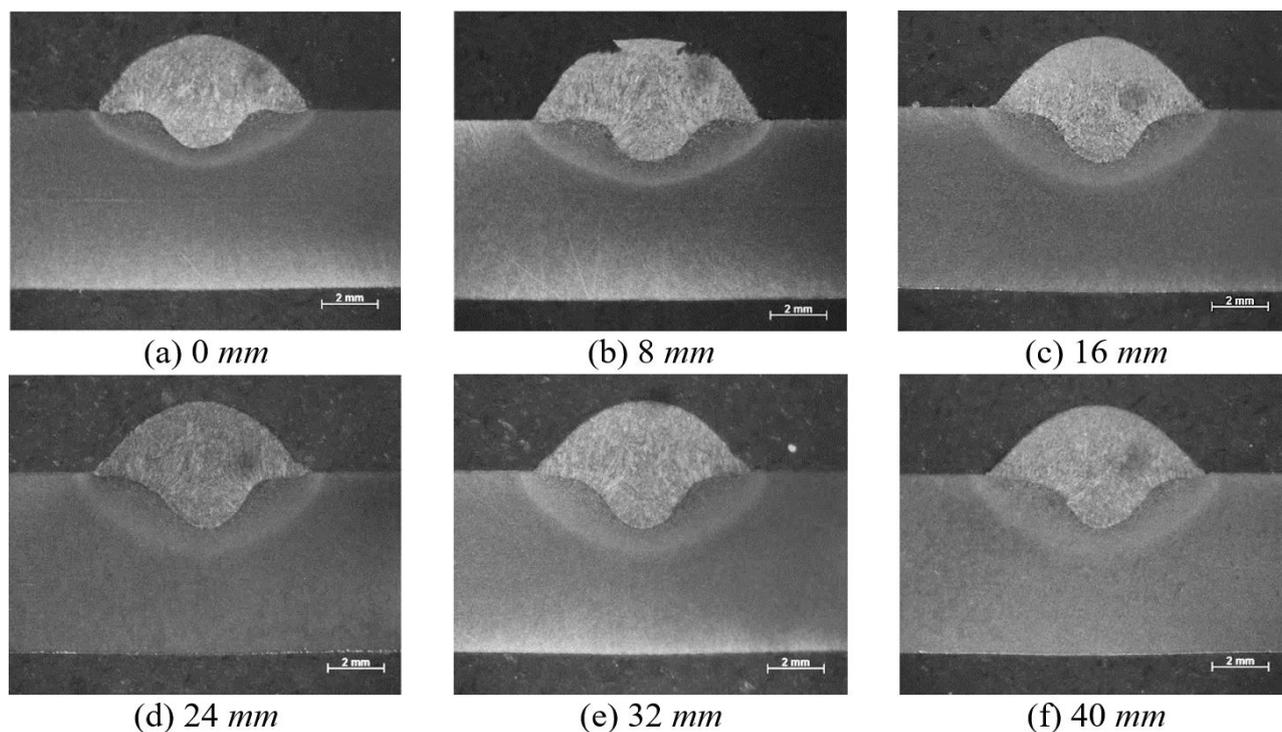


Figura 5. Demonstração das regiões de referência para caracterização microestrutural. (a) macrografia com a linha central em sua transversal; (b) macrografia do mapa de impressões de microdureza realizada após o ensaio de microdureza *Vickers*.

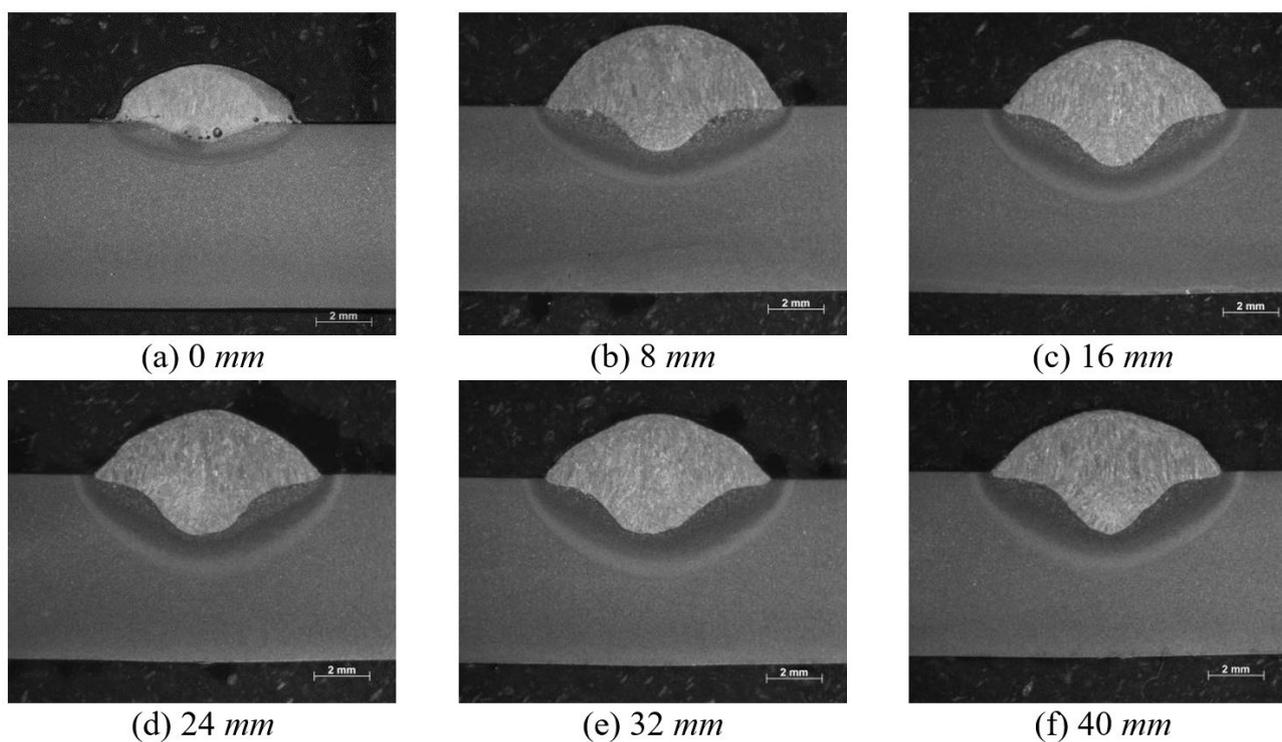
### 3. Resultados e Discussões

#### 3.1. Macrografias

A Figura 6 apresenta as macrografias das seções transversais do cordão de solda em 0, 8, 16, 24 e 32 e 40 mm em relação ao ponto de abertura do arco do aço ASTM-A36 (CP1A, CP2A, CP3A, CP4A, CP5A e CP6A), e a Figura 7 apresenta as seções transversais do cordão na mesma referência para o SAE-1045 (CP1B, CP2B, CP3B, CP4B, CP5B e CP6B). A Tabela 3 apresenta os parâmetros dimensionais do cordão de solda para ambos os materiais. Através das macrografias (Figura 6 e Figura 7) nota-se que ambos os materiais apresentaram a mesma tendência, *i.e.*, apresentam aumento dos parâmetros dimensionais até a face em 24 mm. Analisando os dados da Tabela 3, observou-se que os valores dos parâmetros dimensionais se mantiveram próximos a partir dos CP4A e CP4B. Portanto, elabora-se a hipótese que o regime *quase-estacionário* pode ter sido alcançado para as três últimas seções de ambos os materiais (CP4A, CP5A, CP6A, CP4B, CP5B e CP6B).



