

# INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SOLDAGEM E TEMPERATURAS DE TRATAMENTO TÉRMICO NAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DE TUBOS API 5L X65 SOLDADOS PELO PROCESSO ‘ELECTRIC RESISTANCE WELDING’<sup>1</sup>

Christian Egidio da Silva<sup>2</sup>  
Carlos Ângelo Nunes<sup>3</sup>

## Resumo

A utilização do processo de soldagem de tubos por resistência elétrica tem-se intensificado na última década devido à evolução tecnológica dos aços em geral e às características bastante conhecidas de baixo custo e alta produtividade deste processo. Visando entender a influência da velocidade de soldagem e das temperaturas de tratamento térmico nas características mecânicas e microestruturais de tubos API 5L X65 soldados por este processo realizou-se o presente estudo. Para isto, efetuaram-se combinações destes parâmetros durante uma situação de processamento real de bobinas de aço-carbono para a fabricação de tubos. Foram realizadas caracterizações mecânicas – tração e impacto *Charpy* – e microestruturais de amostras retiradas da região de solda de cada uma das combinações efetuadas. Apesar de ser perceptível a existência de uma variação na morfologia dos grãos, quando são comparadas as distintas combinações, constatou-se que tal comportamento não ocasionou alteração significativa nos resultados de propriedades mecânicas. Ou seja, mesmo ocorrendo pequenas variações nos parâmetros estudados, dentro de certos limites, é perfeitamente possível que as normas de fabricação sejam plenamente atendidas. Isto quer dizer que eventuais oscilações destes parâmetros nem sempre ocasionam desvios das características de qualidade requeridas a ponto de desqualificar o processo ou mesmo reprovar tubos que tenham sido soldados nestas condições.

**Palavras-chave:** soldagem; resistência elétrica; tubos, API.

<sup>1</sup> 60º Congresso Anual da ABM – Belo Horizonte – Julho/2005

<sup>2</sup> Mestre, Engenheiro Químico – TENARIS-CONFAB / PPG-EM FAENQUIL

<sup>3</sup> Doutor, Engenheiro Metalurgista – PPG-EM FAENQUIL

## 1. Introdução

### 1.1 Processo de fabricação de tubos com soldagem por resistência elétrica

Tubos de diâmetro nominal situado entre 4 ½” e 24” podem ser fabricados pelo processo com soldagem por resistência elétrica – *Electric Resistance Welding* (ERW), que consiste num processamento contínuo de tiras de aço (bobina) através de um equipamento de conformação que tem por finalidade o dobramento gradativo das tiras, até que se obtenha a forma de coroa circular para uma posterior soldagem das bordas pelo processo por resistência elétrica.

Após a operação de soldagem, submete-se a região de junção a um tratamento térmico, operação esta realizada com os tubos ainda em movimento, na mesma velocidade de soldagem, e em seguida, efetua-se a calibração dos tubos fabricados através do ajuste de perímetro, diâmetro e empeno. Uma vez feita a calibração dimensional, submete-se os tubos a inspeções e testes que objetivam avaliar a integridade e qualidade do mesmo para a especificação de fabricação considerada.

### 1.2 Processo de soldagem por resistência elétrica

O processo de soldagem por resistência elétrica, utilizando alta frequência, pode ser de dois tipos diferentes, dependendo de como a corrente é fornecida à peça a soldar: por indução (*High frequency induction welding* – HFIW) ou por contatos deslizantes (*High frequency resistance welding* – HFRW).

Na Figura 1 podemos visualizar uma representação do processo de soldagem por contatos deslizantes, que é o objeto do presente estudo, e que doravante será identificado como ERW – *Electric Resistance Welding* (para fins didáticos).

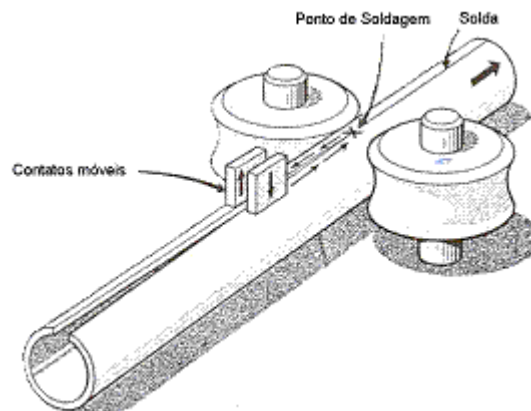


Figura 1. Representação do processo de soldagem por contatos deslizantes - ERW (TUDBURY, 1960).

Soldagem por alta frequência inclui todos os processos cuja junção entre metais é obtida através do aquecimento da peça em função da resistência que a mesma impõe ao fluxo da corrente elétrica (KEARNS, 1984). Esta corrente é gerada em função da aplicação (para o caso da solda obtida por contatos deslizantes) ou da indução (para o caso da solda obtida por indução) de uma voltagem através das bordas da bobina que se encontram em processo de convergência (WRIGHT, 2003).

