

PRODUÇÃO DE TUBOS DE AÇO DE GRANDES DIÂMETROS SOLDADOS PELO PROCESSO ARCO SUBMERSO HELICOIDAL (ESPIRAL)¹

Vicente Braz Trindade²

Paulo Ferreira Alencar³

Ronaldo Paranhos⁴

Renato Diniz⁵

Resumo

Aços grau API combina alta resistência mecânica à tração com elevadas propriedades de impacto, o que os fazem adequados para a fabricação de componentes de grande espessura, como tubulações usadas em gasodutos que devem possuir uma temperatura de transição a mais baixa possível bem como um elevado patamar superior de energia de impacto, já que as elevadas tensões de serviço podem contribuir para a ocorrência de falha no modo dúctil de propagação de trinca. Obviamente, as juntas soldadas com estes aços também devem possuir elevadas propriedades de impacto. Na América Latina, recentemente, começa-se a fazer uso de tubos soldados em espiral para aplicação em dutos sujeitos a altas pressões. Esta reserva contra este tipo de tubo tem levado a uma rejeição da tecnologia de soldagem em espiral simplesmente por desconhecimento da qualidade deste produto, que é baseada em experiências de 30 anos atrás quando as fábricas de tubos espirais dispunham de tecnologia inadequada de fabricação e inspeção/controle, bem como baixo grau de refino do aço usado para tiras a quente. Neste artigo será apresentada e discutida a tecnologia de produção de tubos de grandes diâmetros obtidos pelo processo arco submerso helicoidal bem como a utilização destes tubos na indústria de saneamento básico, de gás e petróleo.

Palavras-chave: Arco submerso helicoidal (espiral); Tubos espirais grandes diâmetros; Gasodutos; Aços API.

PRODUCTION OF LARGE DIAMETER STEEL PIPE USING THE SPIRAL SUBMERGED ARC WELDING PROCESS - SAWH

Abstract

API 5L-grade steels combine high resistance and high toughness properties, and are extensively used for components of high thickness, such as gas and oil pipelines. These pipes should have low transition temperature in order to avoid brittle fracture due to high level of tension on the structure. It is obvious that the weld joints in the pipelines also should have excellent impact properties. In Latin America, recently, starts to use spiral-welded pipes in pipelines under high pressure. The not common use of this kind of pipes in Latin America has been ground on the quality of spiral-welded pipes from more than 30 years ago, when the pipe mills did not have knowledge of the entire technology of the SAWH process as well as the low level of quality of the hot rolled steels. In this paper the SAWH technology for gas & oil pipeline is going to be presented and discussed.

Key words: Spiral submerged arc welding – SAWH; Large diameter spiral tube; Pipeline; API-grade steels.

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

² Quality and R&D Manager, Dr.-Ing., Tubos Soldados Atlântico – TSA (Brasil); vicente.trindade@tsa.ind.br, vicentebraz@yahoo.com.br

³ Director, Eng., Tubos Soldados Atlântico – TSA (Brasil)

⁴ Professor, PhD, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF (Brasil)

⁵ Engineer, Eng., Companhia Siderúrgica Tubarão – CST / Arcelor Brasil (Brasil)

1 INTRODUÇÃO

A grande maioria de tubos de grandes diâmetros produzida no mundo para gasodutos e oleodutos é fabricada através do processo de soldagem a arco submerso, o qual fornece excelente relação de custo vs. qualidade da junta soldada. Uma característica deste processo é a possibilidade de adição de elementos de liga, tais como, Ti, B, Ni, Zr e outros através do fluxo de soldagem,⁽¹⁻⁴⁾ permitindo um preciso controle da microestrutura do metal de solda. Atualmente, o elevado nível tecnológico das novas plantas de formação de tubos utilizando o processo de soldagem a arco submerso helicoidal (espiral) e o alto grau de refino de aço para produção de tiras a quente têm motivado a implantação de fábricas de tubos soldados espiral em diversos países, inclusive na Europa, onde elevadíssimo nível de qualidade é exigido. Recentemente, fábricas estão instaladas ou planejadas para fabricar tubos espirais no Brasil. Estas fábricas de tubos espirais quanto as de longitudinais dispõem de elevado grau de testes e inspeção para garantir os altos níveis de qualidade exigidos pela indústria petrolífera.⁽⁵⁾

