

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO CICLO TÉRMICO SOBRE A MÁXIMA DUREZA NA ZAC NA  
SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO DE AÇO SAE 1045

por

Bruno Biazzetto Rodrigues de Matos

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2014

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO CICLO TÉRMICO SOBRE A MÁXIMA DUREZA NA ZAC NA  
SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO DE AÇO SAE 1045

por

Bruno Biazzetto Rodrigues de Matos

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayshi  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação ou Mecânica dos Sólidos ou Ciências  
Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Ivan Guerra Machado

Comissão de Avaliação:

Prof. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho

Prof. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, 05, Dezembro de 2014.



MATOS, B. B. R. de, **Influência da Variação do Ciclo Térmico Sobre a Máxima Dureza na ZAC na Soldagem por Arco Submerso de Aço SAE 1045**. 2014. 20p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

## **RESUMO**

Neste estudo foram analisadas as influências da variação da energia de soldagem em juntas soldadas por arco submerso, sobre aço SAE 1045. O experimento consiste em variar a energia de soldagem de 1 a 4 kJ/mm, alterando-se somente a velocidade entre uma soldagem e a outra, mantendo-se constantes a tensão e a corrente. Após a obtenção dos corpos de prova, foi feita a análise das macrografias dos corpos de prova, onde foram observadas as variações na área do cordão de solda e na máxima dureza da ZAC, em decorrência do acréscimo de energia de soldagem. Foram encontrados perfis de dureza com valores máximos abaixo do esperado, sendo necessária a análise da microdureza da região, em busca de possível formação martensítica, comumente encontrada próxima da região de metal fundido. Com os resultados da microdureza foi possível constatar o decréscimo da dureza com o aumento da energia de soldagem, fato comprovado pelo maior tempo de resfriamento entre 800°C-500°C que acabou modificando as propriedades metalúrgicas da junta, além da necessidade de pré-aquecimento na soldagem de aços de médio teor de carbono em baixas energias de soldagem, em razão do aparecimento de regiões martensíticas na primeira região da zona afetada pelo calor.

**PALAVRAS-CHAVE:** soldagem, ciclo térmico, arco submerso, zona afetada pelo calor.

MATOS, B. B. R. de; **Influence Of Variation On The Cycle Thermal Maximum Hardness Zac The Submerged Arc Welding For Steel Sae 1045**. 2014. 14p. Monograph (TCC in Mechanical Engineering) - Department of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

## **ABSTRACT**

This study analyzed the influences of the weld energy in submerged arc welded joints on steel SAE 1045. Fillets were welded using welding energy from 1 to 4 kJ / mm, varying only welding speed between the process, keeping constant the tension and current. After obtaining the specimens, there were made macrographics analysis of the specimens, measuring weld bead areas and the maximum hardness of the HAZ, due to the increase of welding energy. Hardness profiles were found with maximum values lower than expected, being necessary the analysis of the micro hardness of the region searching for martensitic region, commonly found near the molten metal. With the results of micro hardness, it was possible to see the decrease in hardness with the increase of heat input, a fact proven by the longest cooling time from 800°C - 500°C which has modified the metallurgical properties of the joint, in addition to the need of pre-heating in welding of medium carbon steels at low energies.

**KEYWORDS:** welding, thermal cycle, submerged arc, heat affected zone.

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS .....	1
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
3.1	Processo de soldagem ao arco submerso: .....	1
3.2	Regiões da Zona Fundida: .....	2
3.3	Produtividade: .....	2
3.4	Calor nos processos de soldagem: .....	3
3.5	Ciclo térmico:.....	3
3.6	Modos de resfriamento:.....	5
3.7	Modelos matemáticos:.....	5
3.7.1	Energia de soldagem: .....	5
3.7.2	Tempo de resfriamento entre 800°C e 500°C ( $\Delta t_{8/5}$ ): .....	6
4	MATERIAIS E MÉTODOS:.....	6
4.1	Equipamento e consumíveis: .....	7
4.2	Soldagem: .....	8
4.3	Metalografias:.....	8
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES: .....	9
5.1	Macrografias:.....	9
6	CONCLUSÕES: .....	13
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem por arco submerso é utilizado em larga escala por importantes setores industriais, como por exemplo, na indústria de construção naval, de fabricação de estruturas metálicas, além de diversas outras que necessitam de alta produtividade e qualidade do metal de solda depositado. A alta produtividade do processo se justifica pela alta eficiência energética, devido ao fato do arco encontrar-se isolado do contato atmosférico, associados a uma elevada taxa de deposição, somadas a um alto ciclo de trabalho. Tais características estão em constante evolução, por meio de novas formulações de arames e fluxos, assim como da possibilidade da realização de soldagens completamente mecanizadas.

Entretanto, a vantagem do processo ao arco submerso, sob o ponto de vista produtivo, requer o complemento com ponderações que envolvem as propriedades mecânicas dos metais de solda produzidos por este processo.

Grandes energias de soldagem, variando-se somente a velocidade do processo, e mantendo-se constantes os outros parâmetros, confere uma maior deposição de metal de solda e, conseqüentemente, a necessidade de um número menor de passes para a realização de uma mesma soldagem, fato determinante na obtenção de um processo mais econômico, porém do ponto de vista metalúrgico e das características mecânicas do metal transformado pode se criar uma situação de risco, dependendo do tipo de solicitação a qual a junta será empregada.

A partir destes fatos encontrados na indústria, principalmente quando se faz necessário o aumento na produtividade para o cumprimento de prazos, tornam-se interessantes as análises propostas por este estudo, de forma que se confirme a característica metalúrgica da junta soldada conforme se varia a energia de soldagem, podendo encontrar-se desde estruturas frágeis e de baixa tenacidade, até microconstituintes dúcteis e de baixa resistência mecânica.