O calor gerado pela passagem da corrente, obtido desta forma, é confinado a um pequeno volume de metal ao longo das bordas a serem unidas (PHILLIPS, 1964).

No processo ERW (por contatos deslizantes), a corrente elétrica é conduzida até a peça a soldar através de contatos que fisicamente ‘tocam’ a superfície do metal (KEARNS, 1984)(WRIGHT, 2003). As bordas das chapas atuam como dois condutores colocados lado a lado.

### 1.3 Tratamento térmico de normalização

Após a operação de soldagem, submete-se a região de junção (e adjacências) a um tratamento térmico realizado por meio de indução, operação esta realizada com os tubos ainda em movimento, na mesma velocidade de soldagem.

Esta etapa é realizada empregando-se duas unidades de tratamento térmico, dispostas em série. Em função das características de qualidade desejadas e dimensionais do tubo a ser fabricado, são definidas as respectivas temperaturas de tratamento térmico.

Um tratamento térmico deve ser realizado logo após a operação de soldagem, objetivando refinar os grãos grosseiros formados durante esta operação – devido ao superaquecimento, e atingir as propriedades mecânicas desejadas para a região de solda, de tal forma que se aproximem dos valores observados para o metal de base do tubo (GÄRTNER; DÜREN; STOLZENBERG, 1996). Através da utilização deste dispositivo, consegue-se obter estruturas bastante finas e com ótimas propriedades mecânicas.

Lebedev e Lebedev (1974) indicam que após tratamento térmico as propriedades da solda se aproximam daquela do material de base. A pequena diferença ainda existente pode ser atribuída à presença de defeitos na linha central de solda.

Após a realização da normalização da região de solda de tubos soldados por resistência elétrica, esta região (solda) passa a apresentar boa tenacidade e temperatura de transição dúctil-frágil satisfatória (ARONSON; KORCHYNSKY; MIHELICH, 1969).

Através de ensaios micrográficos, efetua-se a análise da microestrutura da solda para verificar a eficiência do tratamento térmico.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1 Processamento dos tubos

Empregou-se como matéria-prima bobinas de aço-carbono de dimensões nominais 1.463 mm x 6,35 mm (largura x espessura). A composição química típica do aço empregado (bobinas) encontra-se detalhada na Tabela 1. Tais bobinas foram processadas visando a fabricação de tubos de dimensões nominais 457,2mm x 6,35mm (18" x 0,250") conforme norma API 5L (API, 2000), qualidade X65. Para isto, utilizou-se o processo de formação contínua com soldagem *Electric Resistance Welding* (ERW).

Cada dimensional de tubo e qualidade esperada segundo norma API 5L (API, 2000) apresentam parâmetros de processo pré-estabelecidos e qualificados, o que limita sua variação durante o processamento das bobinas. Para o processamento do presente estudo, os parâmetros 'Velocidade de Soldagem' e 'Temperaturas de Tratamento Térmico' apresentavam os seguintes valores nominais e respectiva tolerância:

- *Velocidade de soldagem*:  $0,27 \pm 0,3$  m/s ( $16 \pm 2$  m/min).
- *Temperatura de tratamento térmico TOCCO<sup>®</sup>*:  $850 \pm 50$  °C.
- *Temperatura de tratamento térmico THERMATOOL<sup>®</sup>*:  $1020 \pm 50$  °C.

Tabela 1. Composição química típica do aço empregado (% peso).

C	Mn	P	S	Si	V	Nb	Cu	Cr	Mo	Ni	Ti	Al
0,12	1,46	0,018	0,004	0,19	0,038	0,050	0,029	0,018	0,004	0,028	0,017	0,027

Durante a fabricação dos tubos, foram efetuadas combinações entre os parâmetros 'Velocidade de Soldagem' e 'Temperaturas de Tratamento Térmico'. Procurou-se efetuar combinações entre todos os valores nominais e também entre os limites de controle. Ambos os parâmetros são passíveis de medições – através da utilização de equipamentos adequados como o Tacômetro e Pirômetro Ótico, respectivamente, para avaliação da velocidade de soldagem e das temperaturas de tratamento térmico, conforme pode ser visto na Tabela 2.

Cada condição de processamento corresponde a uma combinação única de velocidade de soldagem, temperatura da estação de tratamento térmico TOCCO® e temperatura da estação de tratamento térmico THERMATOOL®. Para cada condição de processamento, foi retirado um anel da extremidade de um tubo (de aproximadamente 500 mm de comprimento), e destes anéis, corpos-de-prova para avaliação das propriedades mecânicas e caracterização microestrutural.

As bobinas empregadas para a fabricação dos tubos objetos do presente estudo pertenciam a uma obra em específico, logo, existiram restrições que impossibilitaram extrapolar mais ainda os valores dos parâmetros (para mais ou para menos), pois poderiam ser ultrapassados os limites extremos de controle já qualificados para atender o projeto original. As combinações foram efetuadas alternando-se os parâmetros, porém nunca ultrapassando tais limites de controle.