Na América Latina, recentemente, começa-se a fazer uso de tubos soldados em espiral para aplicação em dutos sujeitos a altas pressões. Esta reserva contra este tipo de tubo tem levado a uma rejeição da tecnologia de soldagem em espiral simplesmente por desconhecimento da qualidade deste produto, que é baseada em experiências de 30 anos atrás quando as fábricas de tubos espirais dispunham de tecnologia inadequada de fabricação e inspeção/controle, bem como baixo grau de refino do aço usado para tiras a quente.⁽⁶⁾

O objetivo deste artigo é apresentar uma visão geral do estado da arte e da tecnologia de fabricação de tubos soldados com o processo a arco submerso helicoidal (espiral). Comparação com o processo convencional longitudinal será feito para demonstrar que ambos processos possuem características de produto comuns e as principais vantagens e desvantagens de ambos processos serão apontadas.

2 PRODUÇÃO DE AÇO PARA FABRICAÇÃO DE TUBOS

O uso de aços de alta resistência combinado com processos de fabricação de tubos é considerado uma necessidade econômica importante para atender o transporte de gás, finos de minério e água a longas distâncias de uma maneira segura e competitiva. Para atender a crescente demanda por tubos de alta resistência, siderúrgicas em todo mundo, inclusive no Brasil, tem investido em pesquisas para desenvolver novos aços e/ou processos de fabricação que otimize as propriedades da matéria prima para fabricação de tubos.

O desenvolvimento de aços para fabricação de tubos requer dentre outros os seguintes requisitos: (i) elevado limite de escoamento, (ii) baixa temperatura de transição dúctil/frágil durante impacto, (iii) viabilidade econômica, (iv) boa soldabilidade e (v) boa capacidade de conformação. Os mecanismos básicos de design destes aços consistem basicamente no processo de endurecimento e/ou refinamento de grão de aços baixo carbono através de adição de elementos de liga tais como Mn, Mo, V, Nb, Ti, Al entre outros.⁽⁶⁾ Outro mecanismo é através de laminação controlada de chapas e bobinas, constituindo o processo denominado processamento termomecânico (Figura 1). Um Processamento termomecânico envolve um alto grau de purificação do aço combinado com laminação controlada seguido por um resfriamento rápido permitindo a formação de uma microestrutura ferrita acicular (Figura 2), ferrita-perlita, ferrita-bainita ou bainita-martensita submetido a um posterior revenimento.⁽⁶⁾ No passado as bobinas eram feitas por

laminação a quente, com propriedades mecânicas ruins. Hoje, com melhor refino do aço e laminação controlada, a qualidade do aço em bobina é equivalente ao laminado a frio.

