

INVESTIGAÇÃO DA CINÉTICA DE FORMAÇÃO DA MICROESTRUTURA NA REGIÃO DE SOLDA E ADJACÊNCIAS EM UM PROCESSO DE SOLDAGEM DE TUBOS POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA ¹

Christian Egidio da Silva ²

Jorge Otubo ³

Resumo

Características bastante conhecidas como o baixo custo e alta produtividade, associadas à evolução tecnológica dos aços em geral, têm contribuído para o crescente uso de tubos de aço-carbono fabricados pelo processo com soldagem por resistência elétrica. Visando entender a cinética de formação da microestrutura na região de solda e adjacências, de tubos fabricados por este processo, realizou-se o presente estudo. Para isto, foram simuladas algumas condições de processamento no intuito de serem obtidas amostras representativas das possíveis microestruturas formadas ao longo de um processamento normal. Foram realizadas caracterizações microestruturais das amostras retiradas da região de solda de cada uma das condições adotadas na presente investigação. Foi perceptível a existência de uma variação microestrutural considerável ao longo do processo ao serem efetuadas tais simulações. Pode-se constatar a importância da utilização de uma operação de normalização sobre a região de solda e respectivas adjacências, o que proporcionou uma homogeneização da estrutura, aproximando-a daquela apresentada pelo metal de base do tubo.

Palavras-chave: Soldagem; Resistência elétrica; Tubos; Microestrutura.

Abstract

Characteristics well known as the reduced cost and high productivity, associated to the technology evolution of the steel, have helped to the increase on electric resistance welded pipe consumption. The present research was conducted to focus on weld and vicinity microstructures evolution of pipes manufactured by this process. Many process conditions were simulated to obtain samples of possible generated microstructures along a normal production. It was conducted micro structural characterization of the samples taken from the weld region for each condition. It was realized the existence of an important micro structural variation along the process. This way, it is clear the importance of normalization heat treatment on the weld and contiguous region, which allows obtaining a uniform structure similar to that showed by the base metal of the pipe.

Key words: Welding; Electric resistance; Pipe; Microstructure.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Mestre, Engenheiro Químico – TenarisConfab / PPG-EAM ITA

³ Doutor, Físico – PPG-EAM/ITA

1 INTRODUÇÃO

1.1 Processo de Fabricação de Tubos com Soldagem por Resistência Elétrica

Tubos de aço-carbono com diâmetro nominal de até ~711mm (28”) podem ser fabricados pelo processo com soldagem por resistência elétrica – *Electric Resistance Welding* (ERW), de maneira contínua. A chapa de aço, em forma de bobina, passa por uma série de matrizes e é conformada gradativamente até formar um tubo circular. Uma vez que as bordas entrem em contato entre si, inicia-se o processo de soldagem por resistência elétrica. Simultaneamente à operação de soldagem, aplica-se uma pressão lateral sobre o tubo, de forma que as bordas das chapas se mantenham em constante contato uma com a outra. Em função desta pressão aplicada (recalque) uma certa quantidade do material fundido é expulso formando uma rebarba na parte externa e outra na parte interna do tubo. O material em excesso é removido através de uma raspagem para uniformizar a espessura do tubo. Ainda na mesma velocidade, após a soldagem e raspagem, a região da junção passa por um tratamento térmico. Em seguida, efetua-se a calibração dos tubos fabricados através do ajuste do perímetro, do diâmetro e do empeno. Posteriormente, o tubo soldado passa por inspeções, que objetivam avaliar a integridade e qualidade do mesmo em relação à especificação de fabricação considerada. A Figura 1 é uma representação esquemática do processo de soldagem contínua ERW – *Electric Resistance Welding*.

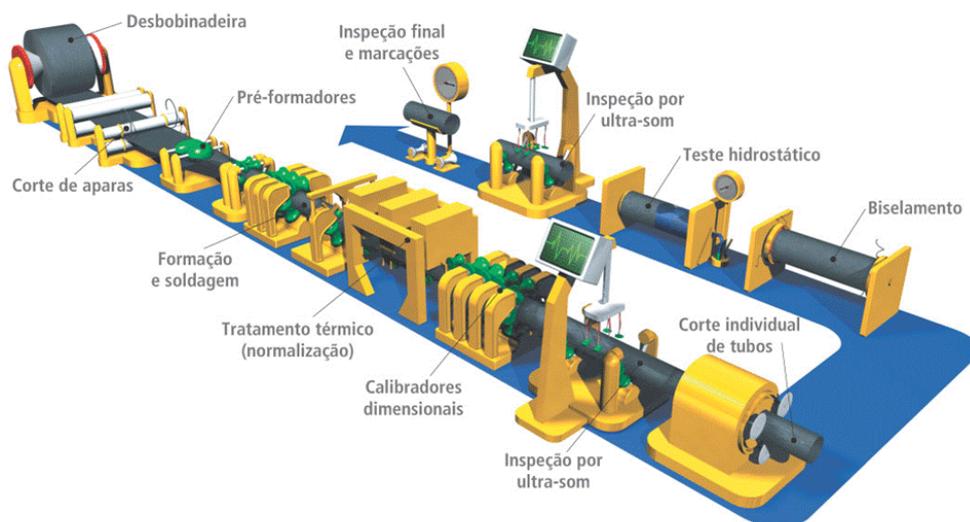


Figura 1. Representação esquemática do processo de soldagem contínua ERW.