Tabela 2. Parâmetros de processamento adotados para a fabricação dos tubos e respectiva representação.

Velocidade	Temperatura (°C)		Representação
	TOCCO®	THERMATOOL®	
0,27 m/s (16 m/min)	800	970	16-800-970
		1020	16-800-1020
		1070	16-800-1070
	850	970	16-850-970
		1020	16-850-1020
		1070	16-850-1070
	900	970	16-900-970
		1020	16-900-1020
		1070	16-900-1070
0,30 m/s (18 m/min)	850	1020	18-850-1020
		1070	18-850-1070
	900	1020	18-900-1020
		1070	18-900-1070

Para a retirada dos corpos-de-prova, procedeu-se da seguinte maneira durante o processamento dos tubos:

- Regulagem dos parâmetros de processo para uma determinada combinação;
- Início do processamento;
- Decorridos alguns metros processados, seleção e identificação de um tubo para amostragem;
- Regulagem dos novos parâmetros de processo, e repetem-se as etapas anteriores.

A retirada dos respectivos corpos-de-prova foi conduzida conforme o esquema apresentado na Figura 2, abaixo. Nesta figura, pode-se visualizar a localização da solda em cada corpo-de-prova.

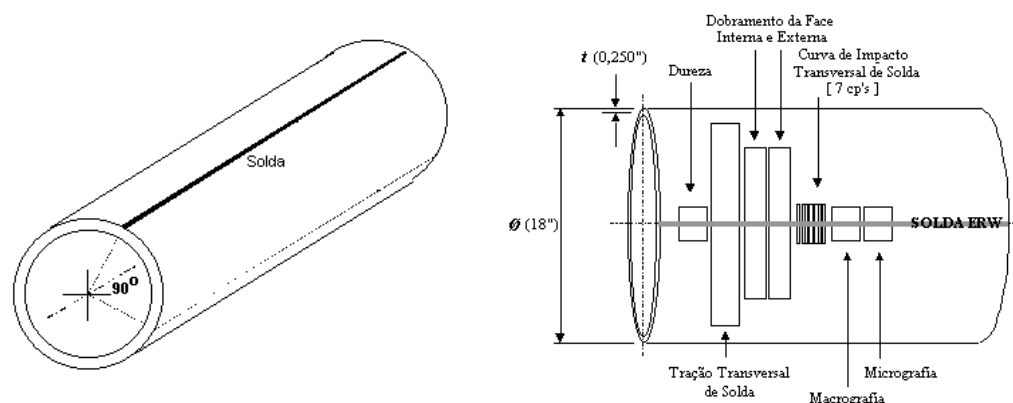


Figura 2. Esquema de retirada dos corpos-de-prova dos anéis dos tubos.

## 2.2 Caracterização mecânica

Para verificação das propriedades mecânicas, foram realizados ensaios de tração e impacto *Charpy*, de acordo com a norma API 5L (API, 2000).

Todos os testes foram conduzidos transversalmente à direção da solda, na região de junção, e são previstos para avaliação dos requisitos exigidos pela norma e conseqüente homologação dos tubos para uso. Para todos os corpos-de-prova (Figura 2), a região da solda encontrou-se centralizada.

O ensaio de tração foi realizado à temperatura ambiente, e destinou-se somente à avaliação da 'resistência à tração'.

Para o ensaio de impacto *Charpy* empregaram-se as seguintes temperaturas de teste: +20°C, 0°C, -20°C, -40°C e -60°C. Apesar da norma API 5L (API, 2000) explicitar que o ensaio em questão deve ser realizado na temperatura de 0°C, procedeu-se desta maneira para avaliar o comportamento do material em outras temperaturas, ou seja, em condições mais severas. Elegeu-se a temperatura de -60°C como a mínima temperatura de ensaio em função do histórico de consultas e obras fabricadas nos últimos anos.

## 2.3 Caracterização microestrutural

Foram realizados exames micrográficos da região da solda de todas as combinações, com o objetivo de investigar a existência de diferenças relevantes na estrutura do material na zona de junção e adjacências, como função da variação dos parâmetros objeto do presente estudo. Para todas as amostras (Figura 2), a região da solda encontrou-se centralizada.

A preparação das amostras consistiu das seguintes operações: lixamento (granos #220 a #600), pré-polimento, polimento e ataque químico (Nital 3%).

Para a análise micrográfica, foram utilizados microscópios óticos, obtendo-se as fotomicrografias nos mesmos equipamentos.

## 3. Resultados e discussão dos resultados

### 3.1 Caracterização microestrutural

Todas as amostras evidenciaram uma fusão adequada do metal na região de junção ao longo de toda a espessura.

As fotomicrografias obtidas para a região de fusão e adjacências, para todas as combinações estudadas, evidenciaram uma estrutura de grãos finos de ferrita e perlita.

Embora não tenham sido medidos os tamanhos dos grãos, ao se comparar as estruturas de cada uma das combinações, pode-se perceber o crescimento dos grãos da microestrutura à medida que as temperaturas das estações de tratamento térmico aumentavam, independente da velocidade de soldagem empregada. No entanto, para a velocidade de 0,30 m/s (18 m/min) a variação da estrutura foi mais discreta do que para a velocidade de 0,27 m/s (16 m/min).