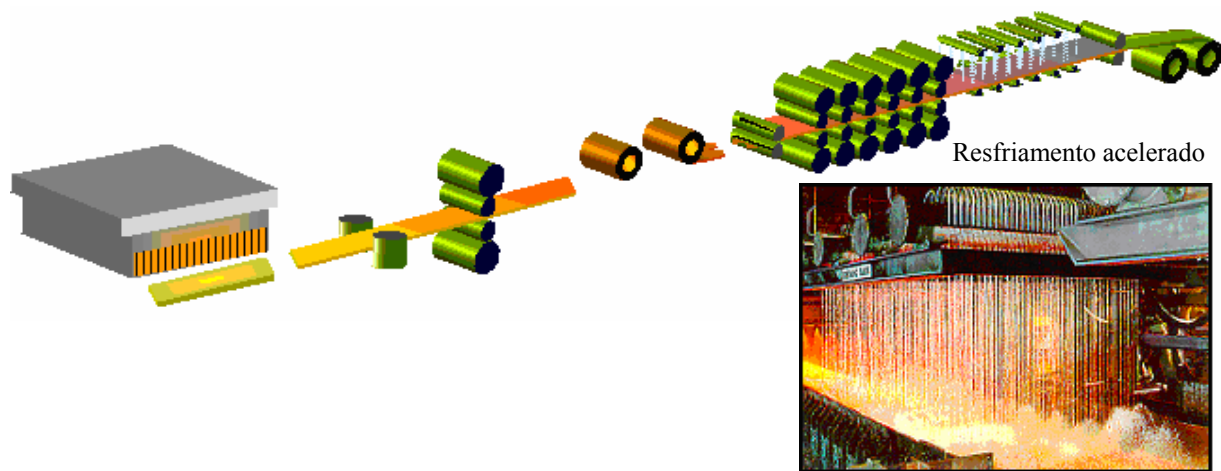


Figura 1. Diagrama esquemático de um processamento termomecânico usado para produzir aço com elevadas propriedades mecânicas (laminador de tiras a quente da CST).



Figura 2. Microestrutura típica de ferrita acicular de um metal de base produzido a partir de processamento termomecânico controlado e resfriamento rápido.

3 PROCESSO DE SOLDAGEM HELICOIDAL / ESPIRAL

No processo de soldagem helicoidal/espiral é usado bobina ao invés de chapas como no processo de soldagem longitudinal. Portanto, isto significa que no processo de deformação a quente na usina siderúrgica, chapas fabricadas pelo processo de lingotamento contínuo é tratado termomecanicamente e enrolados em bobinas. Bobinas com pesos de até 40 toneladas são transportadas até a fábrica de tubos e a primeira etapa do processo de formação de tubo é o desbobinamento. A bobina é desbobinada passando por um conjunto de rolos seguido por fresamento das bordas da bobina para ajustar a sua largura (veja detalhe na Figura 3). Neste processo a perda de material (sucata) produzido pelas aparas é proporcional à espessura da chapa (strip). A chapa é em seguida soldada transversalmente à próxima bobina (emenda de bobina). Isto permite a fabricação contínua de tubos de comprimento

quase ilimitado. Naturalmente, o comprimento do tubo é limitado por outros fatores, tais como projeto (cliente), espaço físico na fábrica e capacidade de transporte. A bobina desenrolada é então transformada em tubo através do uso de três rolos no sistema de curvamento, como ilustrado na Figura 3, o que garante excelente circunferencialidade do tubo.

O diâmetro (D) do tubo produzido depende do ângulo (α) no qual o material (strip) com largura (B) entra na unidade de formação (veja Figura 3). A equação (1) apresenta a relação entre o diâmetro do tubo, o ângulo de formação do tubo e a largura da bobina.