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo estudar os efeitos da variação dos parâmetros de soldagem em juntas soldadas em aço SAE 1045, quando utilizado o processo de arco submerso. Serão observadas as variações na área do cordão de solda, na máxima dureza na zona afetada pelo calor (ZAC) e no tempo de resfriamento entre 800° e 500°C, conforme se varia a energia de soldagem.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Processo de soldagem ao arco submerso

O processo de soldagem ao arco submerso consiste em um arame (eletrodo) nu, continuamente alimentado, o qual produz o arco elétrico com a peça, formando assim a poça de fusão, sendo ambos recobertos por uma camada de fluxo granular fusível que protege o metal da contaminação atmosférica [Machado, 2000]. O fluxo na região próxima ao arco é fundido formando, posteriormente, uma camada sólida de escória sobre o cordão que além de ajudar a estabilizar o arco, desempenha uma função purificadora sobre o metal fundido.

Trata-se de um dos processos com maior produtividade dentre os processos de soldagem por fusão, tendo como justificativa o seu rendimento térmico, que gira em torno de 100%, pelo fato do arco encontrar-se protegido do ambiente, abaixo da camada de fluxo, conforme ilustrado na **Fig. 3.1**.

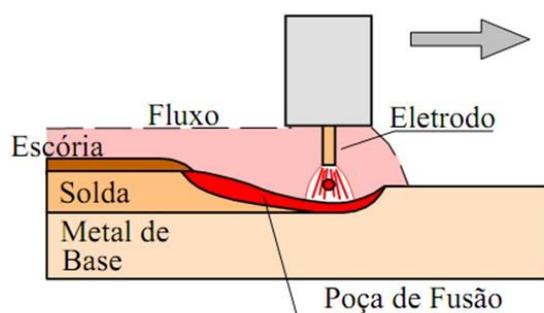


Figura 3.1: Modelo de soldagem ao arco submerso

### 3.2 Regiões da Zona Fundida

A zona afetada pelo calor (ZAC) é a região do metal base adjacente à poça de fusão. Esta região sofre um rápido ciclo térmico de aquecimento e resfriamento durante o processo de soldagem. Dependendo da severidade dos ciclos térmicos, a ZAC apresentará diferentes características metalúrgicas e propriedades mecânicas [LANCASTER, 1999].

Diversos autores dão importância à máxima dureza na ZAC, devido ao fato deste ser considerado um importante indicador de problemas potenciais, tais como, corrosão sob tensão e surgimento de trincas a frio.

O perfil de dureza da junta soldada indica que valores máximos serão encontrados próximos à linha de fusão, diminuindo à medida que se afasta desta linha, em direção ao metal base. Quanto maior a distância do cordão de solda, mas ainda dentro da ZAC, menores serão os valores de dureza encontrados (principalmente em altas energias de soldagem) devido ao longo tempo em que o material encontra-se em resfriamento, permitindo o aumento do tamanho de grão e conseqüentemente a diminuição das propriedades mecânicas da junta soldada. Portanto, a dureza é função da taxa de resfriamento, e de acordo com a norma ASTM A370, pode ser relacionada a valores aproximados de resistência a tração da junta soldada.

### 3.3 Produtividade

No caso da soldagem, a produtividade é, de forma geral, a quantidade de metal de solda depositado em relação à quantidade de recursos humanos consumidos na soldagem.

Por tratar-se de um experimento, será avaliada somente a massa do metal de solda depositado nos diferentes corpos de prova, sendo para isto utilizada a **Eq. 3.1**.

$$m_s = A_s l \rho \quad (3.1)$$

Onde  $A_s$  é a área transversal do cordão associada com o metal depositado;  $l$  é o comprimento do cordão e  $\rho$  é a densidade da solda.

Segundo Modenesi, 2001, a taxa de deposição é a quantidade de material depositado por unidade de tempo, dependente de vários fatores, incluindo o processo de soldagem, o tipo, o diâmetro e o comprimento do eletrodo e o tipo, a polaridade e o nível da corrente. Segue a **Fig 3.2** como exemplo da variação da taxa de deposição.

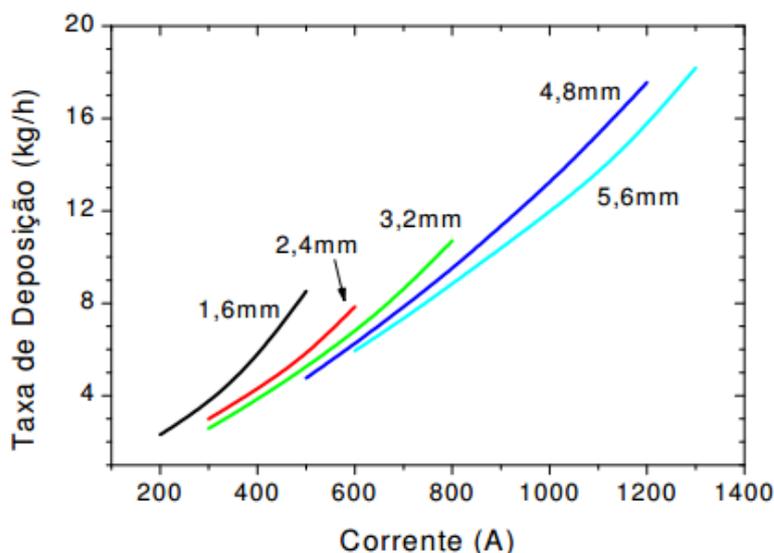


Figura 3.2: Taxa de deposição na soldagem SAW de aço carbono, com CC+ e comprimento do eletrodo de 25mm em função da corrente e do diâmetro do eletrodo. Fonte: MODENESI, 2001

### 3.4 Calor nos processos de soldagem

A transferência de calor da fonte para a junta causa alterações de temperatura na solda e nas regiões adjacentes do metal base, que dependem da forma com que o calor é difundido para o restante do material a ser soldado. Invariavelmente ocorrerão profundas mudanças no material a ser soldado formando-se diferentes tipos de microestrutura, que por sua vez tem grande influência sobre as propriedades mecânicas da junta soldada.