Nas Figuras 3 e 4 podemos visualizar as microestruturas da região de solda e também das regiões adjacentes à linha de solda, obtidas para algumas combinações.

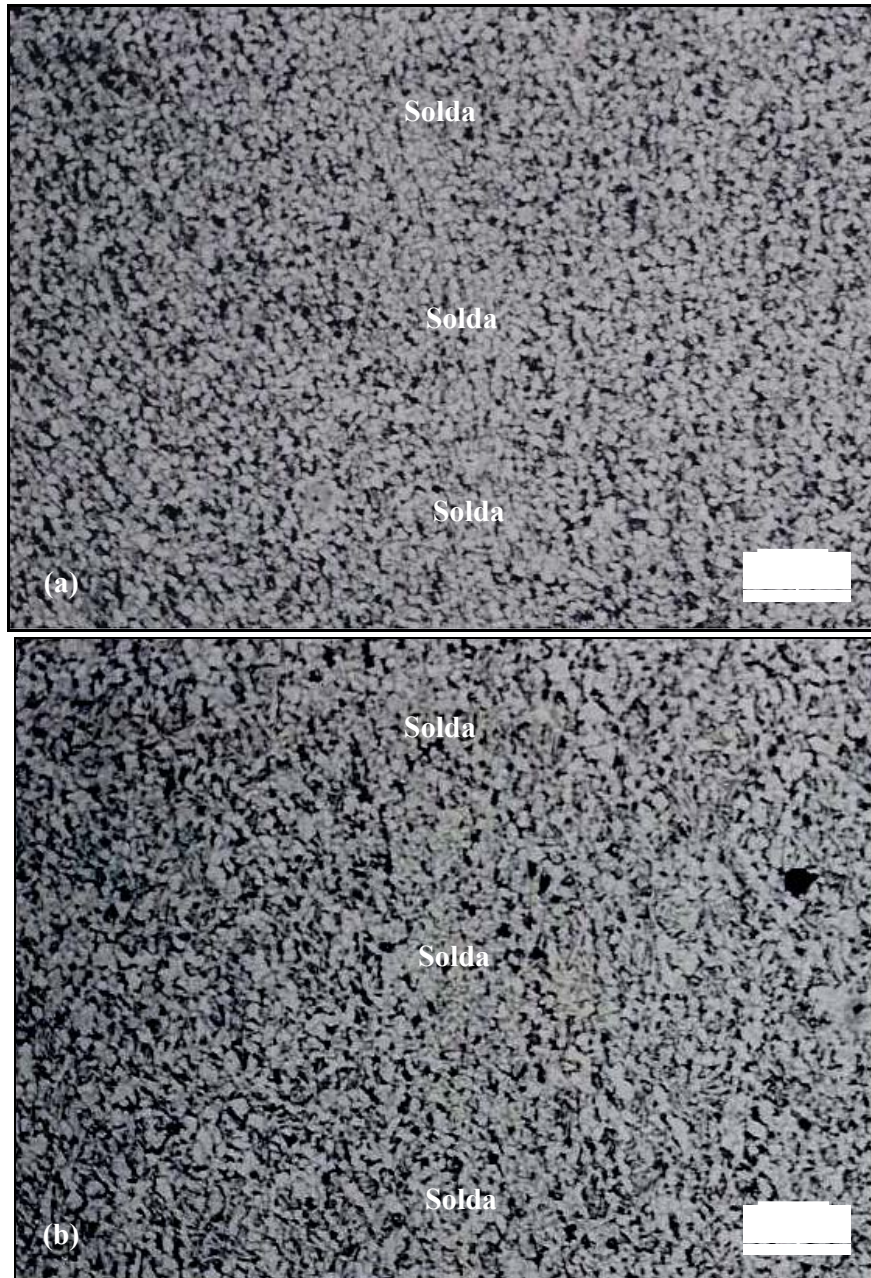


Figura 3. Fotomicrografias. Combinações **16-800-970** (a) e **16-800-1070** (b).