$$D = \frac{B}{\pi \cdot \sin \alpha} \quad \text{Eq. (1)}$$

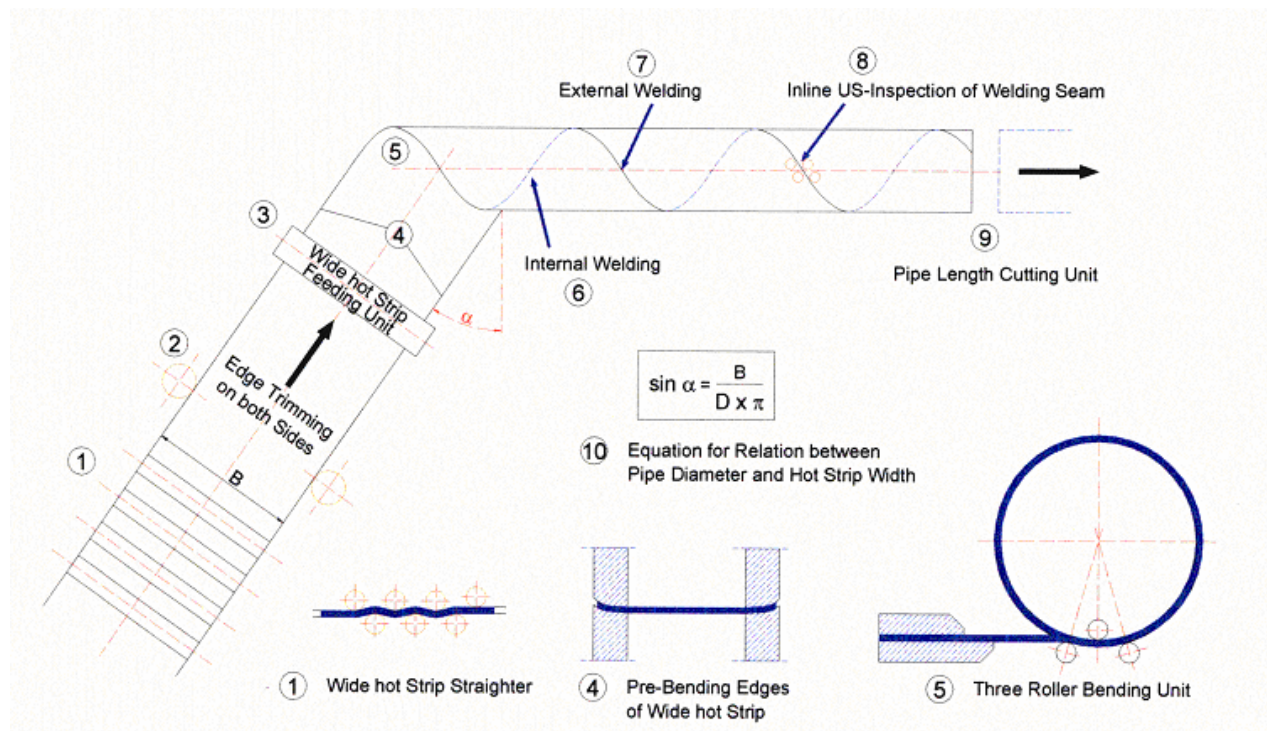


Figura 3. Princípio de formação de tubos em espiral.

A formação do tubo é então completada através da soldagem de passe duplo, que consiste em soldagem interna acompanhada pela soldagem externa simultaneamente defasadas em meio círculo. A Figura 4 mostra esquematicamente a seqüência de soldagem interna e externa. A soldagem é realizada na posição 6 horas na parte interna e a 12 horas na posição externa. Toda a operação de soldagem é controlada por computador e os dados são continuamente gravados.

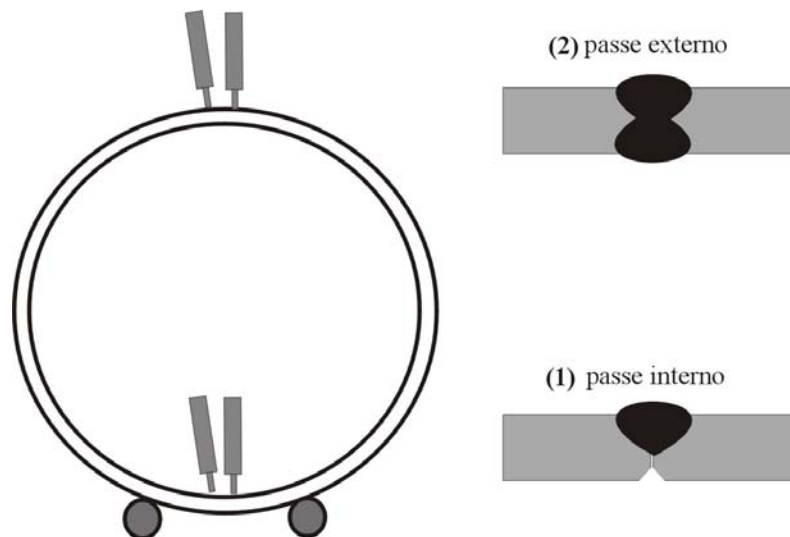


Figura 4. ConFiguração da soldagem a arco submerso na parte interna e externa utilizando dois arames com conFiguração tandem.

O processo de soldagem usado na fabricação de tubos em espiral é essencialmente o mesmo utilizado na soldagem longitudinal. Os consumíveis (fluxo e arame) também são os mesmos. Portanto, o metal de solda exibe características físico-químicas e mecânicas idênticas. No processo de soldagem espiral é comum a utilização de conFiguração tandem com arames múltiplos. Usualmente limita-se a dois arames devido ao risco de escorrimento de metal de solda fundido.