**Figura 6.** Conjunto de macrografias das seções transversais do cordão de solda do aço ASTM-A36. (a) CP1A; (b) CP2A; (c) CP3A; (d) CP4A; (e) CP5A; (f) CP6A.



**Figura 7.** Conjunto de macrografias das seções transversais do cordão de solda do aço SAE-1045. (a) CP1B; (b) CP2B; (c) CP3B; (d) CP4B; (e) CP5B; (f) CP6B.

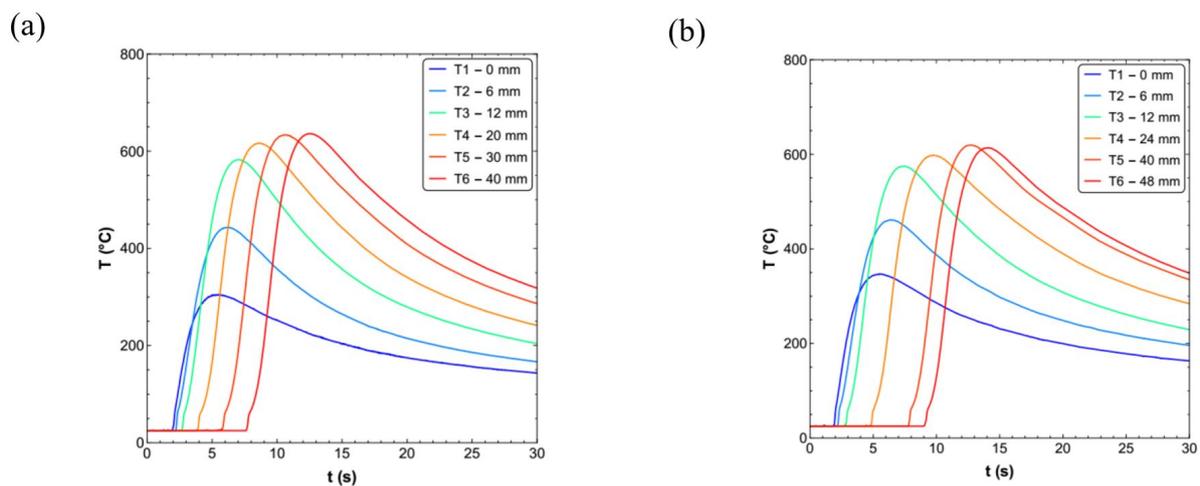
**Tabela 3.** Parâmetros dimensionais dos cordões de solda dos aços ASTM-A36 e SAE-1045.

		h (mm)	l (mm)	pc (mm)	ez (mm)	δ (%)
CPA	1	2,73	7,54	1,48	0,80	19,83
	2	3,02	8,21	1,49	0,89	18,62
	3	2,58	7,86	2,03	0,90	31,01
	4	2,58	7,87	2,06	1,01	34,12
	5	2,53	7,83	2,13	1,03	33,55
	6	2,53	7,91	1,94	1,16	33,39
CPB	1	2,17	7,70	0,67	0,85	13,41
	2	2,95	8,57	1,63	1,36	21,74
	3	2,50	8,09	2,10	1,46	35,39
	4	2,34	8,21	2,13	1,54	40,19
	5	2,37	8,15	2,01	1,75	38,23
	6	2,24	8,32	2,32	1,39	38,61

h = representa a altura do reforço; l = largura do cordão; pc = penetração; ez = extensão da ZAC; δ = diluição.

### 3.2. Ciclos térmicos de soldagem

A Figura 8 apresenta os ciclos térmicos experimentais das soldagens de ambos os materiais, obtidos através dos termopares posicionados, conforme apresentado na Figura 3. Pode-se observar que as temperaturas máximas dos ciclos térmicos apresentam valores próximos para os três termopares mais distantes (T4, T5 e T6), em relação ao ponto de abertura do arco, para ambos os materiais.



**Figura 8.** Curvas de ciclos térmicos relacionando temperatura pelo tempo de soldagem. A denominação dada por T1 à T6 refere-se à numeração dos termopares. (a) aço ASTM-A36; (b) aço SAE-1045.

A partir dos valores máximos alcançados em cada ciclo térmico em função das posições de cada termopar em relação ao ponto de abertura do arco, pode-se implementar a metodologia descrita por Granjon [6], aproximando-se as funções exponenciais assintóticas apresentadas na Figura 9, obteve-se os valores de  $R^2$  ajustado de 0,97 para ambos os materiais. Segundo Granjon [6], pode-se considerar que o regime *quase-estacionário* foi alcançado quando a função exponencial assintótica se aproxima da sua respectiva reta assintótica. Desta forma, pode-se definir que o regime *quase-estacionário* foi alcançado a partir de aproximadamente 20 mm em relação ao início do cordão (ponto de abertura do arco), para ambos os materiais. Este resultado constata o que havia sido evidenciado através da análise dos parâmetros dimensionais apresentados na Tabela 3, ou seja, constatando a hipótese de que as três últimas seções de ambos os materiais já estavam no regime *quase-estacionário* é verdadeira.

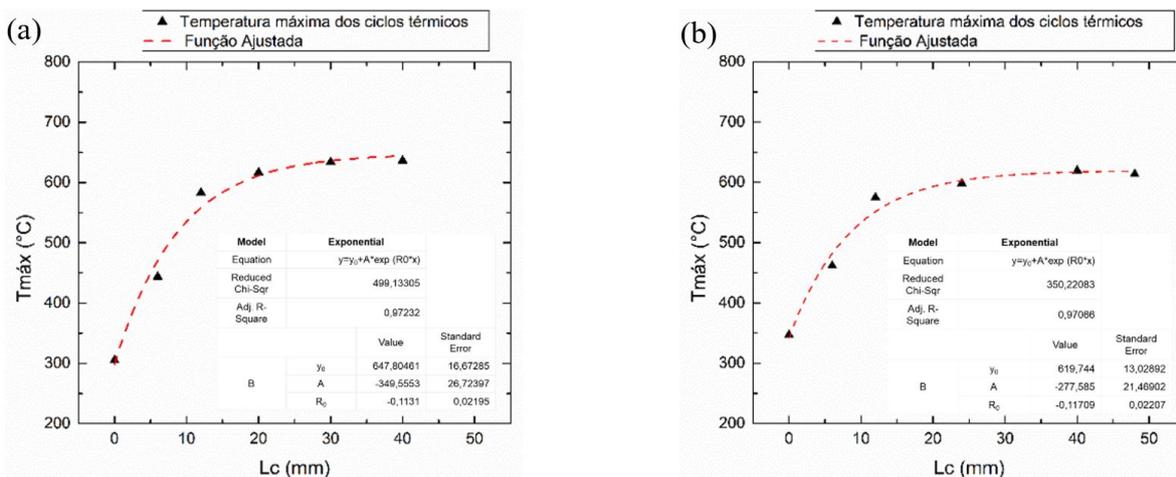


Figura 9. Curvas ajustadas em função das temperaturas máximas ( $T_{m\acute{a}x}$ ) e comprimento do cordão (Lc) em relação ao ponto de início do cordão de solda. (a) aço ASTM-A36; (b) aço SAE-1045.