Em função das características requeridas são definidas as respectivas temperaturas de tratamento térmico objetivando homogeneizar a microestrutura formada durante a operação de soldagem 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. ⁽¹⁾ Através da utilização deste dispositivo, consegue-se obter estruturas homogêneas e com ótimas propriedades mecânicas. Silva *et al.* ⁽²⁾ obtiveram excelentes resultados de tenacidade na região de solda de tubos fabricados pelo processo com solda por resistência elétrica.

Trabalhos conduzidos já na década de 60 apontavam para a necessidade de realização de normalização da região de solda e adjacências no intuito de melhorar sua ductilidade.⁽³⁾

Silva⁽⁴⁾ simulou várias condições de processamento para a fabricação de tubos pelo processo por resistência elétrica, e constatou que a estrutura da região de solda e adjacências aproximava-se muito do metal de base, após normalização, independente dos parâmetros empregados.

2 Materiais e métodos

2.1 Processamento dos Tubos

Empregou-se como matéria-prima bobinas de aço-carbono de dimensões nominais 558,6mm x 8,05mm (largura x espessura) para a fabricação, pelo processo de conformação e soldagem contínua por resistência elétrica, de tubos de dimensões nominais 177,80mm (7") x 8,05mm (0,317") conforme norma API 5CT 2005 (5), qualidade J55 PSL1. A composição química do aço empregado (bobinas) encontra-se na Tabela 1.

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

C	Mn	P	S	Si	V	Nb	Cr	Mo	Cu	Ni	Ti	Al	Ceq ^(*)
0,11	1,05	0,016	0,004	0,24	0,002	0,019	0,02	0,00	0,00	0,02	0,004	0,038	0,29

$$^{(*)} Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \left(\frac{Cr + Mo + V}{5} \right) + \left(\frac{Ni + Cu}{15} \right)$$

Para o presente processamento foram utilizadas condições normais de operação, sendo que os mesmos foram mantidos ao longo de todo o processo. Vale citar os seguintes parâmetros nominais de processo:

- *Velocidade de soldagem:* 0,32±0,03m/s (19±2m/min).
- *Aporte de calor (Heat Input):* 137,3 J/mm².
- *Temperatura de tratamento térmico 1ª estação:* 850±50 °C.
- *Temperatura de tratamento térmico 2ª estação:* 900±50 °C.
- *Temperatura de tratamento térmico 3ª estação:* 950±50 °C.

A velocidade de soldagem foi verificada através de um tacômetro. As temperaturas de tratamento térmico foram monitoradas através de um sistema automático, sendo seus resultados registrados graficamente. Além disso, empregou-se um pirômetro ótico para avaliação da temperatura como recurso para validar o funcionamento do sistema automático.

Para o presente estudo foram definidas algumas condições (combinações) para a retirada de amostras. Tais condições foram definidas de forma a evidenciar exatamente a estrutura do material na região de solda num dado momento ao longo do processo – como se o processamento estivesse sendo congelado naquele momento e a estrutura correspondente “fotografada”. Isso se fez necessário para que a evolução da estrutura ao longo do processo pudesse ser acompanhada.

Para cada condição foram retiradas amostras para a preparação de corpos-de-prova específicos para caracterização microestrutural e avaliação do perfil de dureza (micro-identação). Na Tabela 2 estão discriminadas as condições (combinações) definidas para a amostragem em questão. As amostras foram retiradas transversalmente à direção da solda.

Tabela 2. Condições definidas para a retirada de amostras durante o processamento.

Condição	Raspagem ^(a)	Tratamento térmico ^(b)	Resfriamento com água ^(c)
#1	Não	Não	Não
#2	Sim	Não	Não
#3	Sim	Sim	Não
#4 ^(d)	Sim	Sim	Sim

- (a) Imediatamente após a soldagem efetua-se uma raspagem do material expulso (*upset*), tanto no sentido ascendente (do meio da espessura do tubo para cima) quanto no sentido descendente (do meio da espessura do tubo para baixo). Esta expulsão é função da aplicação de pressão para promover o contato entre as bordas a soldar. “*Não*”: amostra permaneceu com o material expulso (*upset*), sem ser removido. “*Sim*”: o material expulso foi removido através de raspagem mecânica (procedimento padrão).
- (b) Após a operação de raspagem inicia-se o tratamento térmico daquela região soldada. “*Não*”: não foi empregado tratamento térmico algum sobre a região soldada e adjacências. “*Sim*”: todas as etapas de tratamento térmico da solda foram realizadas (procedimento padrão).
- (c) Após ser efetuado o tratamento térmico, inicia-se um processo de resfriamento da região de solda e adjacências, o que é feito com o tubo ainda em movimento e em duas etapas distintas: resfriamento ao ar e resfriamento com água. O resfriamento com água é feito alguns instantes antes de ser efetuada a calibração dos dimensionais do tubo. “*Não*”: os tubos não foram submetidos ao resfriamento com água, sendo submetido apenas ao resfriamento ao ar. “*Sim*”: os tubos foram submetidos ao resfriamento com água logo após o tratamento térmico (procedimento padrão).
- (d) Condição representativa de um procedimento operacional padrão, sendo executadas todas as etapas usuais, inclusive raspagem, tratamento térmico e resfriamento com água. Esta condição será a referência para comparações.

Na Figura 2 pode-se visualizar uma amostra real com o *upset* e outra após a sua remoção (raspagem do *upset*).