Durante a soldagem, a ZAC sofre aquecimento acima da temperatura crítica de austenitização, alterando assim as propriedades mecânicas e estruturais do metal base. Desta forma, faz-se necessário o controle da taxa de resfriamento de modo que se evite a formação de regiões frágeis no material soldado.

Segundo Modenesi et al., 2012, estas variações de temperatura causam, além da fusão e solidificação do cordão de solda, variações dimensionais e alterações microestruturais localizadas que podem resultar em efeitos indesejáveis, tais como:

- Tensões residuais e distorção;
- Deterioração de propriedades mecânicas;
- Formação de trincas;

### 3.5 Ciclo térmico

Em um processo ao arco elétrico, o ciclo térmico consiste de um aquecimento muito rápido (centenas de graus por segundo), seguido por um resfriamento relativamente rápido (dezenas de graus por segundo) até atingir a temperatura ambiente [Poorhaydari et al., 2005].

O ciclo térmico é afetado pelas propriedades do material e pelas configurações do processo. Na ZAC, influencia diretamente a estrutura e, conseqüentemente, as propriedades finais da junta, de modo que a microestrutura formada depende dos seguintes fatores:

- Temperatura máxima do ciclo térmico ou temperatura de pico;
- Taxa de resfriamento;
- Composição química do material soldado.

Na maioria dos processos de soldagem por fusão, uma fonte de calor concentrada e de alta intensidade é aplicada em uma posição da junta e deslocada ao longo desta. O calor gerado por esta fonte escapa principalmente por condução através das peças e, exceto para a soldagem, de peças de pequenas dimensões, as perdas por radiação e convecção na

superfície da peça e o efeito de outras fontes de calor pode ser desprezado [MODENESI, 2012].

A solução proposta por Rosenthal é válida para um estado quase estacionário, onde se supõe que a distribuição de temperaturas mantém-se inalterada para um sistema de coordenadas que se move junto com a fonte de calor, conforme ilustrado na **Fig. 3.3**. Apesar da diferença da junta do experimento com a da figura, considera-se o mesmo sistema de coordenadas, pois com esta simplificação, o problema torna-se independente do tempo.

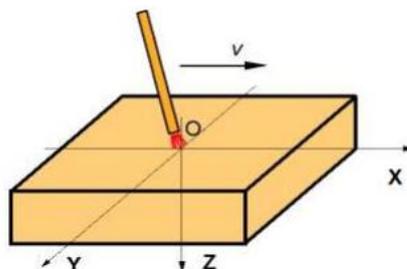


Figura 3.3: Sistema de coordenadas utilizado para a obtenção do estado quase estacionário. Fonte: MODENESI, 2012

Teoricamente, o estado quase estacionário ocorre após um tempo suficientemente longo de soldagem. Em particular, esta suposição é razoável para soldas realizadas a uma velocidade aproximadamente constante, sem movimento de tecimento, em peças relativamente grandes e de baixa difusividade térmica desde que os instantes inicial (quando as temperaturas em torno do eletrodo aumentam) e final (após a extinção do arco) da soldagem sejam desprezados.

A **Fig. 3.4** representa um modelo de ciclo térmico, onde se observam parâmetros importantes que ocorrem durante o aquecimento e resfriamento do material. Dentre estes parâmetros, pode-se destacar a temperatura de pico ( $T_p$ ), as taxas de aquecimento e resfriamento, o tempo de resfriamento entre  $800^{\circ}\text{C}$  e  $500^{\circ}\text{C}$ , e entre  $800^{\circ}\text{C}$  e  $300^{\circ}\text{C}$ , sendo, segundo MACHADO, 2000, nestes intervalos que ocorrem as mais importantes transformações de fase nos aços ao carbono, além desta região apresentar-se quase linear.

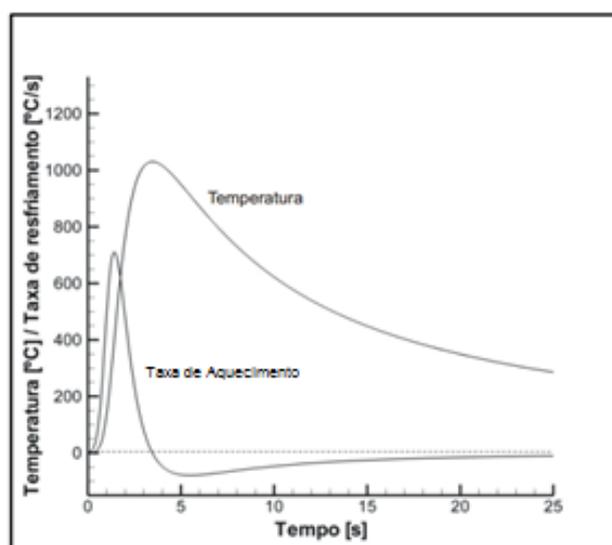


Figura 3.4: Exemplo de ciclo térmico Fonte: MACHADO, 2000.

### 3.6 Modos de resfriamento

Conforme a disposição das chapas que constituem a junta, têm-se diferentes modos de resfriamento. Quando se trabalha com juntas de topo, pode-se obter resfriamentos em 2D, 2,5D ou 3D, dependendo da espessura das chapas, bem como da penetração do cordão de solda.