### 3.3. Microdureza

A Figura 10 apresenta os mapas de microdureza no aço ASTM-A36, nota-se a ocorrência de elevada dureza da zona fundida no início do cordão de solda (CP1A), diminuindo com a progressão da soldagem, alcançando valores próximos no regime *quase-estacionário* como pode ser observado nas Figura 10d, Figura 10e e Figura 10f (CP4A, CP5A e CP6A). A Figura 11 apresenta os mapas de microdureza no aço SAE-1045, sendo observada a mesma tendência de diminuição da dureza ao longo do cordão de solda até o regime *quase-estacionário* ser alcançado (Figura 11d, Figura 11e e Figura 11f). No entanto, os valores máximos de dureza do SAE-1045 ocorrem na ZAC e não na zona fundida como ocorreu no ASTM-A36 devido ao maior carbono equivalente do SAE-1045 comparado ao ASTM-A36 (Tabela 1).

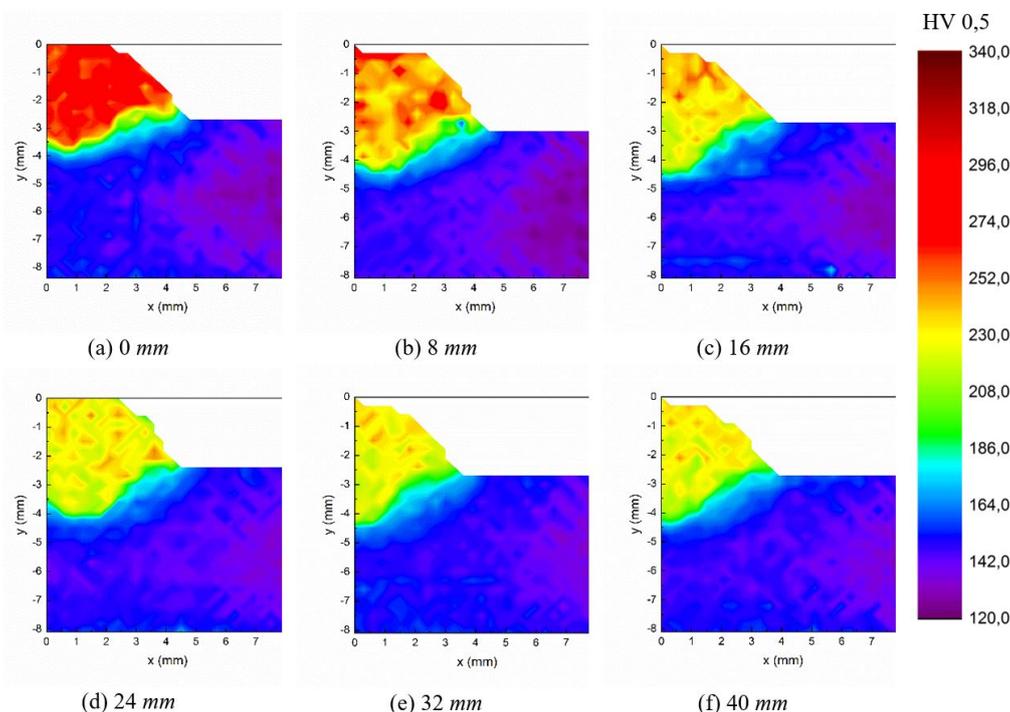
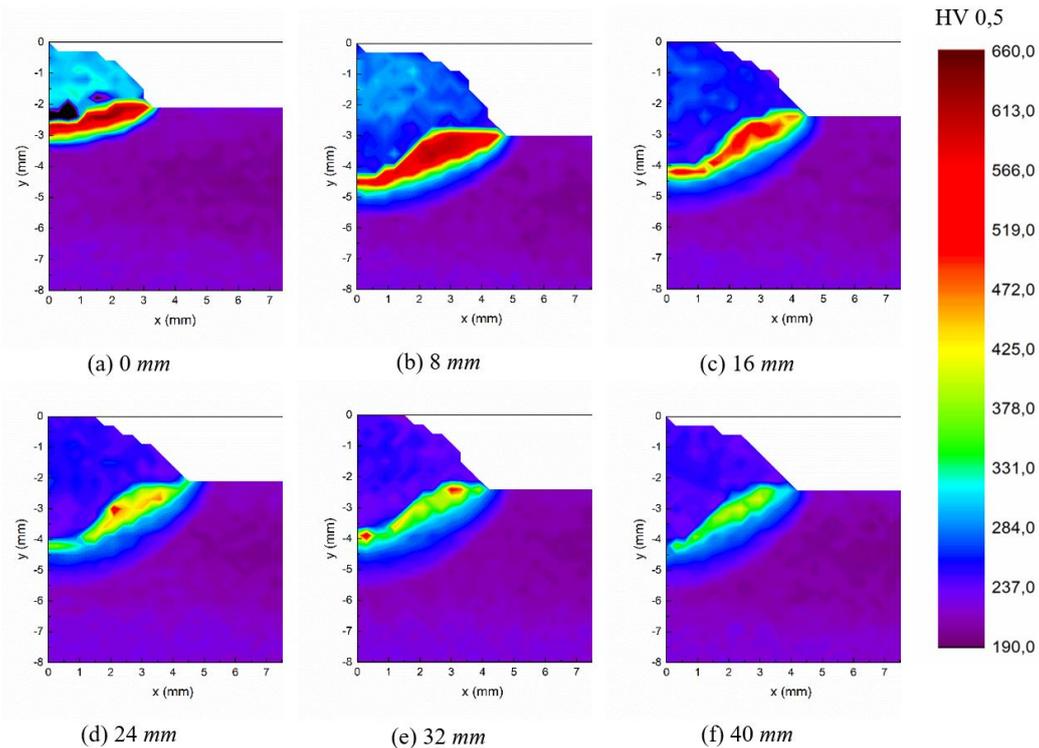
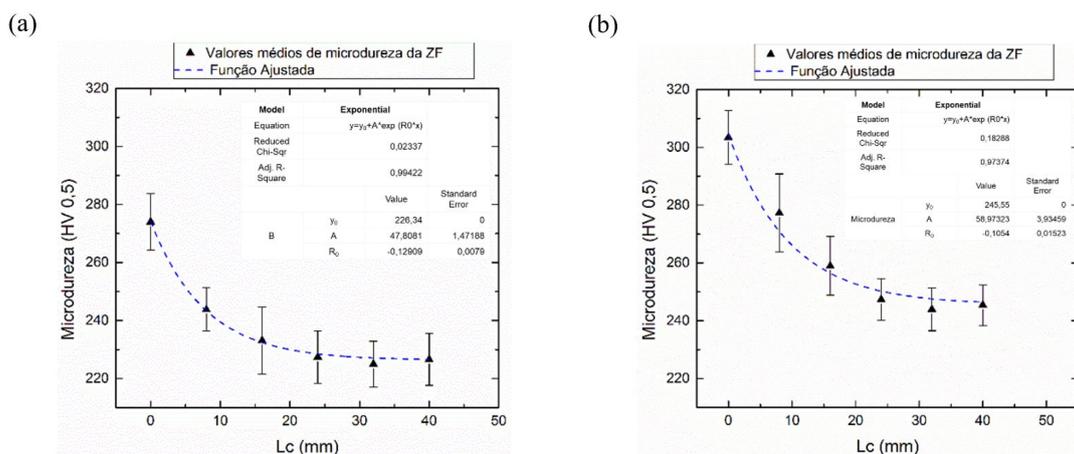