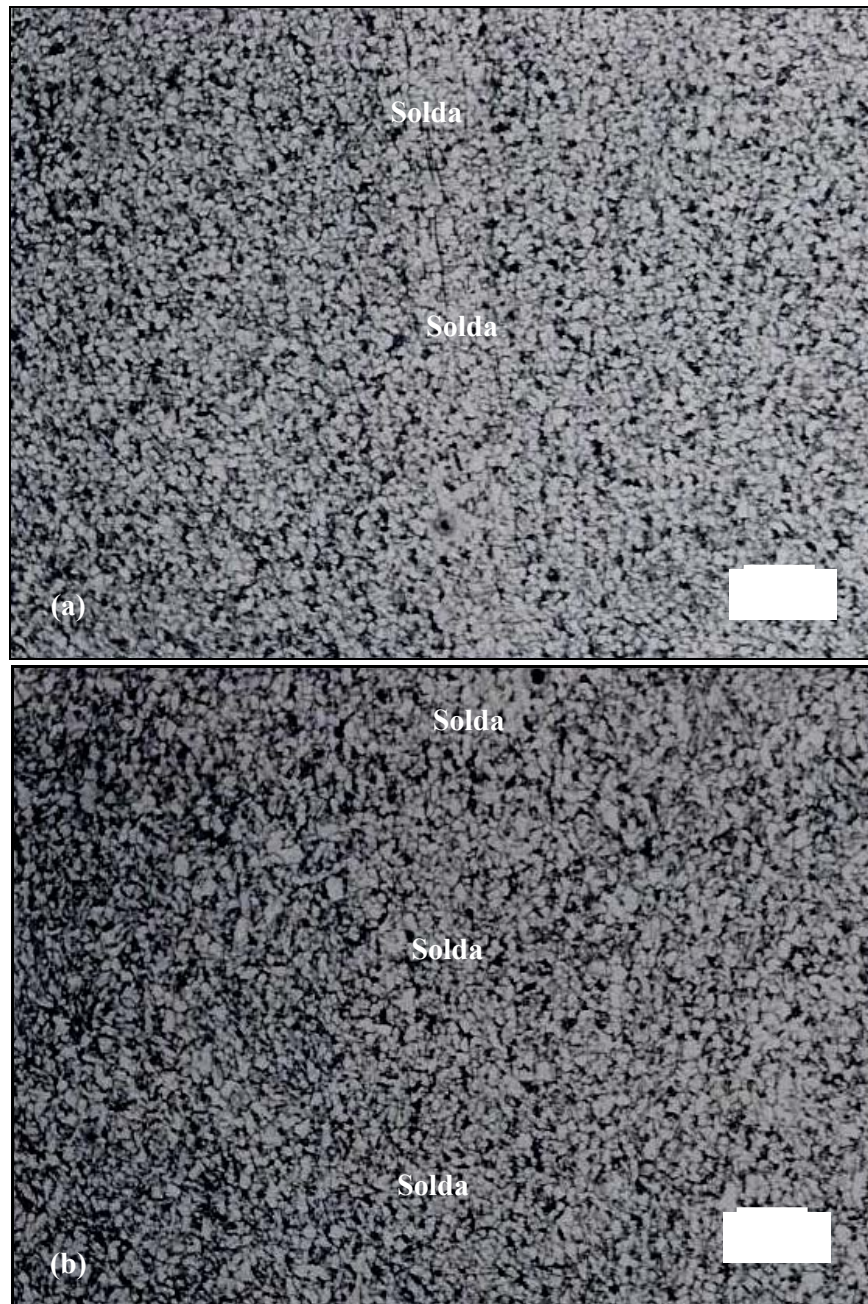


Figura 4. Fotomicrografias. Combinações **18-900-1020** (a) e **18-900-1070** (b).

Para algumas combinações em específico (especialmente para aquelas em que a temperatura THERMATOOL<sup>®</sup> era igual a 1070°C), o crescimento dos grãos pareceu ser mais acentuado, obtendo-se, com isso, estruturas aparentemente mais grosseiras – o que deveria ser evitado. Este fato poderia prejudicar algumas propriedades mecânicas essenciais requeridas pela norma de fabricação API 5L (API, 2000). No entanto, para estas combinações que apresentaram uma estrutura bastante diferente das demais (crescimento demasiado), foram observados bons resultados para os ensaios de impacto *Charpy* e tração transversal.

### 3.2 Caracterização mecânica

#### 3.2.1 Ensaio de Tração

Na Figura 5 podem ser visualizados os resultados de ‘resistência à tração’ obtidos no ensaio de tração transversal de solda, para as diferentes combinações.