Por princípio, a geometria do tubo produzido por soldagem em espiral é constante ao longo do comprimento do tubo. O cordão de solda em espiral funciona como um estabilizador geométrico (stiffener), conferindo ao tubo uma excelente circunferencialidade.⁽⁷⁾ Portanto, via de regra, não é necessária a operação de expansão a frio para corrigir o diâmetro do tubo.

As dimensões do tubo em espiral são continuamente ajustadas, permitindo a obtenção de qualquer diâmetro especificado pelo cliente, a partir da matéria prima (bobina) com a mesma largura. Enquanto que no processo de soldagem longitudinal é necessário o uso de um grande número de ferramentas para distintos diâmetros.

A Figura 5 mostra uma típica distribuição dos diâmetros medidos em tubos fabricados pelo processo espiral. A estreita faixa de distribuição do diâmetro externo dos tubos se encontra dentro da tolerância requerida pela API 5L. Isto mostra a elevada uniformidade geométrica conseguida com o processo de soldagem a arco submerso em espiral, acarretando economia na execução de projeto de gasodutos, onde circunferencialidade e linearidade do tubo é muito importante. Aliado a estas características, o processo espiral permite a confecção de tubos de grande comprimento (mínimo 8,30 m até ~32 m), o que pode reduzir significativamente o número de soldas em campo, com grande apelo econômico e redução de tempo de montagem do pipeline.

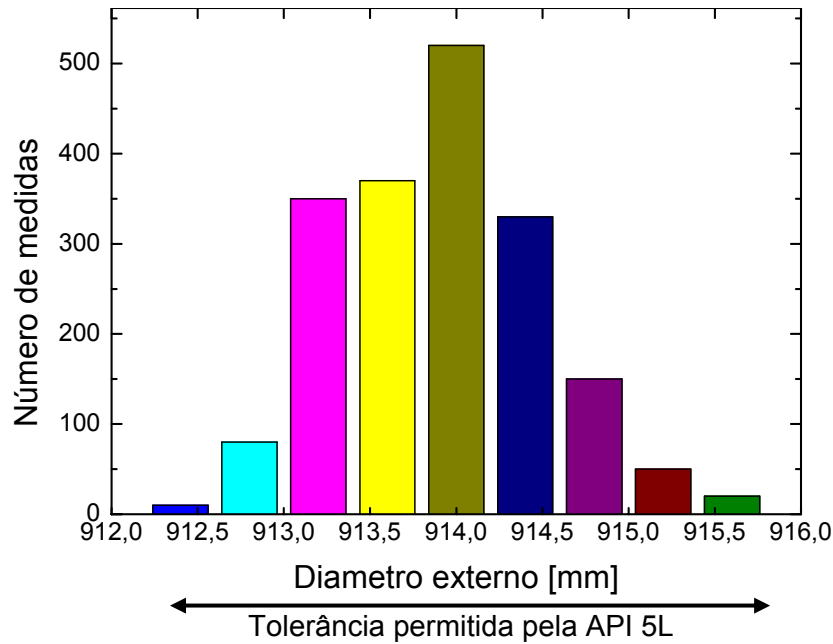


Figura 5. Distribuição do diâmetro externo e tolerância na fabricação de tubo de diâmetro 914 mm e espessura de parede 12,7 mm usando o processo de soldagem espiral.