Figura 10. Mapas de microdureza em escala *Vickers* (*Hardness Vickers - HV*) no aço ASTM-A36 com carga de 500 g das seções transversais do cordão de solda. (a) CP1A; (b) CP2A; (c) CP3A; (d) CP4A; (e) CP5A; (f) CP6A.



**Figura 11.** Mapas de microdureza em escala *Vickers* (*Hardness Vickers* - HV) no aço SAE-1045 com carga de 500 g das seções transversais do cordão de solda. (a) CP1B; (b) CP2B; (c) CP3B; (d) CP4B; (e) CP5B; (f) CP6B.

Para um melhor entendimento da variação de dureza ao longo do cordão, foram calculadas as médias de microdureza da zona fundida a partir de 10 pontos posicionados na linha de referência (Figura 5a), linha vertical no centro de cada face. A Figura 12 apresenta o gráfico das médias de microdureza em relação ao comprimento do cordão de solda. As curvas de ajuste (exponenciais assintóticas) foram obtidas via regressões não lineares através do *software Origin*<sup>®</sup>. As curvas exponenciais assintóticas ficaram bem ajustadas aos valores de microdureza, obtendo-se valores do *R<sup>2</sup> Ajustado* de 0,99 e 0,97, respectivamente, para os aços ASTM-A36 e SAE-1045. A partir do início do regime *quase-estacionário*, poder-se-ia esperar que não houvesse variação das propriedades físicas do material ao longo do cordão, visto que o fluxo de energia via calor teria se estabilizado.



**Figura 12.** Curvas ajustadas das médias de microdureza da zona fundida. (a) aço ASTM-A36; (b) aço SAE-1045.

Com o intuito de averiguar se o regime *quase-estacionário* havia sido de fato alcançado próximo aos 20 mm de comprimento do cordão, realizou-se análise de variância (ANOVA – *Teste Tukey*, Intervalo de Confiança de 95%) das médias (40 pontos) de microdureza das seis seções de cada material, com o apoio do *software MINITAB*<sup>®</sup>. Através dos resultados da

ANOVA (Figura 13) pode-se confirmar, como esperado, diferenças entre as médias de microdureza não significativas, constatando a eficácia da metodologia de Granjon [6] em prever o início do regime *quase-estacionário*. Para a ANOVA do aço ASTM-A36, Figura 13, a comparação de microdureza dos Lc's 24-32 mm, 24-40 mm e 32-40 mm não apresentam diferenças significativa de microdureza. Os pares 0-16 mm, 8-16 mm, 16-32 mm e 16-40 mm apresentaram diferença significativa nos valores de microdureza. Quando comparado Lc 8-16 mm, observa-se que não há diferença significativa, porém, tanto 8 mm quanto 16 mm mostram-se diferentes de 24, 32 e 40 mm. Já para a ANOVA do aço SAE-1045, apresentado na Figura 14, a comparação de microdureza se apresenta de maneira semelhante. Nota-se que os Lc's 24-32 mm, 24-40 mm e 32-40 mm não apresentam diferenças de microdureza significativa. Os pares 0-16 mm, 8-16 mm, 16-32 mm e 16-40 mm apresentaram valores de microdureza diferentes entre os pares de comprimentos de Lc. Portanto, considerou-se como referência o valor em comum obtido, ou seja, adotou-se que o regime *quase-estacionário* teve o seu início em 24 mm para ambos os aços estudados.

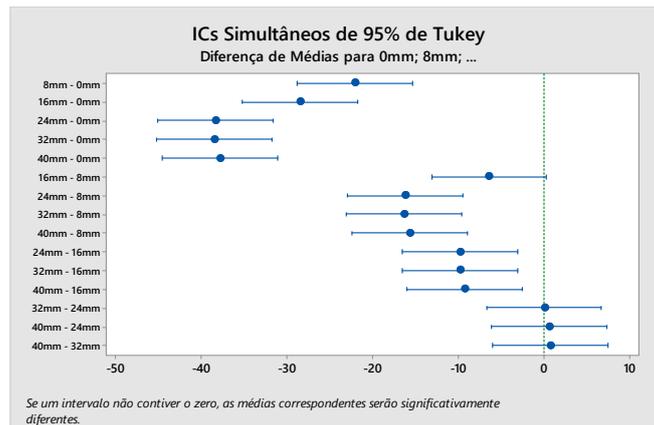


Figura 13. Análise de variância entre Lc's com intervalos de confiança (IC's) de 95% – Teste de Tukey do aço ASTM-A36.

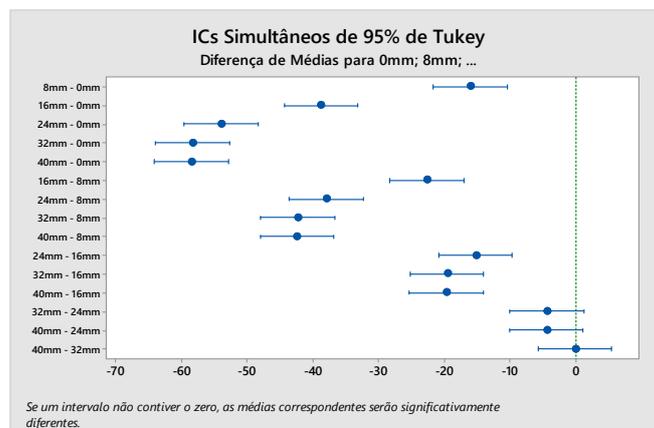
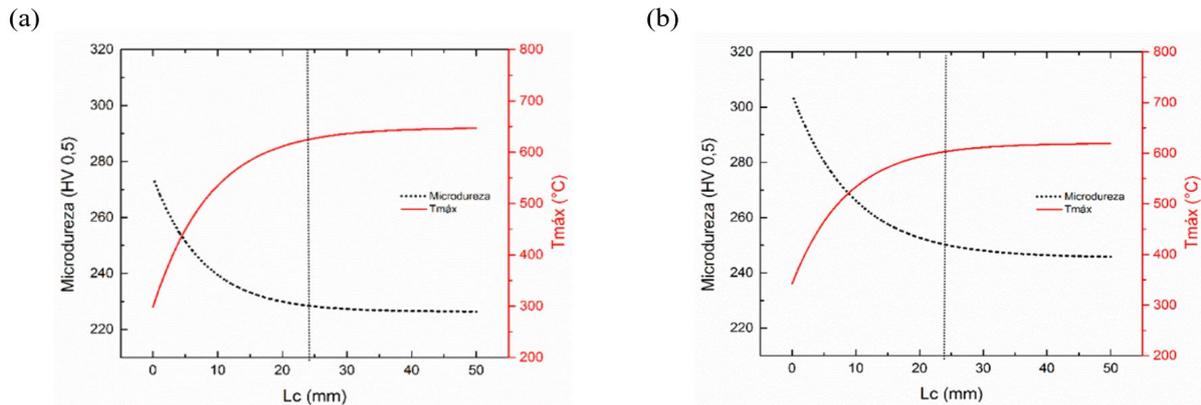


Figura 14. Análise de variância entre Lc's com intervalos de confiança (IC's) de 95 – Teste de Tukey do aço SAE-1045.