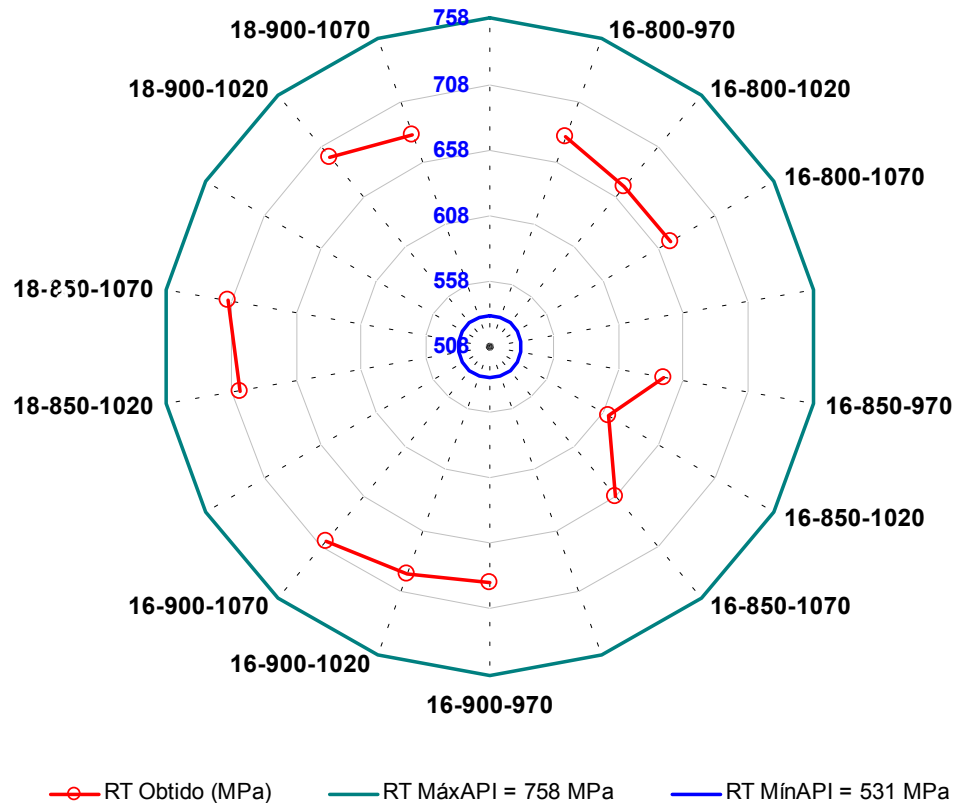


Figura 5. Resultados de resistência à tração – RT (MPa) obtidos no ensaio de tração transversal de solda: obtido *versus* especificado na norma API 5L (API, 2000).

A ruptura de todos os corpos-de-prova ocorreu nas adjacências da região de solda, e não na linha de junção (solda). Isto evidencia a capacidade da solda suportar cargas no mínimo iguais àquelas suportadas pelo material de base do tubo.

O tubo representativo da combinação “16-850-1020” apresentou um valor de resistência à tração bastante inferior aos demais, o que nos propõe que algum problema ocorreu, seja durante o processamento ou mesmo durante a preparação do respectivo corpo-de-prova.

Excluindo-se esta combinação desta análise, a variação dos valores de resistência à tração para as situações em que foram empregadas velocidades de soldagem de 0,27 m/s (16 m/min) foi de 23 MPa (~3%) entre os valores observados. Já para as situações em que se empregaram velocidades de soldagem de 0,30 m/s (18 m/min), a variação observada foi de 17 MPa (~2%). Ou seja, o comportamento em ambas as velocidades de soldagem, para o ensaio de tração, é praticamente o mesmo independente da temperatura de tratamento térmico empregada. Aparentemente para a velocidade de 0,27 m/s (16 m/min) existe uma ligeira tendência no aumento da resistência à tração à medida que aumenta a temperatura da estação de tratamento



térmico – embora não seja tão representativo assim, comportamento este que já não pode ser visualizado para a velocidade de 0,30 m/s (18 m/min).

Tendo em vista a proximidade dos resultados para as diferentes combinações de temperaturas, é conveniente que a combinação adotada apresente os menores valores de temperaturas de tratamento térmico possíveis, o que minimizaria o desgaste do equipamento, a ainda, contribuiria para a manutenção de um tamanho de grão menor.

Como logo após as estações de tratamento térmico existe uma coluna de resfriamento com água, ao empregar-se uma velocidade maior durante o processamento dos tubos, a região tratada chega aquecida na zona de resfriamento a uma temperatura superior àquela que poderíamos obter caso estivéssemos empregando velocidades consideradas ‘padrão’ para o processo. Ao compararem-se os resultados de tração para as duas velocidades de soldagem, mantendo-se como parâmetro constante a respectiva temperatura de tratamento térmico, pode-se constatar que para a velocidade de 0,30 m/s (18 m/min) o resultado médio de resistência apresentou-se ligeiramente superior ao resultado médio de resistência obtido para a velocidade de 0,27 m/s (16 m/min). Isto evidencia que a velocidade de soldagem da linha influencia a resistência à tração da região de solda: um incremento na velocidade de soldagem tende a aumentar a resistência à tração da solda.

### 3.2.2 Ensaio de impacto *Charpy*

De acordo com a norma API 5L (API, 2000), a temperatura a ser considerada para execução do ensaio deve ser 0°C e o valor mínimo de *energia média absorvida por unidade de área da seção transversal resistente* para um conjunto de três corpos-de-prova, nesta temperatura, correspondente a 102 J/cm<sup>2</sup>. Para que o material seja considerado aprovado para utilização, em hipótese alguma se pode aceitar resultado de energia absorvida para corpo-de-prova individual inferior a 75% do valor previsto para a média (média mínima de 102 J/cm<sup>2</sup> – individual mínimo de 77 J/cm<sup>2</sup>).

Na Figura 6 podem ser visualizados os resultados de energia absorvida para todas as combinações em que se empregaram, respectivamente, velocidades de soldagem de: **(a)** 0,27 m/s (16 m/min) e **(b)** 0,30 m/s (18 m/min).