Neste estudo, trabalha-se com uma junta plana, em um corpo de prova composto por duas chapas perpendiculares entre si, formando-se assim uma junta em “T”. A velocidade de resfriamento será maior na soldagem de juntas em T do que em juntas de topo, quando as variáveis do processo, inclusive a espessura dos componentes da junta, forem semelhantes. Esta característica confirma-se, por existir uma maior facilidade para o escoamento de calor por condução devido a sua forma constituinte, conforme **Fig. 3.5**.

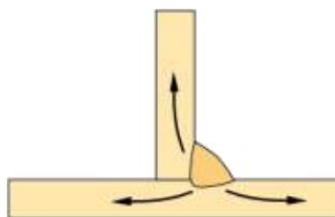


Figura 3.5: Representação esquemática do fluxo de calor em juntas em “T”

A Norma Europeia EN1011 (Parte 2) utiliza o conceito de “espessura combinada” para caracterizar o efeito da geometria da junta nas suas condições de resfriamento. A **Fig. 3.6** explica este conceito, justificando-se a adoção de métodos tridimensionais na extração do calor para este tipo de soldagem, pois dentro deste critério, trabalha-se com três vezes a espessura da peça.

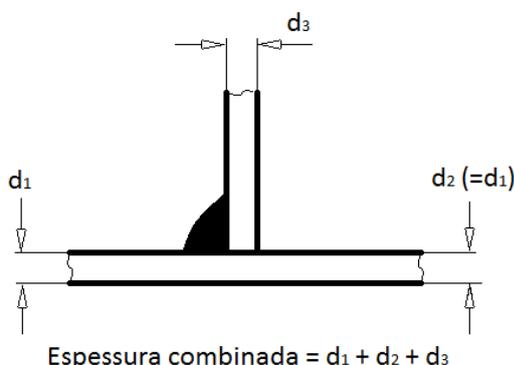


Figura 3.6: Representação do conceito de espessura combinada da norma EN1011

### 3.7 Modelos matemáticos:

#### 3.7.1 Energia de soldagem

Energia de Soldagem ou aporte de calor pode ser definida como a quantidade calor adicionada a um material por unidade de comprimento linear, geralmente representada pela letra  $E$ , cuja unidade usual é kJ/mm ou J/mm [ASM, 1993].

Para a soldagem ao arco elétrico o valor de  $E$ , em J/mm, é obtido pela **Eq. 3.2**.

$$E = \frac{q}{v} = \eta \frac{UI}{v} \quad (3.2)$$

Onde  $q$  é a energia gerada pela fonte (J/s),  $v$  é a velocidade de soldagem (mm/s),  $\eta$  é o rendimento do processo,  $U$  a tensão empregada (V) e  $I$  a corrente (A).

### 3.7.2 Tempo de resfriamento entre 800°C e 500°C ( $\Delta t_{8/5}$ )

As taxas de resfriamento provocadas pela soldagem são elevadas em certas regiões do metal base, e na maioria dos aços as transformações de fase mais importantes ocorrem no intervalo de temperatura entre 800 e 500°C [MACHADO, 2000].

Em regiões onde a temperatura de pico ultrapasse os 900°C, os valores do tempo de resfriamento entre 800°C e 500°C são sensivelmente constantes para todos os pontos da solda e do metal base, sendo expresso pela **Eq. 3.3** para os casos de extração de calor em três dimensões.

$$\Delta t_{8/5} = \frac{E}{2\pi k} \left( \frac{1}{500-T_0} - \frac{1}{800-T_0} \right) \quad (3.3)$$

Onde E é a energia de soldagem (J/m); k é a condutividade térmica (J/sm°C) e  $T_0$  a temperatura no instante inicial do processo (°C).

Segundo Machado, 2000, para juntas em “T”, a **Eq. 3.3** deve ser multiplicada por um coeficiente K, que nesta situação vale 0,67.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Todos os procedimentos práticos deste estudo foram realizados no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do sul.

Foram realizadas soldas ao arco submerso, em posição plana, utilizando-se como metal base, chapas de aço SAE 1045, de 9,52mm de espessura, com suas propriedades listadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Composição química das chapas utilizadas no estudo

COMPOSIÇÃO QUÍMICA AÇO SAE 1045 [%]				
C	Mn	Si	P	S
0,45	0,75	0,4 Máx.	0,04 Máx.	0,05 Máx.

Para a produção dos corpos de prova, obtendo-se uma junta em “T” em posição plana, foi necessária a confecção de um gabarito onde se apoiaram as chapas, deixando-as perpendiculares entre si e a 45° do eletrodo, conforme mostrado na **Fig. 4.1**.



Figura 4.1: imagem das chapas sobre o gabarito para a produção dos corpos de prova

#### 4.1 Equipamento e consumíveis:

As soldas foram realizadas em um equipamento White Martins Unionmelt AS 800 (800A, 44V CC, curva característica tensão constante) com carro propulsor, conforme mostrado nas Fig. 4.2 e Fig. 4.3.



Figura 4.2: Fonte de soldagem White Martins Unionmelt AS 800



Figura 4.3: carro propulsor e sistema de alimentação do arame

Para união das chapas, utilizou-se arame maciço, com diâmetro de 3,18 mm, seguindo a norma AWS A 5.17, EL-12. Em conjunto com o arame, foi utilizado fluxo ativo ESAB 10.81. As características do fluxo e do arame estão dispostas nas tabelas 4.3 e 4.4, respectivamente.