### 3.4. Comparação das taxas de resfriamento e temperaturas máximas com a microdureza

A Figura 15 apresenta as funções exponenciais assintóticas de temperaturas máximas e de microdurezas para ambos os materiais, que representam o instante e a distância onde o regime *quase-estacionário* foi atingido. As distâncias foram extrapoladas para 50 mm. Os valores das assíntotas da função ajustada de temperatura máxima da face oposta do ASTM-A36 e SAE-1045 foram, respectivamente, 647,8 e 619,7 °C, provavelmente não sendo esta diferença significativa no balanço de energia durante a soldagem. As energias de soldagem utilizadas também foram similares, sendo a energia do SAE-1045 2,9% maior que a energia do ASTM-A36. Entretanto, pode-se observar que para o aço SAE-1045, os valores de dureza no início do cordão e os valores de dureza do assintótico foram de 11% e 8,5% mais elevados do que os valores do aço ASTM-A36. O fluxo energia via calor foi similar, para os dois aços, como pode ser constatado pela Figura 8. Os maiores valores de dureza do SAE-1045 justificam-se através dos valores mais elevados do CE do metal de base (Tabela 1), e da diluição (Tabela 3), resultando em um CE mais elevado do metal de solda, evidenciando a diferença de temperabilidade entre os dois materiais. Contudo, quando comparado os inícios dos cordões com as seções que já estavam no regime *quase-estacionário*, dos aços ASTM-A36 e SAE-1045, observou-se um aumento de dureza de 21% e 24%, respectivamente.



**Figura 15.** Curvas aproximadas de microdureza e temperatura máxima em relação ao comprimento do cordão de solda. (a) aço ASTM-A36; (b) aço SAE-1045.

A Figura 16 mostra as exponenciais assintóticas para a microdureza e para a taxa de resfriamento para ambos os aços. É interessante observar que a velocidade de resfriamento tende a um valor assintótico para comprimentos  $L_c$  maiores que  $50\text{ mm}$ . Comparando-se as velocidades de resfriamento para atingir o valor de dureza para  $L_c$  de  $24\text{ mm}$ , ainda que os dois aços tiveram as mesmas condições de resfriamento, nota-se que para o aço ASTM-A36 estas velocidades são maiores que para o aço SAE-1045. Para os valores de dureza constantes, dentro do regime *quase-estacionário*, os valores das velocidades de resfriamento correspondentes aos dois aços foram de  $25\text{ °C/s}$  e  $20\text{ °C/s}$ , respectivamente para os aços ASTM-A36 e SAE-1045. Estas variações de velocidade de resfriamento estão associadas aos diferentes valores de condutividade térmica em função da concentração de carbono e, conseqüentemente, às diferenças de temperabilidade entre os dois aços [9].

A Figura 17 apresenta esquematicamente a diferença de temperabilidade dos dois aços relacionada com as isothermas na superfície superior e na vista frontal das chapas. Na vista superior das chapas estão indicadas três temperaturas máximas esquemáticas, tanto para o aço A36 como para o aço 1045, indicadas no diagrama de fases Fe-C (Figura 17a). A Figura 17b apresenta três curvas hipotéticas de resfriamento contínuo dos dois aços. Comparando-se as duas curvas de resfriamento contínuo, nota-se que o tempo de início da decomposição da austenita metaestável é maior para o aço 1045 que para o aço A36, mostrando que este aço apresenta maior temperabilidade devido a maior concentração de carbono. Contudo, esta diferença do percentual de carbono além de deslocar as curvas de transformação, também influencia na condutividade térmica dos dois aços [9,10]. Para a temperatura de  $600\text{ °C}$ , acima da temperatura crítica para estes aços, os valores das condutividades térmicas foram de  $35,6$  e  $33,9\text{ W/mK}$  [9,10], respectivamente para o aço A36 e aço 1045. Esta diferença, junto com o valor da temperatura crítica para cada aço, explicam a maior velocidade de resfriamento encontrada no aço A36, conforme mostram as Figuras 16a e 16b, tanto para o fluxo de calor 2D como o 3D.

Graças a diferença de condutividade nos dois aços, o aço A36 tende a apresentar isothermas mais arredondadas e largas na face superior da chapa, do que o aço 1045, conforme está apresentado na Figura 17c. A Figura 17d representa um corte frontal A-A da Figura 17c, para mostrar as velocidades de resfriamento, apresentadas na Figura 17b, que apresentam as regiões temperadas (regiões hachuradas na Figura 17d, mostrando a diferença de temperabilidade dos dois aços. de modo a comparar as taxas de resfriamento com os percentuais de carbono, as regiões hachuradas representam que o material tempera com a taxa de resfriamento.

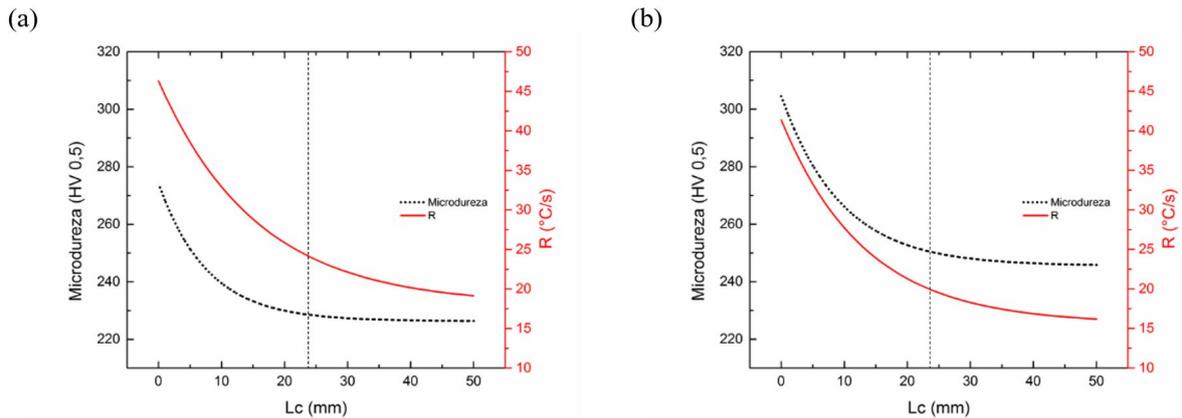


Figura 16. Curvas ajustadas de microdureza e taxa de resfriamento em relação ao comprimento do cordão de solda. (a) aço ASTM-A36; (b) aço SAE-1045.