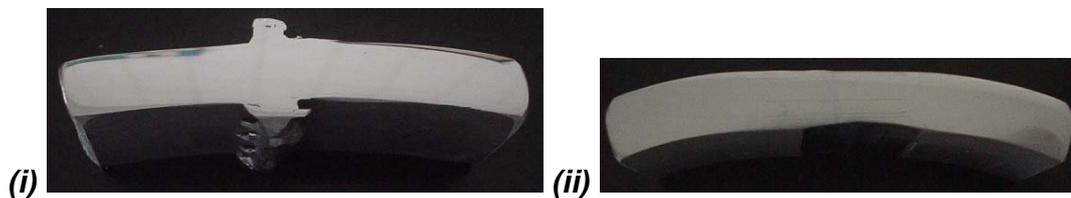


Figura 2. Ilustração de uma amostra (i) com *upset* e (ii) *upset* removido.

2.2 Caracterização Microestrutural

Foram realizados exames micrográficos da região de solda de todas as combinações, com o objetivo de melhor entender a evolução (cinética) da microestrutura da região de solda e adjacências ao longo do processo de soldagem.

A preparação das amostras consistiu das seguintes operações: lixamento (granos #100 a #600), pré-polimento, polimento e ataque químico (Nital 3%).

Para a análise micrográfica foi utilizado microscópio ótico modelo *Epivert*, marca *Leitz*. A Figura 3 mostra esquematicamente os pontos analisados. Este procedimento foi realizado para cada condição apresentada na Tabela 2.

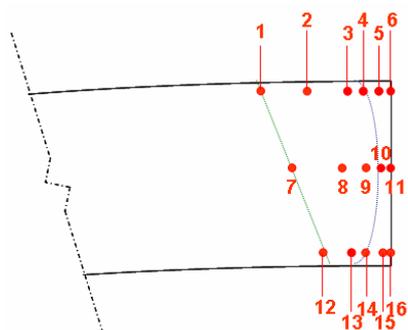


Figura 3. Identificação dos pontos analisados através de fotomicrografias.

2.3 Determinação do Perfil de Dureza

Para cada condição de processamento foi determinado um perfil de dureza, partindo-se de um lado do metal de base, passando pela região de junção (solda), até chegar ao metal de base do outro lado, conforme esquematizado na Figura 4. Empregou-se para tal um equipamento *Leitz Wetzlar Germany 7181*, com carga de 4,9N (500gf = HV_{0,5}).

Adicionalmente, empregou-se um equipamento *Wilson Wolpert*, modelo *Universal Testor 930*, com carga de 49,03N (5kgf = HV₅) para se ter uma comparação entre escalas diferentes de dureza.

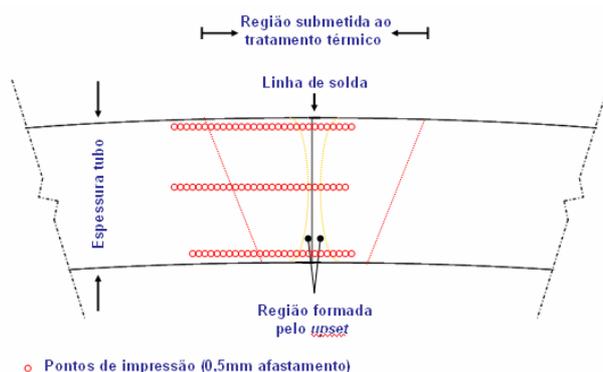


Figura 4. Representação esquemática do perfil de dureza traçado para cada uma das condições em estudo.

3 Resultados e discussão dos resultados

3.1 Caracterização Microestrutural

Na Figura 5 podem ser vistas fotomicrografias do metal de base do objeto de estudo. As fotos são representativas da estrutura encontrada em todas as condições, e evidenciam uma estrutura de grãos de ferrita e perlita.

Para o metal de base, conforme Figura 5, pode-se observar que os grãos apresentam-se ligeiramente alongados e de certa forma paralelos ao sentido de laminação da matéria-prima (bobina).

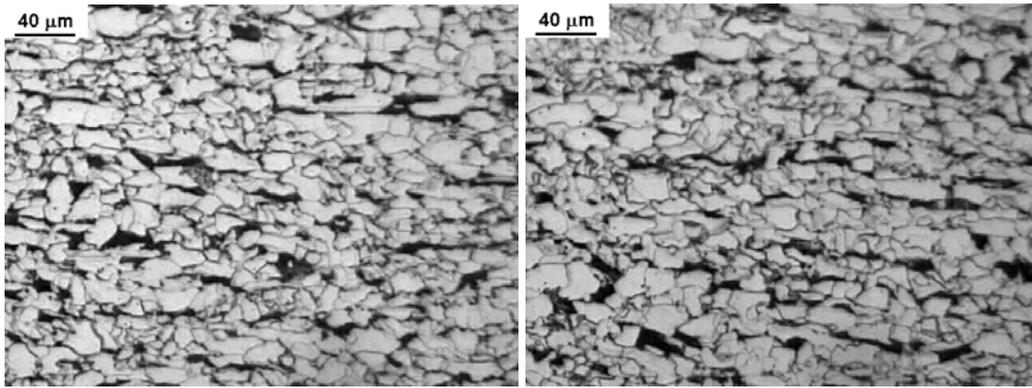


Figura 5. Fotomicrografias representativas da estrutura encontrada no metal de base.

Para o metal de base localizado próximo às extremidades do tubo, os valores de dureza apresentaram-se relativamente próximos – média de 204 HV_{0,5} – e com desvio-padrão pequeno – 10,6 HV_{0,5}. Para pontos localizados na metade da espessura do tubo, observou-se uma dispersão bastante alta dos valores de dureza: entre 102 e 206 HV_{0,5}. A dureza média e desvio-padrão obtidos na metade da espessura foram 166 e 44,3 HV_{0,5}, respectivamente.