Tabela 4.3: Percentual da composição química do arame utilizado

%	C	Mn	Si	P	S	Cu
MIN.	0,04	0,25	-	-	-	-
MÁX.	0,14	0,60	0,10	0,03	0,03	0,035

Tabela 4.4: Percentual da composição química do metal depositado pelo fluxo utilizado

% C	Mn	Si	Ni	Mo
0,06	1,2	0,8	-	-

## 4.2 Soldagem

Foram escolhidas cinco situações distintas de soldagem, levando-se em conta as capacidades do equipamento utilizado. Em um primeiro momento foram testadas as velocidades do carro de propulsão, obtendo-se assim as velocidades mínima e máxima para os processos. Na tabela 4.5 são mostradas as variáveis do processo para a fabricação de cada um dos corpos de prova, cujo comprimento útil é de 150 mm.

Tabela 4.5: Parâmetros de soldagem dos corpos de prova

CORPO PROVA	CORRENTE [A]	TENSÃO [V]	VELOCIDADE [mm/s]	ENERGIA SOLDAGEM [kJ/mm]
CP 01	550	40	22	1
CP 02	550	40	11	2
CP 03	550	40	7,5	3
CP 04	550	40	5,5	4
CP 05	550	40	4,4	5

Foram mantidas constantes a tensão e a corrente dos procedimentos, variando-se somente a velocidade de soldagem. Para reduzir as variações dos resultados, foram confeccionados dois corpos de prova para cada energia de soldagem.

Estas variações de energia de soldagem têm por objetivo, observar o comportamento da junta soldada, analisando-se a área transversal do cordão de solda, o tempo de resfriamento entre 800°C e 500°C e a máxima dureza na ZAC.

## 4.3 Metalografias

Os corpos de prova foram cortados transversalmente, possibilitando a análise do cordão de solda. As seções transversais foram retificadas, garantindo-se assim o paralelismo entre as faces, evitando-se desvios nos valores dos ensaios de dureza.

Após a retífica, a superfície de análise foi preparada utilizando-se lixas de granulometria cada vez mais finas, finalizando o processo em um disco de feltro com alumina. As macrografias foram obtidas através de scanner de imagens, após ataque reativo de nital 2% (solução de álcool com ácido nítrico).

## 4 Ensaio de Dureza

Para a obtenção dos valores de dureza do cordão de solda, utilizou-se o teste de dureza Vickers, com uma carga de 2 kgf (19,6 N), sendo aplicada por 15 s, com distribuição transversal do perfil de dureza, conforme padrão para juntas em "T".

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

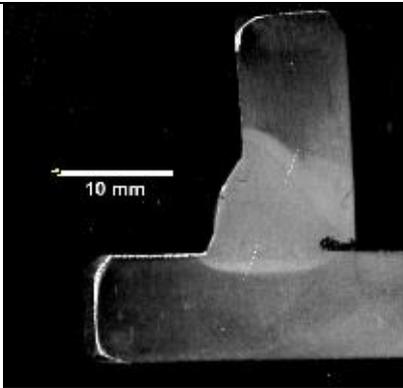
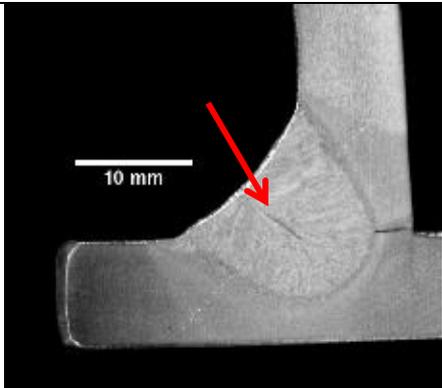
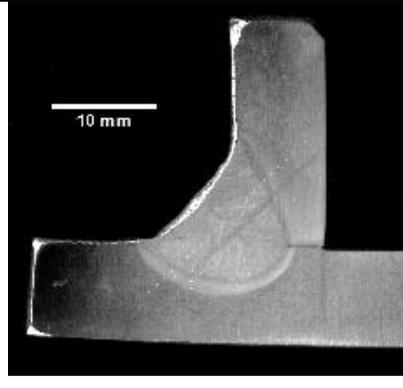
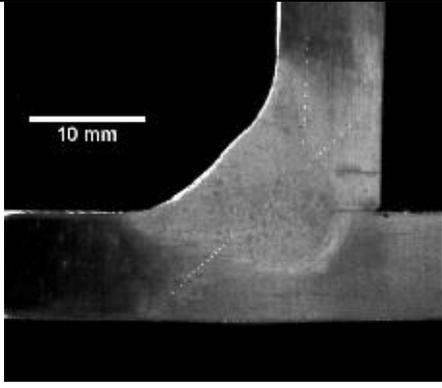
Devido à alta energia de soldagem, não foi possível a obtenção dos corpos de prova com energia de soldagem de 5 kJ/mm. Logo após o início do procedimento, a poça de fusão furou as chapas, impossibilitando a continuidade do processo.

Os demais corpos de prova foram obtidos conforme o planejado e serão expostos os resultados a seguir.

### 5.1 Macrografias

Na tabela 5.1 estão as imagens das macrografias dos corpos de prova, em conjunto com a área transversal do cordão de solda para cada intervalo de energia de soldagem proposto.

Tabela 5.1: Macrografias dos corpos de prova

AMOSTRA	MACROGRAFIA	AMOSTRA	MACROGRAFIA
CP-01 - 1 kJ/mm		CP-03 - 3 kJ/mm	
CP-02 - 2 kJ/mm		CP-04 - 4 kJ/mm	

Analisando-se as fotografias, pôde-se notar que os cordões de solda apresentam homogeneidade, com exceção do CP-03, onde é possível se notar uma trinca de solidificação, realçada pela seta, provavelmente causada pela grande penetração em relação à largura do cordão. Observa-se também, com exceção do CP-01, que foi soldado com a maior velocidade (22 mm/s), a boa qualidade dimensional dos cordões, tendo sido obtidas soldas uniformes e com bom acabamento.