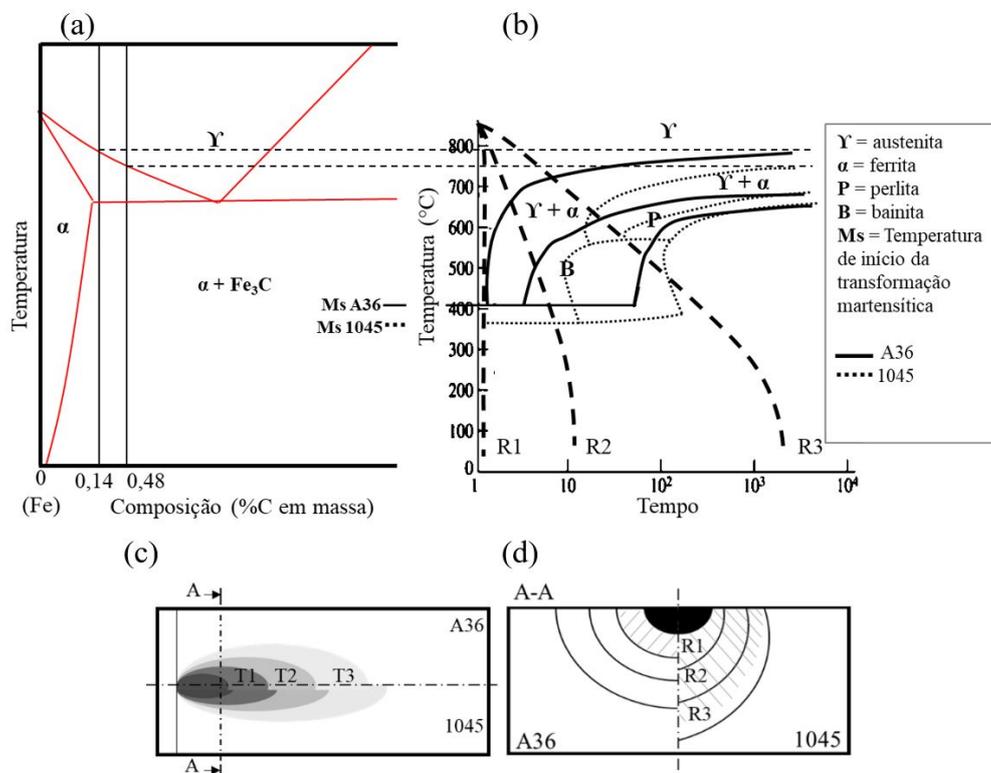
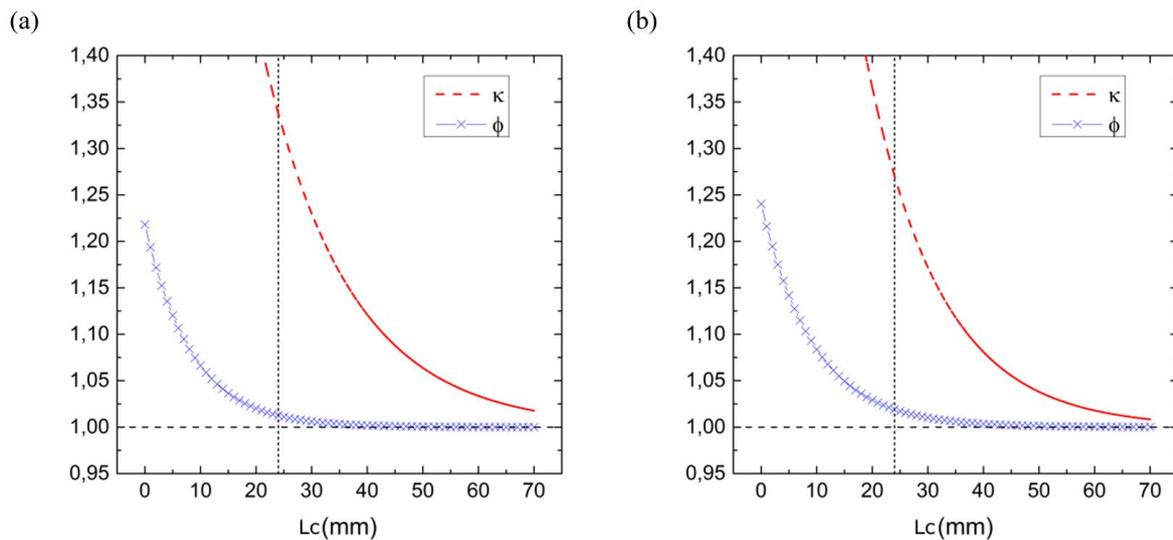


Figura 17. Esquema da variação da temperabilidade de aços com diferentes percentuais de carbono. (a) Diagrama ferro-carbono mostrando as duas composições dos dois aços; (b) curvas de resfriamento contínuo dos aços; (c) esquema do formato das isoterma na face superior da chapa em função da condutividade térmica dos aços; (d) corte A-A da Figura 17c mostrando a temperabilidade dos materiais em função das taxas de resfriamento.

Para isolar o efeito da natureza dos diferentes tipos de materiais no comprimento onde se atinge o regime *quase-estacionário*, foi construída a Figura 18, com valores de dureza e de velocidade de resfriamento adimensionalizadas com base nos valores assintóticos de cada um dos parâmetros indicados na Figura 16.

A Figura 18 mostra que o regime *quase-estacionário* para ambos os materiais ocorre próximo dos 24 mm de distância, a partir do início do cordão de solda, tendo-se como referência os valores da microdureza adimensionalizada ( $\varphi$ ). Todavia, em relação à velocidade de resfriamento adimensionalizada ( $\kappa$ ), a distância onde os valores tendem a uma assíntota se encontram em torno de 70 mm, a partir do início do cordão de solda, superior aos 24 mm anteriormente citado. A pequena diferença entre as curvas de  $\kappa$  de ambos os materiais provavelmente se deve à diferença na condutividade térmica destes materiais, conforme mencionado anteriormente.