Empregando-se a escala HV5, os valores de dureza obtidos como média e desvio-padrão foram, respectivamente: 201 HV₅ e 4,5 HV₅ para as extremidades e 185 HV₅ e 8,6 HV₅ para a metade da espessura. Pode-se constatar que a dispersão verificada foi consideravelmente menor ao empregar-se um nível de carregamento maior. No entanto, valores de dureza menores para a metade de espessura foram observados ao se empregar ambas as escalas de dureza.

A divergência de valores entre escalas já era esperada uma vez que ao ser utilizado nível de carregamento menor, obtém-se impressões menores e, conseqüentemente, consegue-se ser mais restritivo quanto à área cuja dureza deseja-se medir – ora pode-se incidir sobre um único grão, ora pode-se incidir sobre a interface de vários grãos e de constituintes diferentes. Sendo assim, muitas vezes prefere-se optar por níveis de carregamento maiores (HV₅, por exemplo, ou até superiores), justamente pelo fato de se conseguir uma abrangência maior (área de impressão maior), sendo seus resultados menos influenciados por regiões de interface. Ou seja, consegue-se uma “média” da dureza daquela região ao se empregar escalas como HV₅ ao invés de escalas como HV_{0,5}. Como o objetivo do presente trabalho foi avaliar, da maneira mais detalhada possível, o desenvolvimento das estruturas ao longo do processo, definiu-se a escala HV_{0,5} como parâmetro para estudo.

Nas Figuras de 6 a 9 estão as fotomicrografias para cada uma das condições utilizadas no presente estudo.

Para a condição #1 não foi efetuado tratamento térmico posterior à soldagem. As fotomicrografias referentes a esta condição encontram-se na Figura 6.

A estrutura do material apresentou alteração significativa naquela região que se formou em função do *upset*, quando comparada à estrutura do metal de base. Os grãos apresentaram-se bastante refinados nesta região.

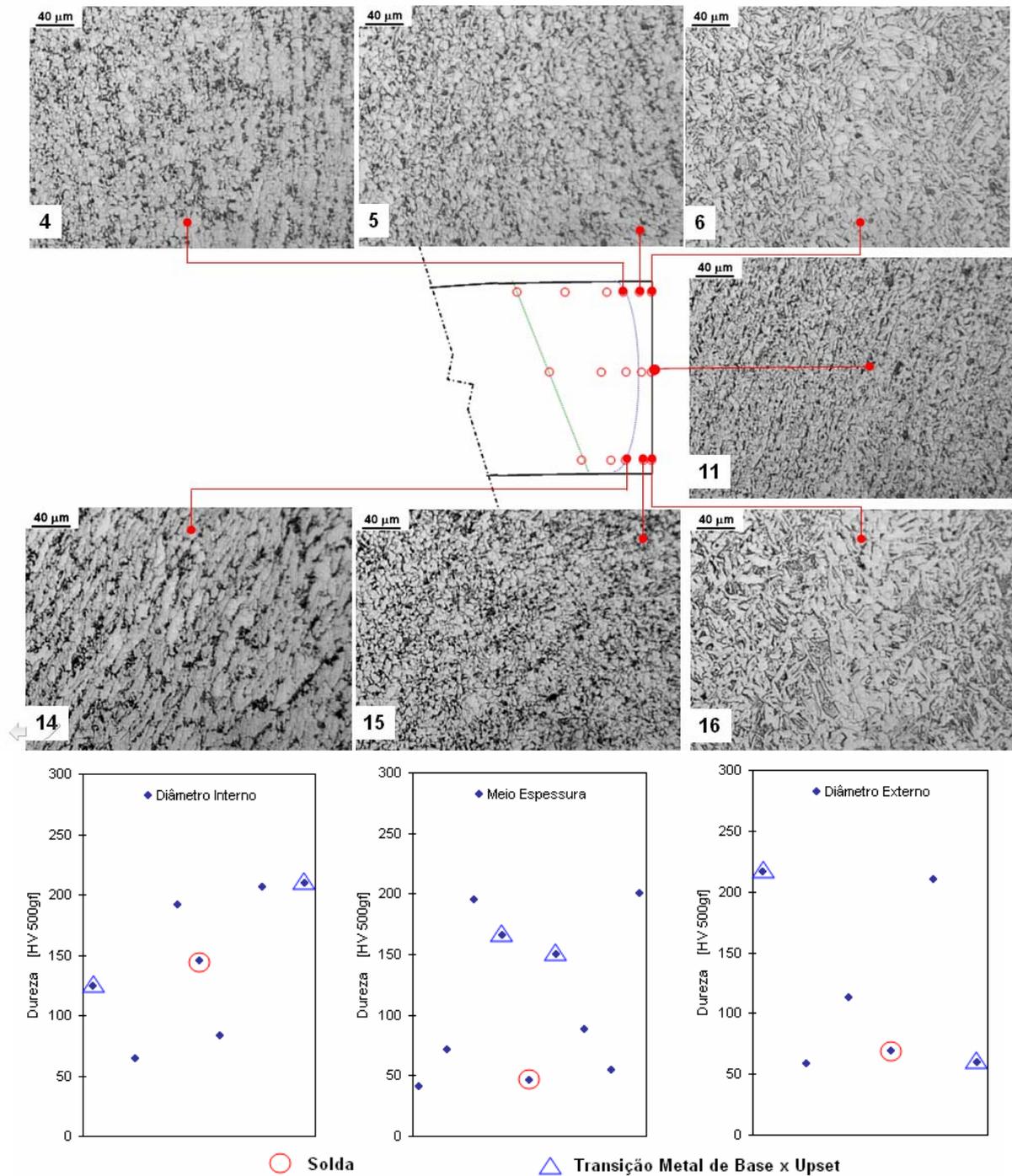


Figura 6. Fotomicrografias e perfil de dureza obtidos para a condição #1 (com upset, sem tratamento térmico).