Sobrepondo os resultados de energia absorvida obtidos para todas as combinações, pode-se perceber que de uma maneira geral, até a temperatura de -20°C o comportamento é aproximadamente o mesmo – com algumas pequenas oscilações que podem ser atribuídas à heterogeneidade do material. Vale lembrar que o intervalo de temperatura de -20°C a +20°C compreende as temperaturas de teste normalmente exigidas nas especificações de fabricação de tubos. Exceção feita a uma das combinações, cujos resultados apresentaram-se bastante dispersos e baixos (comparando-o aos demais), o que nos possibilita supor que ocorreu algum problema, seja na preparação dos respectivos corpos-de-prova ou na própria execução do teste (vide resultados circulados na Figura 6b).

Ficou claro também que, independente da combinação de parâmetros, para a temperatura de -60°C a região de solda é muito instável quanto a este requisito (energia absorvida), obtendo-se valores muito dispersos, e em vários casos extremamente baixos.

De posse dos resultados apresentados, poderíamos considerar a temperatura de -40°C como “temperatura limite de confiabilidade” para este material. Apesar de observarmos valores ligeiramente mais dispersos para esta temperatura, quando comparados aos valores observados para a temperatura de teste de -20°C, foram obtidos altos valores de energia absorvida para esta temperatura de teste.

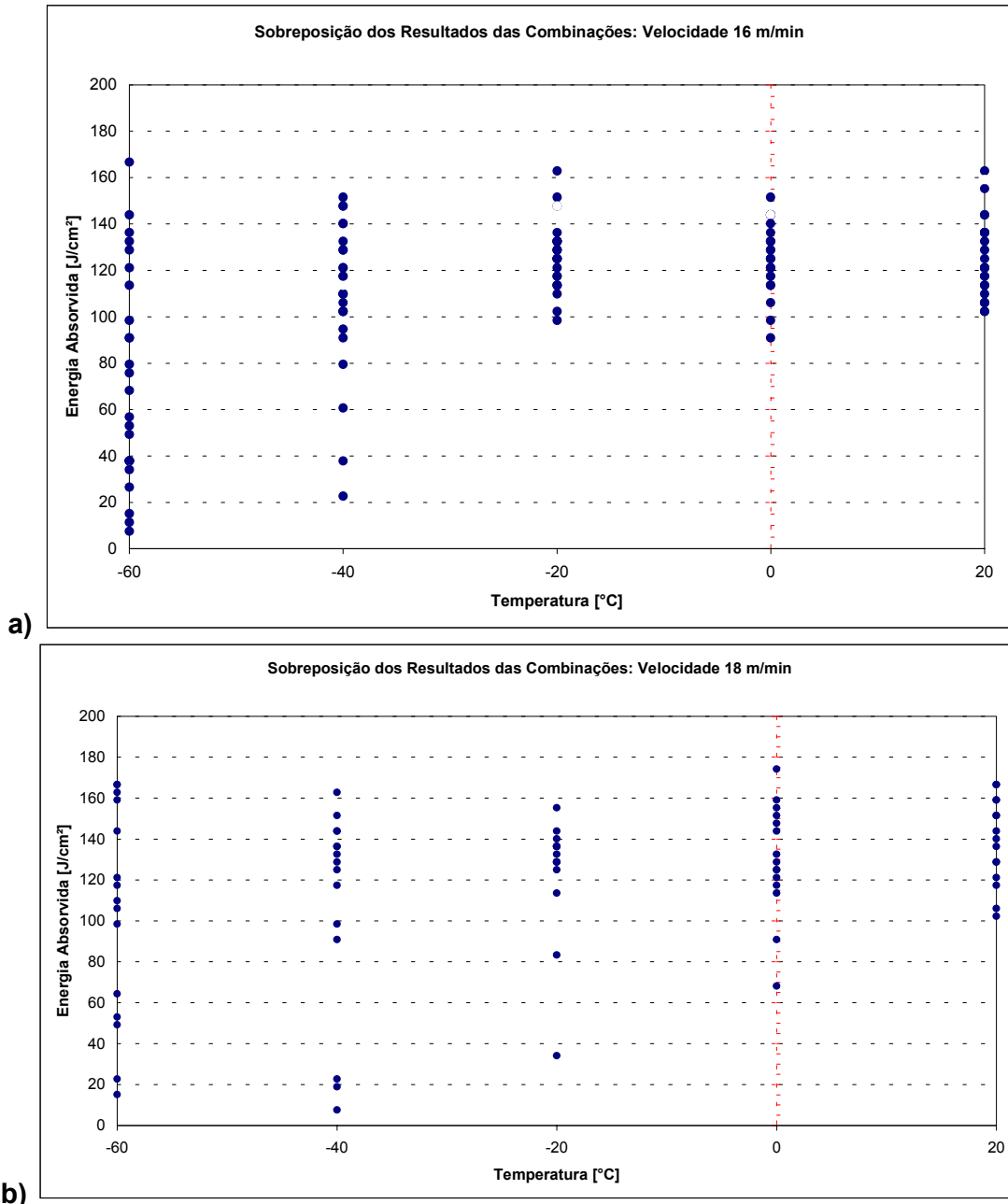


Figura 6. Resultados de energia absorvida por unidade de área no ensaio de impacto Charpy: **(a)** 0,27 m/s (16 m/min) **(b)** 0,30 m/s (18 m/min).