4 TESTES E CONTROLE DE QUALIDADE

Plantas modernas de fabricação de tubos em espiral possuem sistemas avançados de inspeção no cordão de solda, na zona afetada pelo calor e no corpo do tubo. Inspeção com ultra-som é realizada ainda na linha de soldagem logo após duas voltas da soldagem externa (Figura 3). Este processo de teste permite o controle da qualidade da junta soldada on-line. Os defeitos são automaticamente marcados com tintas adequadas para a visualização do operador. O teste é ainda salvo eletronicamente e podem ser visualizados em monitores para avaliação do operador. Após o corte, o tubo é devidamente marcado para qualquer rastreamento e é conduzido a uma estação para controle intermediário onde o excesso de fluxo e escória gerada na soldagem é removida do interior do tubo. Um fluxo usual de uma fábrica de tubos soldados tanto espiral quanto longitudinal encontra-se na Figura 6. Teste hidrostático é realizado para garantir a integridade do tubo. O tubo é preenchido com água e devidamente pressurizado até um determinado nível de pressão. As condições de teste são continuamente documentadas eletronicamente através de um diagrama de pressão versus tempo. Após o teste hidrostático o tubo é submetido novamente à inspeção por ultra-som e radiografia (Figura 6). Após passar por todas as estações de fabricação e testes, o tubo é transferido para uma área de inspeção final. Nesta estação final, os testes consistem em controle dimensional, inspeção visual da superfície interna e externa do tubo e controle da marcação do tubo (Figura 6). Finalmente, o tubo recebe a etiqueta conforme especificado pelo cliente e posteriormente o tubo está pronto para ser transportado ou é encaminhado para a fábrica de revestimento.