Pode-se perceber, também, que a estrutura apresentou-se mais grosseira na região de junção (solda) localizada exatamente abaixo do material expulso – que na presente condição não foi removida – conforme fotos 6 e 16. A região de solda localizada na metade da espessura (foto 11) apresentou-se tão refinada quanto suas adjacências, não sendo constatado o mesmo comportamento observado para as proximidades do material expulso. Devido ao material expulso (*upset*) não ter sido removido, este material em excesso acabou prolongando a retenção de calor, motivo pelo qual os grãos apresentaram um crescimento superior nesta região. Já na porção intermediária, o recalque aplicado deslocou material do centro para as

extremidades superior e inferior. Isso fez com que o material que se encontrava na região intermediária da solda, mais “aquecido”, se deslocasse para as extremidades (mantendo o material do *upset* mais aquecido) e que material mais “resfriado” fosse simultaneamente deslocado para o centro da espessura. Devido à existência de um gradiente de resfriamento mais expressivo na região intermediária, os grãos localizados nesta região acabam resfriando-se mais rápido do que nas extremidades.

Analisando-se o perfil de dureza da Figura 6, pode-se ver que existe uma dispersão bastante grande nos valores obtidos para a região de junção e adjacências. Esta diferença pode ser atribuída a “não remoção” do *upset*. A divergência nas estruturas observada através das fotomicrografias de 4 a 6 e 14 a 16 sustentam esta hipótese. A dureza obtida para a região de junção foi inferior àquela obtida para as adjacências, comportamento que já poderia ser esperado ao analisar as fotomicrografias respectivas (5 e 6, 15 e 16).

Para a condição #2, efetuou-se a remoção do *upset* após a operação de soldagem, sem ser realizado tratamento térmico algum posteriormente. As fotomicrografias referentes a esta condição encontram-se na Figura 7.

Após a remoção do *upset*, pode-se observar que os grãos da região de junção localizados na extremidade superior (foto 6) apresentaram redução significativa na sua granulometria. O mesmo comportamento observado na região de junção, na metade da espessura, para a amostra “com *upset*” foi verificado após a remoção do *upset*. Já para os grãos localizados na região de solda da extremidade inferior (foto 14), não foi observado redução de sua granulometria.

Com a remoção do *upset*, possibilitou-se a obtenção de um gradiente de resfriamento maior para as extremidades. Sendo assim, a obtenção de estrutura constituída por grãos menores também poderia ser esperada para as extremidades. Esse comportamento foi observado para a extremidade superior. No entanto, não foi verificado para a extremidade inferior, o que poderia ser atribuído à existência de um *upset* “menor” para a parte inferior, quando comparado àquele formado na parte superior. Tendo em vista que não foi quantificado o *upset* formado durante o processamento (seja através de massa ou volume), a hipótese de diferenciação de *upset* para justificar a estrutura obtida na porção inferior não pode ser validada.

O comportamento observado na zona afetada – região formada pelo *upset* – para esta situação (fotos 5, 10 e 15) foi similar àquele verificado para a situação “com *upset*”.

Sem o *upset*, pode-se perceber que ocorreu uma melhor uniformização nos resultados de dureza para as extremidades. De uma maneira geral, conforme Figura 7, os valores de dureza se mantiveram bastante próximos.