Com o auxílio do software ImageJ, foi possível medir-se a área transversal do cordão de solda, a área do metal de adição da solda e do metal base fundido no processo. Na tabela 5.2 encontram-se as principais características de cada cordão de solda.

Tabela 5.2: Características dos cordões de solda.

CORPO DE PROVA	AREA CORDÃO [mm <sup>2</sup> ]	ÁREA METAL ADIÇÃO [mm <sup>2</sup> ]	AREA MB FUNDIDO [mm <sup>2</sup> ]	ENERGIA SOLDAGEM [kJ/mm]
CP-01	64,4	17,9	46,5	1,0
CP-02	102,2	33,7	68,5	2,0
CP-03	131,1	45,9	85,2	3,0
CP-04	149,9	52,5	97,4	4,0

A partir da tabela 5.2, constata-se o aumento na área do metal depositado e do metal fundido em decorrência do aumento da energia de soldagem.

Seguindo-se o perfil traçado na **Fig. 5.1**, de acordo com a norma EN 9051-1 que trata de ensaios destrutivos em juntas soldadas, obtiveram-se os valores de dureza do cordão de solda dispostos na tabela 5.3 e representados na **Fig. 5.2**, de acordo com seu posicionamento.

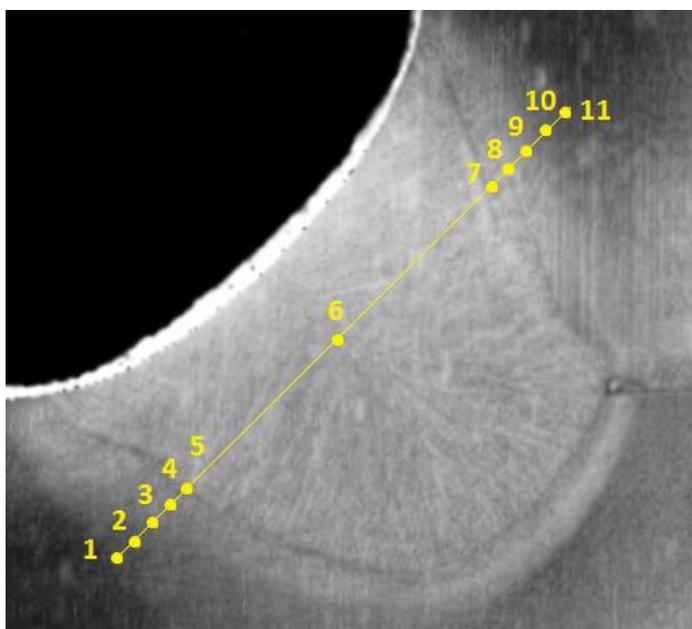


Figura 5.1: Distribuição das medições de dureza na seção do cordão de solda

Tabela 5.3: Distribuição das medidas de dureza (HV 2) nos pontos da fig. 5.1

AMOSTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CP-01	357,8	348,6	315,3	283,6	263,7	263,8	261,5	264,3	271,6	284,9	320,6
CP-02	341,9	336,9	289,1	272,3	253,4	260,9	253,6	259,3	262,4	271,8	316,5
CP-03	325,3	289,1	254,4	260,1	248,9	267,5	251,9	242,2	253,8	264,3	309,2
CP-04	310,2	281	239,9	239,1	242,9	261,6	240,2	239,5	247,2	259,2	301,2

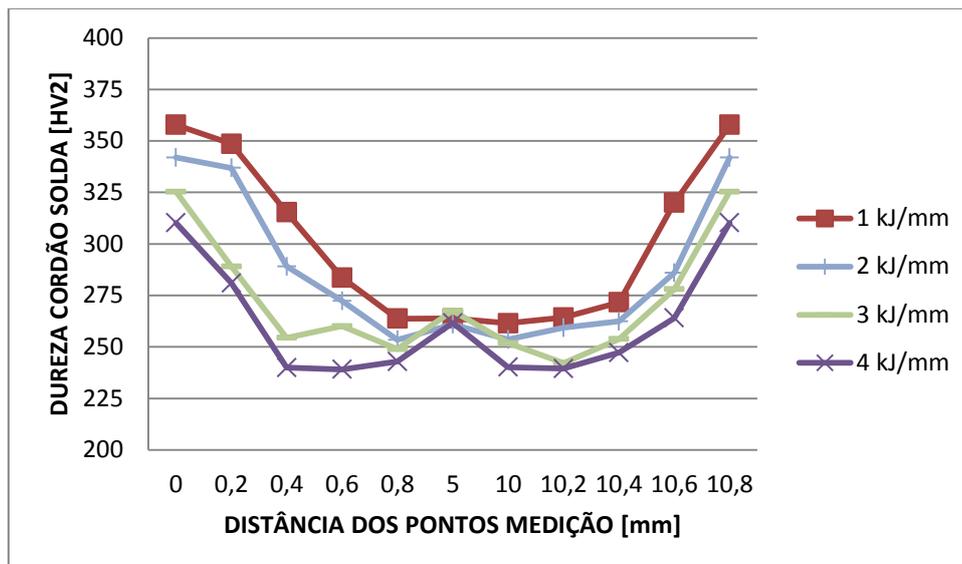


Figura 5.2: Distribuição do perfil de dureza das juntas, para cada energia de soldagem.

Analisando-se a **Fig. 5.2**, pode-se notar uma diminuição nos valores de dureza do perfil à medida que se aumenta a energia de soldagem, decorrente do maior tempo de resfriamento entre 800°C-500°C calculado pela **Eq. 3.3**, porém os valores obtidos estão muito abaixo do esperado, encontrando-se inclusive abaixo dos valores do metal base.

Por consequência, fez-se necessária a medição da microdureza, em busca de microestruturas (provavelmente) martensíticas, presentes na primeira região da ZAC, provenientes da alta taxa de resfriamento do processo.