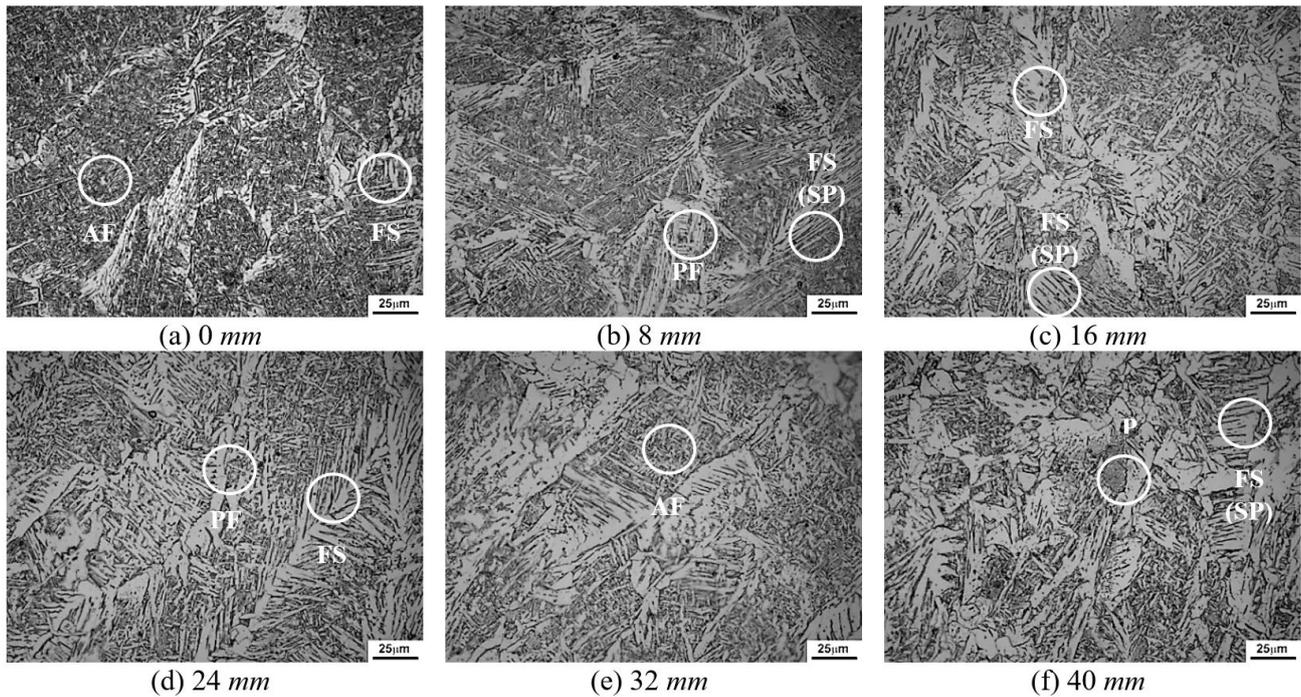
A diferença observada entre as curvas de  $\phi$  e  $\kappa$ , em relação ao ponto onde as curvas se aproximam de suas respectivas assíntotas, deve-se à diferença dos fluxos de energia via calor e das diferenças nas temperabilidades dos dois materiais. Em outras palavras, os ciclos térmicos estão diretamente associados ao fluxo de energia via calor, enquanto a microdureza adimensional está associada às transformações de fase, que envolvem um tempo de incubação e de difusão do carbono. Assim, o conceito de regime *quase-estacionário* está relacionado à reprodutibilidade da microestrutura em um dado comprimento, que é melhor representado pela curva de microdureza do que pela curva da velocidade de resfriamento. Isto é devido a transformação de fase ocorrer quando a velocidade de resfriamento cruza uma linha de início de transformação de fase no diagrama TRC.



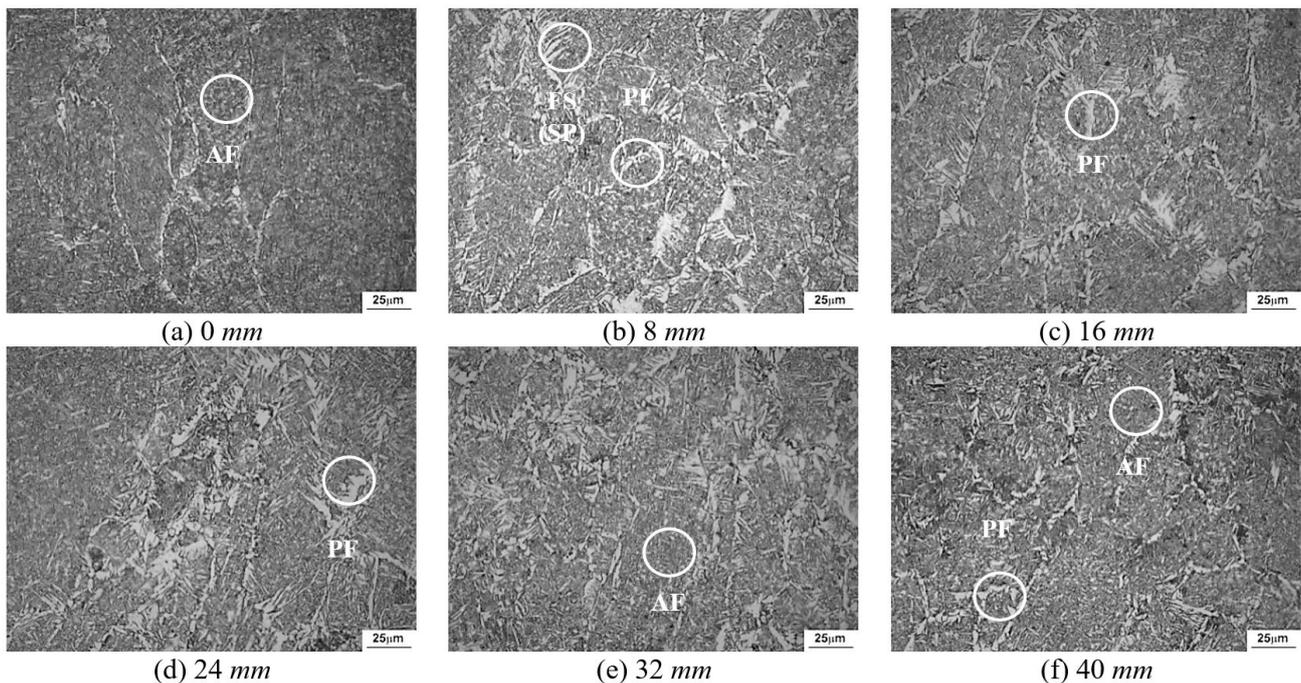
**Figura 18.** Curvas assintóticas adimensionais de microdureza ( $\phi$ ) e taxa de resfriamento ( $\kappa$ ) em relação ao comprimento do cordão de solda  $L_c$ . (a) aço ASTM-A36; (b) aço SAE-1045.

### 3.5. Micrografia

As Figura 19 e Figura 20 apresentam as micrografias realizadas, respectivamente, para ambos os materiais nas seis seções de cada cordão de solda. Os resultados obtidos das micrografias apresentadas, confirmam a obtenção do regime *quase-estacionário* a partir das Figuras 18d e 19d. Nestas figuras, os microconstituintes dos aços ASTM-A36 e SAE-1045, apresentam características similares, por serem dois aços hipoeutetóides, entretanto, diferentes frações volumétricas devido ao percentual de carbono de cada aço. As Figuras 18a, 18b, 19a e 19b mostram a formação predominante de microestruturas alotriomórficas da ferrita (ferritas acicular e de *Widmanstätten*), evidenciando a existência do maior gradiente de temperatura na zona fundida, no início do cordão. Como a análise da microestrutura obtida depende tanto da temperatura máxima quanto da taxa de resfriamento, quando ambos atingem valores constantes, a microestrutura resultante torna-se similar e reprodutível e, conseqüentemente, a dureza se comporta da mesma forma [11].