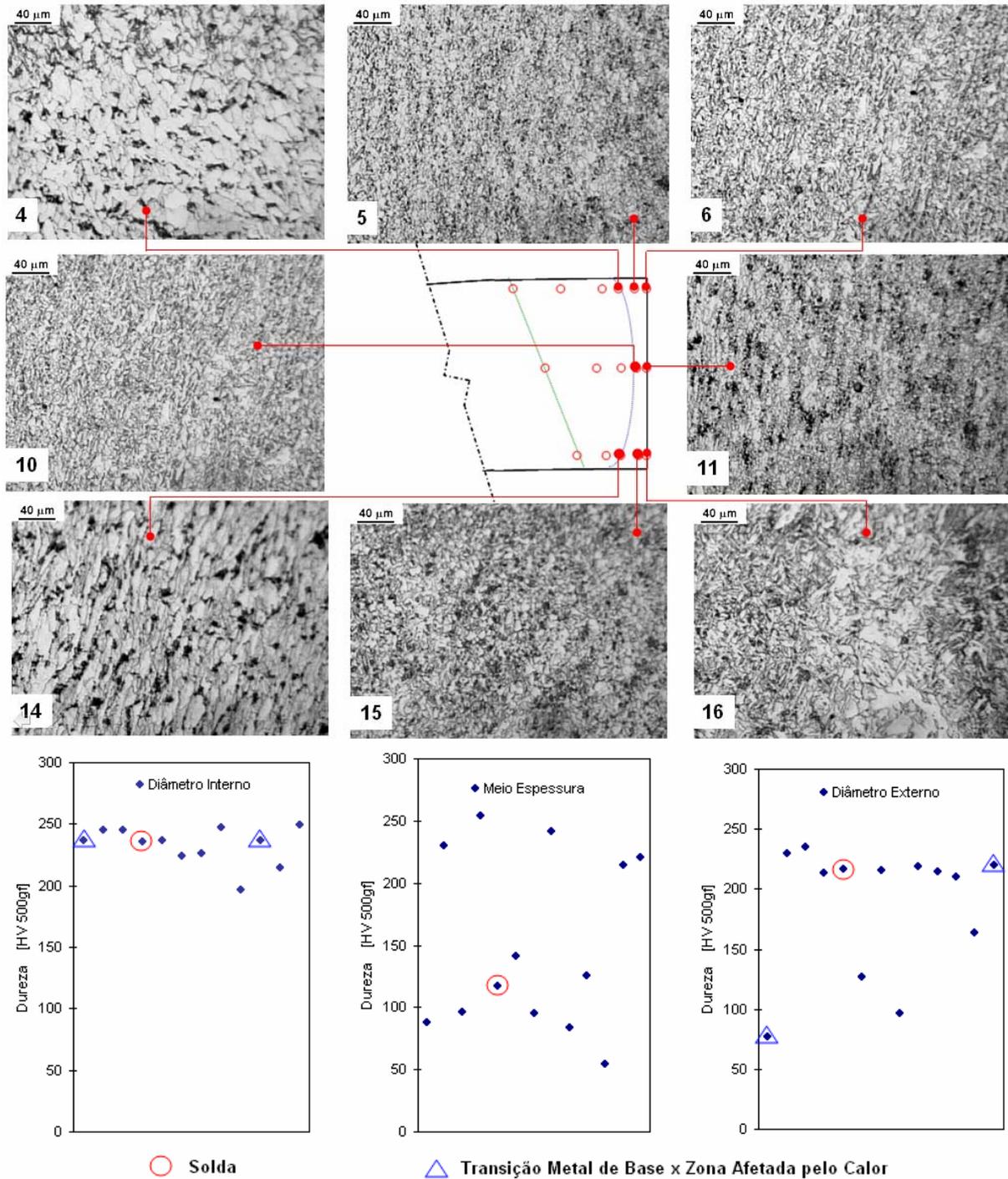


Figura 7. Fotomicrografias e perfil de dureza obtidos para a condição #2 (*upset* removido, sem tratamento térmico).

Para a condição #3, após a remoção do *upset*, a região de junção (solda) foi submetida a tratamento térmico e resfriada apenas ao ar. As fotomicrografias referentes a esta condição encontram-se na Figura 8.

A estrutura apresentou-se muito mais homogênea após a realização do tratamento térmico, assemelhando-se à estrutura do metal de base (fotos de 1 a 16). Pode-se observar, ainda, a existência de um alinhamento dos grãos, que vai mudando de direção à medida que se aproxima da região de solda. No metal de base o alinhamento foi paralelo à direção da laminação (paralelo às superfícies

interna e externa do tubo – Figura 5). À medida que se aproxima da junção, o efeito do recalque passa a ser evidenciado através de novo alinhamento dos grãos – na região de solda chega a ser praticamente perpendicular àquele observado no metal de base, o que pode ser visto ao serem comparadas as fotos 1 e 6 e 12 e 16.

Para esta condição não foi possível identificar um comportamento característico para a dureza, observando-se uma dispersão generalizada dos seus resultados. Estranhamente os valores de dureza obtidos para a extremidade equivalente ao diâmetro interno apresentaram-se mais regulares, ao passo que para o diâmetro externo e metade da espessura os valores de dureza mostraram-se muito dispersos.