Na tabela 5.4 estão os valores das máximas microdurezas e dos tempos de resfriamento calculados entre 800°C-500°C para cada corpo de prova.

Tabela 5.4: Resultados de microdureza da 1ª região da ZAC e tempo de resfriamento entre 800°C-500°C para cada energia de soldagem.

CORPO DE PROVA	AREA CORDÃO [mm <sup>2</sup> ]	MÁXIMA MICRODUREZA ZAC [HV 0,1]	TEMPO RESF. 800°-500°C [s]	ENERGIA SOLDAGEM [kJ/mm]
CP-01	64,4	483,6	5,7	1,0
CP-02	102,2	461,8	11,4	2,0
CP-03	131,1	447,1	17,0	3,0
CP-04	149,9	402,3	22,7	4,0

A partir dos dados da tabela 5.4, geraram-se os gráficos a seguir, para um melhor entendimento da variação dos parâmetros no decorrer do experimento.

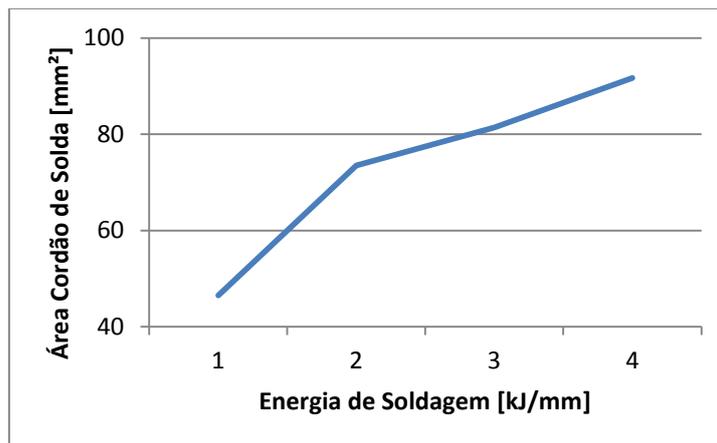


Figura 5.3: Correlação entre a área do cordão de solda e energia de soldagem

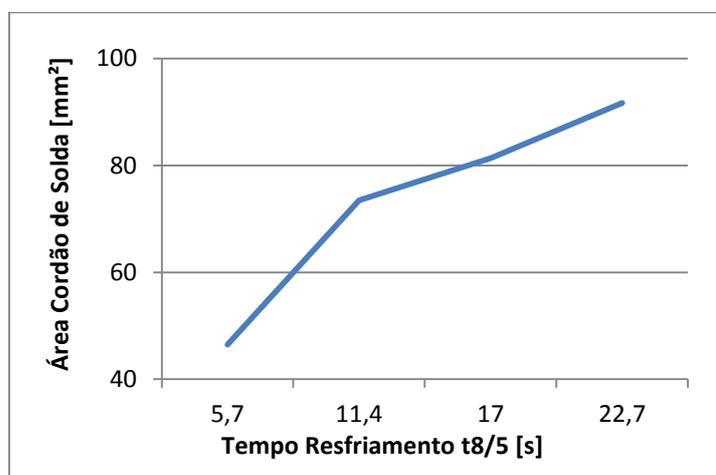


Figura 5.4: Correlação entre a área do cordão de solda e o tempo de resfriamento entre 800°C e 500°C.

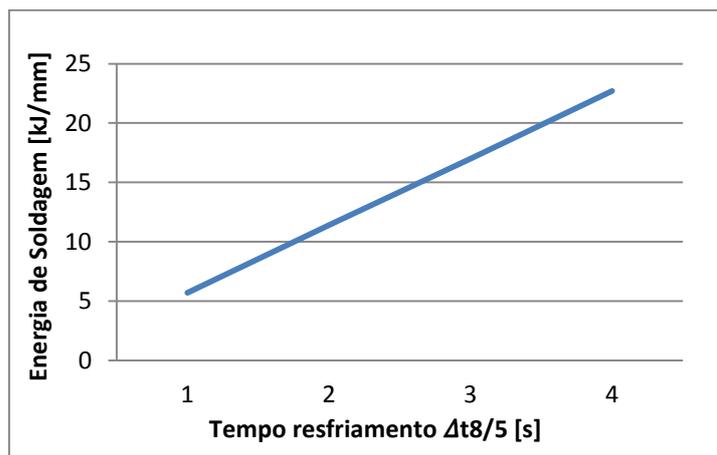


Figura 5.5: Correlação entre a energia de soldagem e o tempo de resfriamento entre 800°C e 500°C

Pelo fato do tempo de resfriamento ser diretamente proporcional à energia de soldagem, fato ilustrado na **Fig. 5.5**, obteve-se um crescimento na mesma proporção nos valores da seção transversal do cordão, tanto na **Fig. 5.3** como na **Fig. 5.4**.