**Figura 19.** Micrografias das seções transversais do cordão de solda do aço ASTM-A36. (a) CP1A; (b) CP2A; (c) CP3A; (d) CP4A; (e) CP5A; (f) CP6A. Microconstituintes: Perlita (P), ferrita acicular (AF), ferrita primária (PF), ferrita secundária (FS) e ferrita de *Widmanstätten* (FS (SP)).



**Figura 20.** Conjunto de micrografias das seções transversais do cordão de solda do aço SAE-1045. (a) CP1B; (b) CP2B; (c) CP3B; (d) CP4B; (e) CP5B; (f) CP6B. Microconstituintes: ferrita acicular (AF), ferrita primária (PF), ferrita secundária (FS) e ferrita de *Widmanstätten* (FS (SP)).

#### 4. Considerações Finais

Ao implementar a metodologia de Granjon em relação aos ciclos térmicos, foi possível ajustar as exponenciais assintóticas aos valores de temperatura máxima dos ciclos térmicos, como também, ajustar exponenciais assintóticas a partir dos valores de taxa de resfriamento, sendo as assíntotas das funções correspondentes ao regime *quase-estacionário*. Ao investigar as variações de microdureza ao longo do cordão, encontrou-se que os valores médios de microdureza da zona fundida decrescem, também, segundo uma função exponencial assintótica, seguindo a tendência da taxa de resfriamento. Entretanto, comparando-se as curvas adimensionais de taxa de resfriamento e de microdureza, encontrou-se que estas se aproximam das suas respectivas

assíntotas, em diferentes valores de comprimento de cordão, valores estes que, neste estudo, são diretamente proporcionais ao tempo de soldagem, visto que a velocidade de soldagem foi mantida constante. A curva de microdureza é a primeira a se aproximar da assíntota, este resultado se deve à relação entre a dureza e o tempo de resfriamento, que não é linear. Essa dependência pode ser observada nas curvas de temperabilidade obtidas por ensaio *Jominy*, onde a dureza é medida a partir da distância de uma superfície resfriada com um jato de água, cuja distância também é proporcional à velocidade de resfriamento. Assim, os valores de dureza tendem a um valor assintótico, conforme se aumentam os valores de tempo de resfriamento (ou diminuem as taxas de resfriamento). O valor assintótico da dureza depende da temperabilidade de cada aço. Aços com temperabilidade maior possuem valores assintóticos superiores aos aços com temperabilidade menor.

Após os testes de ANOVA das médias de microdureza da zona fundida, ao longo do cordão de solda, para os aços ASTM-A36 e SAE-1045, foram obtidas diferenças não significativas entre as médias a partir de 24 mm em relação ao ponto de abertura do arco. Portanto, pode-se afirmar que o regime *quase-estacionário* foi alcançado em 24 mm de comprimento de cordão, sendo este resultado restrito às condições dos experimentos realizados neste estudo.

Comparando-se as curvas exponenciais assintóticas de microdureza da zona fundida dos aços SAE-1045 e ASTM-A36, observou-se uma curvatura similar para ambas as curvas, sendo a curva aço SAE-1045, aproximadamente, uma translação vertical para cima em relação à curva do aço ASTM-A36. Como ambos os materiais foram submetidos a valores similares de energia de soldagem, os valores mais elevados de microdureza do SAE-1045 se devem, principalmente, ao maior valor de carbono do SAE-1045 e aos valores mais elevados de diluição do cordão, resultando em valores maiores de carbono da zona fundida e, conseqüentemente, valores mais elevados de microdureza ao longo de toda a extensão do cordão.

Adotando-se como referência o valor de microdureza do regime *quase-estacionário*, ou seja, o valor da assíntota da função ajustada, observou-se um aumento desta propriedade de 21 e 24%, no início do cordão, para os aços ASTM-A36 e SAE-1045, respectivamente. Nestas mesmas regiões, as frações volumétricas de ferrita acicular foram superiores às de ferrita de contorno de grão e de ferrita de *Widmanstätten*.

Como a dureza em juntas soldadas depende das taxas de resfriamento, sua variação significativa durante o regime transiente chama a atenção para possíveis variações de propriedades como tenacidade, resistência à corrosão, entre outras propriedades dependentes das variações destas taxas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Petrobrás®, pela ajuda fornecida ao andamento do trabalho através do projeto Petrobrás Nº 0050.0086316.13.9; ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP - Universidade de São Paulo, à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, ao IFES- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, à FAPEAM – Fundação de Amparo à Pesquisa no Amazonas e à White Martins pela doação dos gases de proteção utilizados nos experimentos de soldagem.

## Referências

- [1] Rodrigues LO, Oliveira LM, Costa SC. Análise e otimização do rendimento e da taxa de deposição no processo de soldagem com eletrodo tubular. In: Anais do 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica; 2007; Cusco, Peru. Cusco: Pontificia Universidad Católica del Perú; 2007. p. 8.
- [2] American Welding Society. AWS welding handbook: welding science and technology. 9th ed. Vol. 1. Miami: AWS; 2001.
- [3] Cruz RMA No, Alves ANS, Batista FDM, Brandi SD. Aplicabilidade da metodologia clássica para determinação do comportamento do fluxo de calor em chapas soldadas. In: Anais do Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria; São Paulo; 2014. São Paulo: Blucher; 2014.
- [4] Scotti A, Reis RP, Liskevych O. Modelo descritivo do fluxo de calor em soldagem a arco visando o conceito de calor imposto efetivo. Soldagem e Inspeção. 2012;17(2):166-172. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242012000200010>.
- [5] Rosenthal D. Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. Welding Journal. 1941;20:220-234.
- [6] Granjon H. Fundamentals of welding metallurgy. 1st ed. Abington Cambridge: Abington Publishing; 2002.
- [7] Rocha EJM. Uso da termografia na análise do resfriamento de chapas soldadas [dissertação de mestrado]. Recife: Universidade Federal de Pernambuco; 2012.
- [8] Cruz RMA No. Taxa de resfriamento na soldagem: um novo entendimento [tese de doutorado]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2018.
- [9] Tajima M, Umeyama Y. Latent heats of phase transformations in iron and steels. High Temperatures. High Pressures. 2002;34(1):91-97. <http://dx.doi.org/10.1068/htwu206>.
- [10] Valencia JJ, Quedstedt PN. Thermophysical properties. In: ASM International. ASM handbook. Materials Park: ASM; 2008. p. 468-481. (vol. 15).
- [11] Colpaert H. Metalografia. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher; 2008.

## Errata

No artigo “Influência do Regime Transiente Sobre a Microdureza e Microestrutura nos Aços ASTM-A36 e SAE-1045 Soldados pelo Processo MAG”, DOI <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.14>, publicado no periódico Soldagem & Inspeção, vol. 24, pp. 01-15, na página 01:

Onde se lê:

“Rubelmar Maia de Azevedo da Cruz Neto”

Leia-se:

“Rubelmar Maia de Azevedo Cruz Neto”