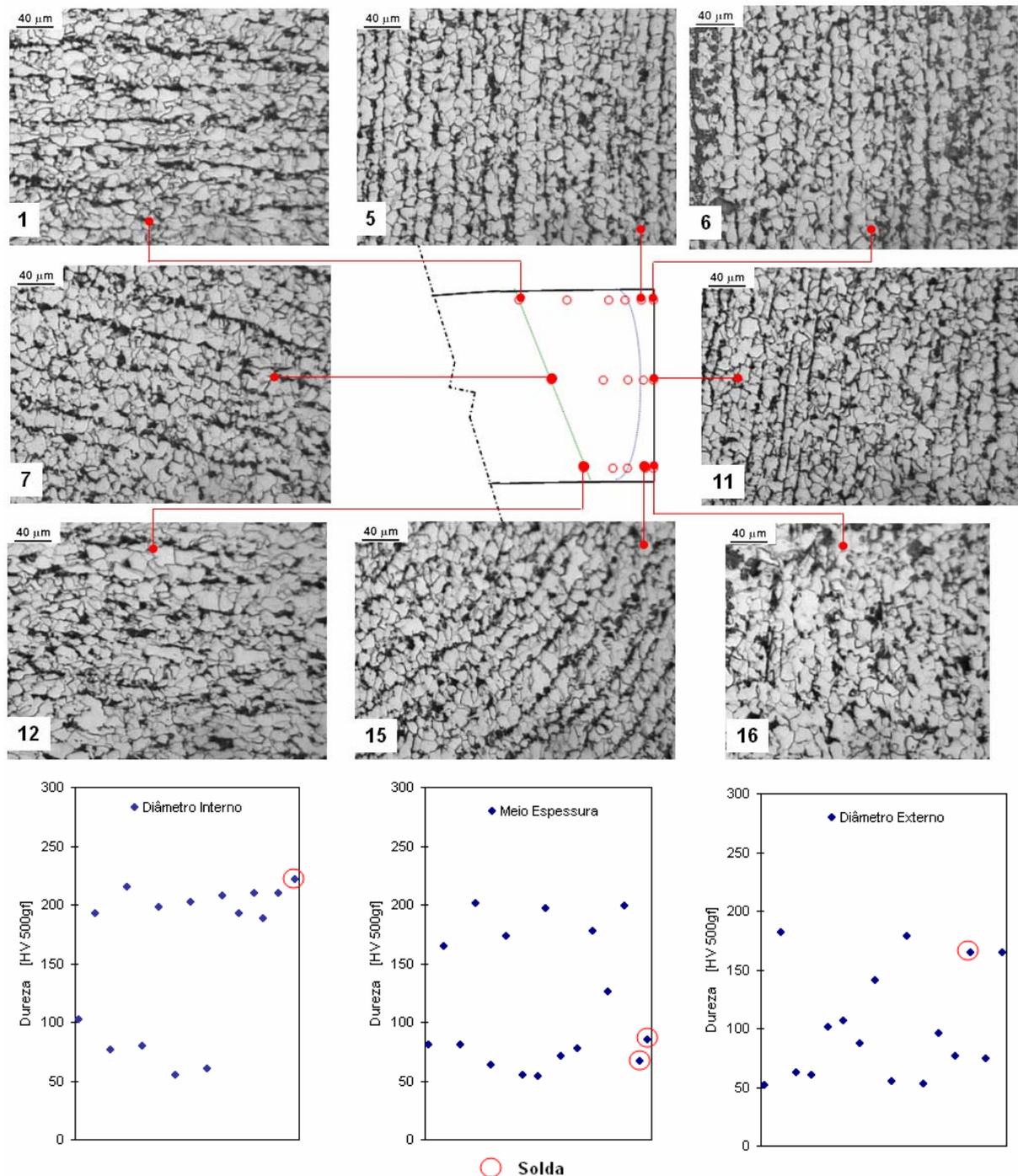


Figura 8. Fotomicrografias e perfil de dureza obtidos para a condição #3 (*upset* removido, com tratamento térmico, resfriamento apenas ao ar).

Para a condição #4, após a remoção do *upset*, a região de junção foi submetida a tratamento térmico e, em seguida, resfriada ao ar até atingir-se a temperatura de ~460°C, quando foi então resfriada com água. As fotomicrografias referentes a esta condição encontram-se na Figura 9.

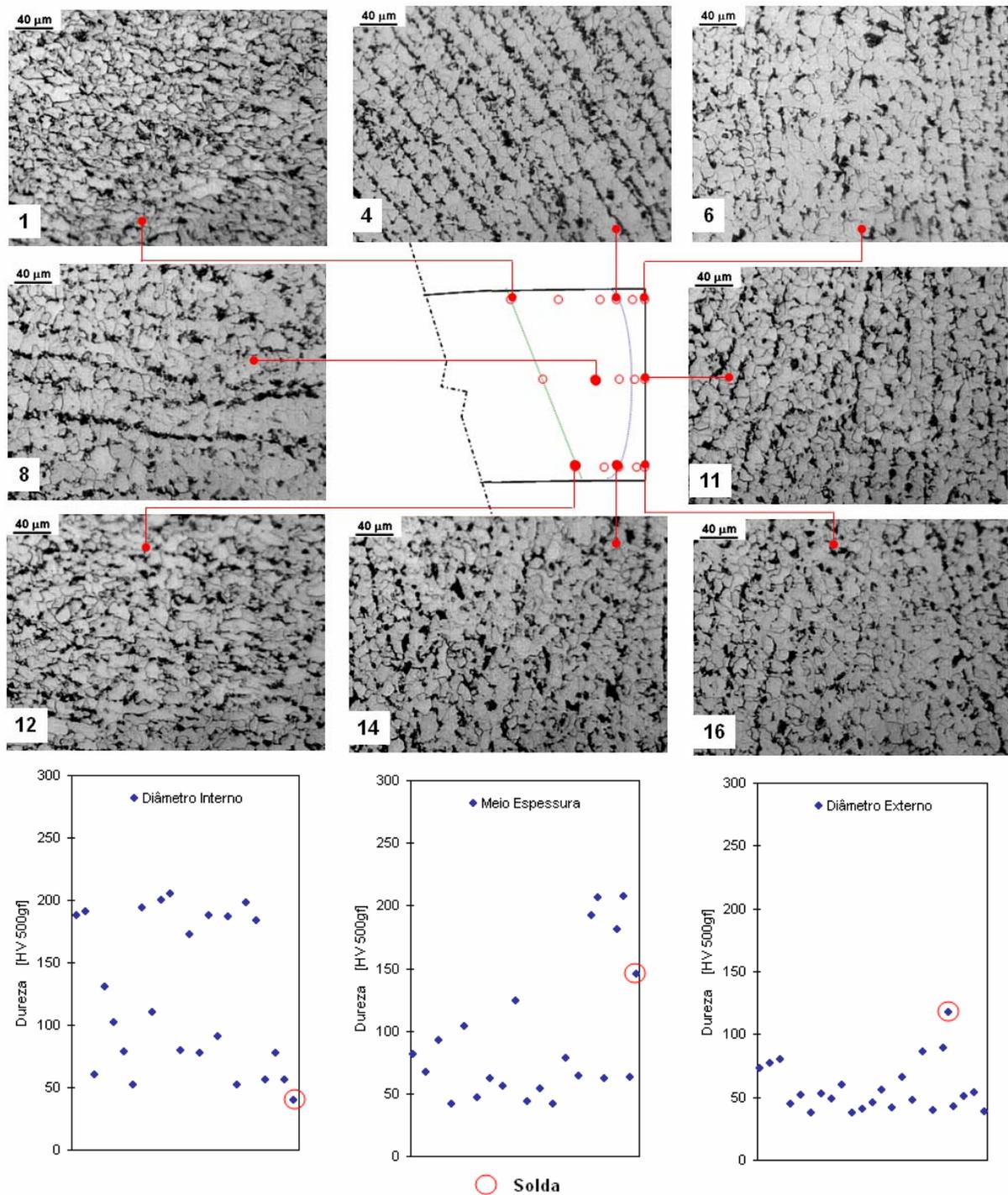


Figura 9. Fotomicrografias e perfil de dureza obtidos para a condição #4 (*upset* removido, com tratamento térmico, resfriamento ao ar e água – condição padrão de processamento).