Percebeu-se, ainda, que a dispersão dos resultados é superior para a velocidade de 0,30m/s (18 m/min) em todas as temperaturas de teste. Outra evidência é o aumento da dispersão dos resultados à medida que a temperatura de ensaio reduz (inferior a -20°C).

Não foi possível caracterizar claramente a existência de tendências, seja de crescimento ou decréscimo, nos níveis de energia absorvida em função da variação das temperaturas de tratamento térmico empregadas no presente estudo.

#### 4. Conclusão

Com relação ao atendimento da norma API 5L (API, 2000), os resultados deste trabalho nos mostraram que apesar das variações da velocidade de soldagem, de 16 a 18 m/min, e das temperaturas de tratamento térmico das estações TOCCO<sup>®</sup>, de 800°C a 900°C, e THERMATOOL<sup>®</sup>, de 970°C a 1070°C, foram obtidos valores satisfatórios para os quesitos de qualidade previstos, atendendo plenamente a norma de fabricação em questão. Tais resultados apresentaram-se, ainda, relativamente distantes dos limites definidos pela norma.

Foi possível observar que a utilização da menor velocidade de soldagem associada a temperaturas mais elevadas conduz a uma estrutura constituída de grãos ligeiramente maiores, mantendo-se, no entanto, uma estrutura composta de constituintes ferrita e perlita.

Apesar de ser perceptível a existência de uma variação na morfologia dos grãos, quando são comparadas as distintas combinações, constatou-se que tal comportamento não ocasionou alteração significativa nos resultados de propriedades mecânicas. Ou seja, mesmo ocorrendo pequenas variações nos parâmetros 'velocidade de soldagem' e 'temperaturas de tratamento térmico', dentro de certos limites, é perfeitamente possível que as normas de fabricação sejam plenamente atendidas. Isto quer dizer que eventuais oscilações destes parâmetros nem sempre ocasionam desvios das características de qualidade requeridas pelas especificações e normas de fabricação a ponto de desqualificar o processo ou mesmo reprovar tubos que tenham sido soldados nestas condições – o que é um aspecto positivo.

#### 5. Referências

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Specification for Line Pipe – API Specification 5L**. Washington: 42<sup>nd</sup> Edition, 2000.
- TUDBURY, C.A. **Basics of Induction Heating**. New York: John F. Rider Publisher, Inc., v.1, 1960.
- KEARNS, W.H. **Welding Handbook – Welding Processes: Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes**. Miami: American Welding Society, v.3, 1984.
- WRIGHT, J. **Optimizing Efficiency in HF Tube Welding Processes**. Electronic Heating Equipment Inc, WA, USA, 2003.
- PHILLIPS, A.L. **Welding Handbook – Welding Processes: Gas, Arc and Resistance**. American Welding Society, 5<sup>th</sup> Edition, v.2, 1964.
- GÄRTNER, A.W., DÜREN, C.F., STOLZENBERG, G. HFI-Welded Line Pipe of High Quality. **Mannesmannröhren-Werke AG**. Germany, Paper 4-2, p.137-144, 1996.
- LEBEDEV, V.K., LEBEDEV, V.V. Flashing of the Metal Edges in High Frequency Welding. **Ibid**, 27 (11), p.16-19, November, 1974.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. Associação Brasileira de Metais. São Paulo: 6<sup>a</sup> Edição, 1990.
- ARONSON, A.H., KORCHYNSKY, M., MIHELICH, J.L. Improvements in Electric Resistance Welded, X60 Line Pipe Technology. **Welding Journal**, 473-S, November, 1969.

**Abstract**

The use of Electric Resistance Welding process was intensified in the last decade due to the technology evolution of steel and the characteristics of low cost and high productivity of this process. The objective of this present study is to understand the influence in the welding speed and temperatures of heat treatment in the mechanical and micro structural characteristics of API 5L X65 pipes welded by this process – essential parameters to assure the quality of the product and provide an optimizing during the manufacturing process. For this, it was effected combinations of these parameters during the actual process of the steel coils for manufacturing the pipes. It was performed mechanical – tensile and Charpy test – and micro structural characterizes in the samples removed of the weld region of each combination. Although it is perceivable the existence of a variation in the morphology of the grains, when the distinct combinations are compared, it was noted that behavior did not cause significant alteration in the results of mechanical properties. In other words, even occurring small variations in the studied parameters, respecting certain limits, it is possible that the manufacture norms are complied with. It means that eventual oscillations of these parameters not always causes deviations of the characteristics of quality required that can disqualify the same process or to disapprove pipes that have been welded in these conditions.

**Key-words:** welding; electric resistance; pipes; API.