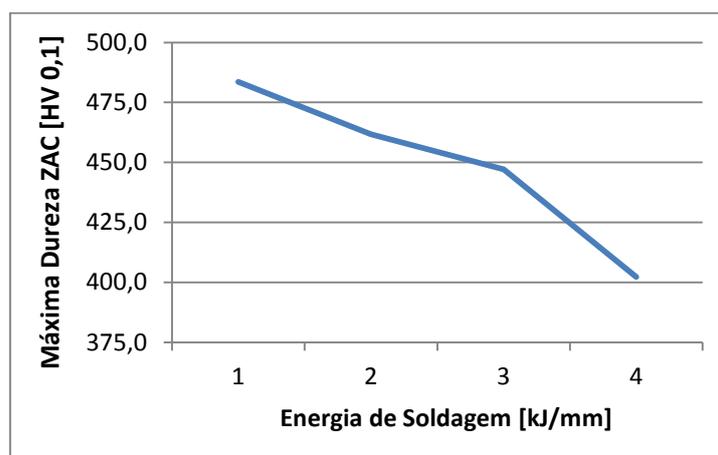


Figura 5.6: Correlação entre a máxima dureza na ZAC e a energia de soldagem

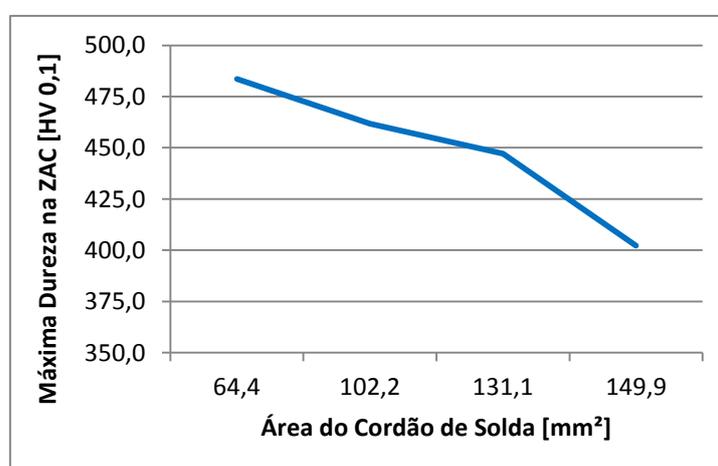


Figura 5.7: Correlação entre a máxima dureza na ZAC e a área do cordão de solda

Analisando-se as **Fig. 5.5** e **Fig. 5.7** é possível observar-se a queda do valor da máxima dureza da ZAC, conforme se aumenta a energia de soldagem.

Segundo Modenesi, 2012, esta queda na máxima dureza é devido ao acréscimo da energia de soldagem aumentar a extensão da ZAC, tornando a curva de repartição térmica mais aberta. O tempo de permanência acima da temperatura de austenitização também aumenta e a região de granulação grosseira tornando-a mais extensa e tende a apresentar um maior tamanho de grão, o que acaba diminuindo a dureza nesta região.

## 6 CONCLUSÕES:

A área da seção transversal do cordão de solda aumentou com o acréscimo de energia de soldagem (de 1 para 4 kJ/mm), pois ao se diminuir a velocidade de soldagem, mantendo-se a velocidade de alimentação do arame constante, maior foi a deposição de massa (de 20,9 para 61,4 g) por comprimento do cordão de solda.

A diminuição da dureza na ZAC (de 483,6 para 402,3 HV 0,1), com o aumento da energia de soldagem é confirmada pelo gráfico 5.1, pois durante o tempo de resfriamento entre 800°C e 500°C ocorrem as principais transformações de fase nos aços ao carbono. De acordo com o gráfico 5.4, o tempo de resfriamento aumenta com o acréscimo de energia (de 5,7 para 22,7 s), aumentando o tempo de permanência e tornando a região de granulação grosseira mais extensa e com maior tamanho de grão, conferindo menor resistência mecânica a junta.

Pela análise de dureza não foi possível se encontrar nenhuma região martensítica, devido à carga de 2 kgf (19,6 N) causar impressão relativamente grande e atingir mais de um tipo de microestrutura por ponto analisado. Para uma maior precisão, se fez necessária a medição da microdureza da região utilizando-se 0,1 kgf (0,98 N), com o objetivo de encontrar-se a máxima dureza na ZAC.

Na primeira região da ZAC, encontrou-se possível formação de martensita próxima da linha de fusão, principalmente em baixas energias de soldagem, onde ocorreu elevada velocidade de resfriamento.

Portanto, na soldagem de aços com médio teor de carbono, deve-se tomar cuidado nas baixas energias de soldagem com a formação de martensita, devido à alta velocidade de resfriamento, sendo necessário o pré-aquecimento da junta. Em altas energias, o importante é prever o tamanho da ZAC e principalmente da região de granulometria grosseira, que se torna maior podendo diminuir a resistência da junta soldada.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM Handbook "Welding, Brazing and Soldering" Cap. Energy Sources Used for Fusion Welding". ASM International, 1993

ASTM A 370; **"Standard Test Method and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products"**, 1977.

Chandel, R. S.; Seow, H. P., Cheong, F. L., **"Effect of Increasing Deposition Rate on the Bead Geometry of Submerged Arc Welds"**. Journal of Materials Processing Technology, v.72, Issue 1, p. 124-128, 1997.

Fortes C.; Araújo W.; **"Arco Submerso"**, Esab, 2004.

Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S.; **"Fundamentos da Transferência de Calor e Massa"**, LTC, 6ª ed., 2005.

Lancaster, J. F.; **"Metallurgy of Welding"**, 6<sup>th</sup> Ed., William Andrew, 1999.

Lodoño, A. J. R.; **"Precipitação de fases intermetálicas e austenite secundária na ZAC de soldagem multipasses de aços inoxidáveis duplex"**, São Paulo, 2001.

Machado, I. G.; **"Soldagem e Técnicas Conexas: Processos"**, Porto Alegre, 1996.

Machado, I. G.; **"Condução de Calor na Soldagem: Fundamentos e Aplicação"**, Porto Alegre, 2000.

Modenesi, P. J.; Marques, P. V.; Santos, D. B.; **"Introdução a Metalurgia da Soldagem"**, Belo Horizonte, 2012.

Modenesi, P. J.; **"Estimativa de Custos em Soldagem"**, 2001.

Norma EN1011-2: **"Recommendations for Welding of Metallic Materials"**, 2001.  
58p

Poorhaydari, K.; Patchett, B. M.; Ivey, D. G.; **"Estimation of Cooling Rate in the Welding of Plates with Intermediate Thickness"**, Welding journal, 84(10), 2005.