O comportamento observado para esta condição de processamento foi similar àquele visualizado para a situação “apenas resfriamento ao ar”, o que já poderia ser esperado. No entanto, comparando-se as fotomicrografias obtidas para as condições

“apenas resfriamento ao ar” e “resfriamento ao ar e água”, aparentemente ocorreu um aumento do percentual (volumétrico) de perlita para a primeira situação – de tonalidade mais escura. Esse comportamento também poderia ser considerado como previsível uma vez que ao se acelerar o processo de resfriamento (neste caso com água), reduz-se a taxa de desenvolvimento/crescimento das lamelas alternadas de ferrita e cementita que constituem a perlita. Ou seja, o percentual (volumétrico) de perlita na situação “resfriamento ao ar e água” de fato deveria ser menor.

Esta condição de processamento foi a que conduziu a resultados menos dispersos e mais consistentes. Pode-se observar, na Figura 9, que os valores de dureza, de uma maneira geral, apresentaram-se inferiores a 100 HV_{0,5}, para a extremidade equivalente ao diâmetro externo e para a metade da espessura.

Para a extremidade equivalente ao diâmetro interno pode-se observar que metade dos valores obtidos apresentaram-se inferiores a 100 HV_{0,5}. No entanto, os outros resultados apresentaram-se próximos a ~200HV_{0,5}. Vale ressaltar que estes valores referem-se a pontos localizados na região submetida ao tratamento térmico, e que mesmo com uma dispersão superior ao verificado para o diâmetro externo e para a metade da espessura, seus valores ainda sim estavam compatíveis com aqueles encontrados no metal de base. Ou seja, o tratamento térmico realmente aproximou a estrutura da região soldada e adjacências àquela verificada para o metal de base. A medição da dureza evidenciou tal semelhança – obtivemos resultados de dureza bem menores e outros próximos.

Considerando que existe uma correlação direta entre as propriedades mecânicas e a microestrutura do material, e ainda, que a dureza está correlacionada a propriedades tais como resistência à tração, limite de escoamento e ductilidade, uma vez que a dureza da região tratada (solda e adjacências) esteja próxima à do metal de base, seria adequado concluir que as outras propriedades também estariam compatíveis após efetuar-se esta operação de tratamento térmico de normalização. Ou seja, realmente o tratamento térmico é uma operação necessária e contribui significativamente para melhoria das propriedades mecânicas.

4 CONCLUSÃO

De uma maneira geral, ao se analisar a microestrutura da região de solda e adjacências de tubos soldados pelo processo por resistência elétrica, pode-se visualizar que, partindo-se do metal de base em direção à solda, existe uma alteração significativa na forma e disposição dos grãos.

Aproximando-se da solda, percebe-se a mudança da direção dos grãos, o que foi ocasionado pelo recalque (*upset*) aplicado. Esta é uma característica marcante deste tipo de solda (ERW) – formação de linhas curvas (forma de “costelas”) nas adjacências da linha de solda. Exatamente na junção (solda) percebe-se que existe uma inversão praticamente de 90° no direcionamento dos grãos.

Constatou-se que, na ausência de um tratamento térmico de normalização da região de solda e adjacências, a estrutura se apresentaria totalmente heterogênea. Embora não tenham sido conduzidos testes mecânicos para avaliar suas propriedades, é sabido que quanto mais heterogênea for uma estrutura tanto maior será a dispersão dos resultados bem como maior o risco dos requisitos de qualidade não serem plenamente atendidos. Utilizando-se a dureza como parâmetro de avaliação, pode-se comprovar que a normalização contribuiu satisfatoriamente para a melhoria da estrutura da região de solda e adjacências.

O objetivo deste trabalho não foi comparar resultados com valores definidos em especificações técnicas ou mesmo na própria norma API 5CT (5), mas sim fornecer subsídios para que a cinética de formação da microestrutura fosse melhor compreendida, visualizando a evolução da microestrutura ao longo do processo de fabricação.

Agradecimentos

Seria injustiça não comentar o apoio obtido dos técnicos do Laboratório Metalográfico da TenarisConfab, em especial ao amigo Gaspar Oliveira, que sempre demonstrou boa vontade ao auxiliar no desenvolvimento do presente trabalho, bem como grande interesse em compartilhar seus conhecimentos e experiência.

REFERÊNCIAS

- 1 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.
- 2 SILVA, R.C.; ROZA, J.E.; MIRANDA, L.S.; KOJIMA, S.S.; TURANI, L.O. **Tubos API 5L X80 PSL2 processados por ERW: Desenvolvimento TenarisConfab-Usiminas**. Rio Pipeline Conference & Exposition 2005, Rio de Janeiro, RJ. Outubro, 2005.
- 3 HABICHT, P.R.; MISHLER, H.W.; RANDALL, M.D.; STUDEBAKER, W.E. **Normalized versus Unnormalized High-Frequency Resistance Welded 5L X52 Line Pipe**. The Welding Journal, p1s-9s, January 1969.
- 4 SILVA, C.E. **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'**. Dissertação de Mestrado, FAENQUIL. Lorena: PPG-EM, 2004.
- 5 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Specification for Casing and Tubing – API Specification 5CT**. Washington: 8th Edition, 2005.