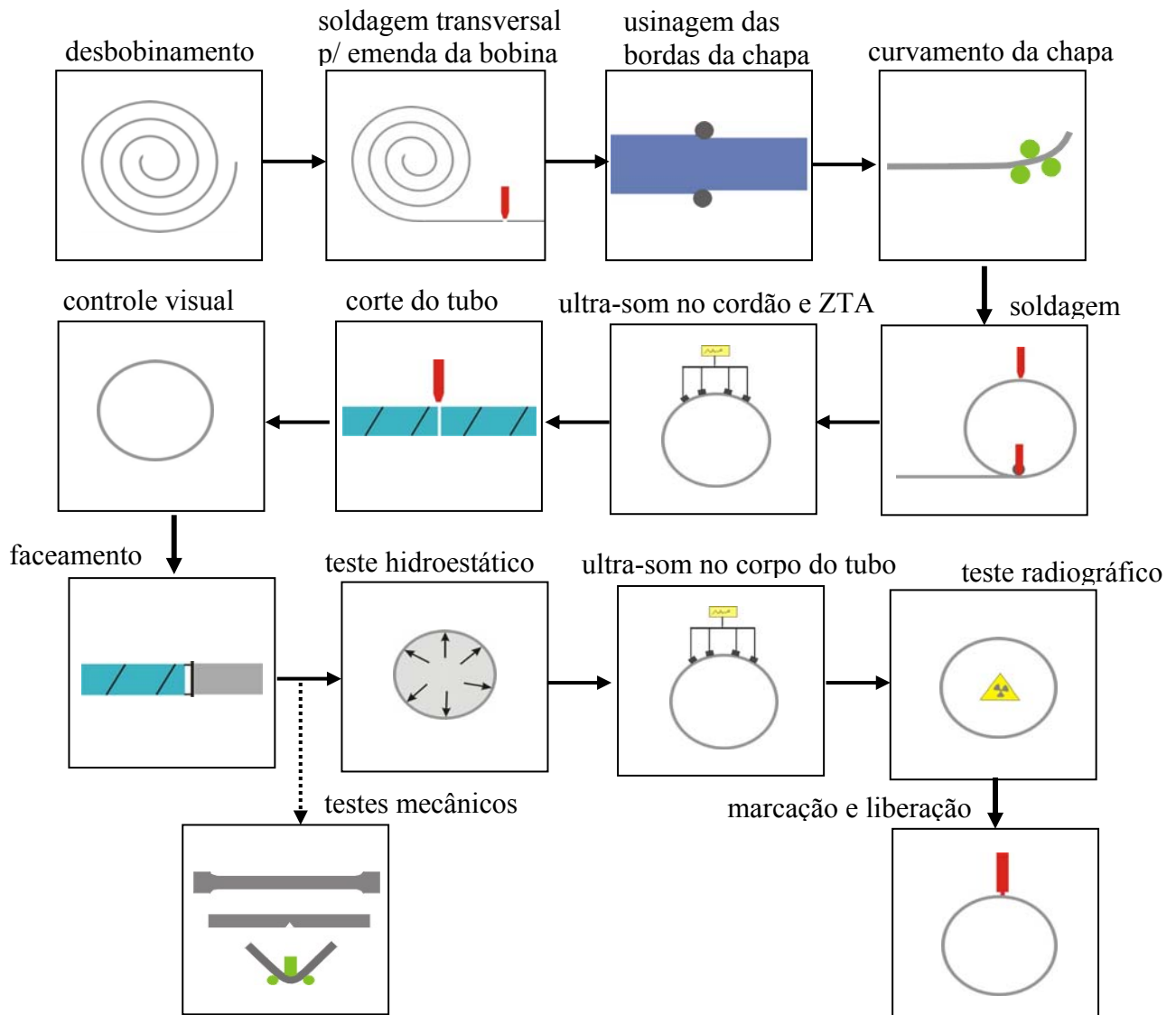


Figura 6. Esquema geral da seqüência de fabricação e inspeção em uma planta de fabricação de tubo em espiral.

5 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE TUBOS SOLDADOS EM ESPIRAL

5.1 Curvamento a Frio

Igualmente aos tubos produzidos pelo processo longitudinal, os tubos produzidos pelo processo espiral também podem ser curvados no campo.⁽⁷⁾ Independentemente da posição do cordão de solda, tubos em espiral podem ser curvados com equipamentos convencionais e com as técnicas baseadas nas normas vigentes. O cordão de solda em espiral não influencia na capacidade de deformação durante curvamento a frio. Vários exemplos de aplicação de tubos em espiral curvados a frio estão em uso em vários países. A partir desta lista pode-se constatar que tubos soldados em espiral têm uma excelente aceitação e nenhuma dúvida de qualidade destes tubos foi reportada até o presente.

5.2 Tensões Aplicadas no Cordão de Solda

Basicamente, tubos soldados em espiral apresentam uma orientação preferencial do cordão de solda assim como da direção de laminação a quente com respeito a direção principal das tensões que atuam no tubo. É óbvio que os cordões de solda em tubos soldados longitudinal e em espiral estão situados em diferentes ângulos relativo ao eixo do tubo. Como a tensão circunferencial, σ_u , é a tensão máxima que atua em um duto, a solda longitudinal que está localizada perpendicular à direção da tensão principal, está sujeito ao máximo carregamento. Quanto mais o ângulo do cordão de solda se desvia da direção do eixo do tubo, menor será a tensão normal, σ_n , que atua na direção perpendicular ao cordão de solda quando se ignora a tensão longitudinal (Figura 7). Esta relação é mostrada na equação (2).

$$\sigma_n = \sigma_u \cdot \cos^2 \alpha \quad \text{Eq. (2)}$$

A tensão circunferencial como resultado da pressão interna aplicada é dada pela equação (3).

$$\sigma_u = \frac{pD}{t} \quad \text{Eq. (3)}$$

onde p é a pressão interna aplicada, D o diâmetro externo do tubo e t a espessura da parede do tubo.

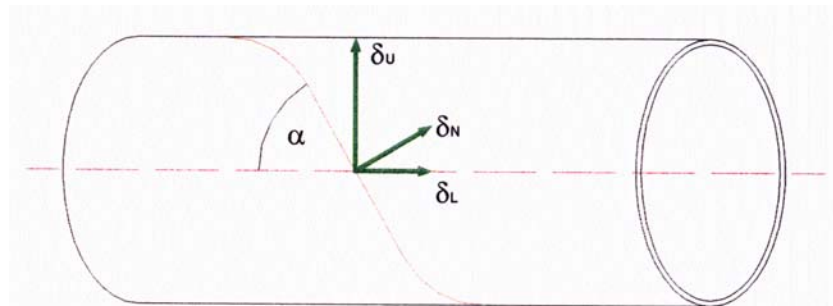


Figura 7. Representação esquemática das tensões no cordão de solda em espiral.

Portanto, o cordão de solda longitudinal ($\alpha = 0^\circ$) está sujeito à maior tensão e um cordão circunferencial ($\alpha = 90^\circ$) à menor tensão. O cordão de solda em espiral está situado entre estes dois extremos e a tensão que atua no cordão em espiral é em torno de 50 a 70% menor que a tensão que atua no cordão longitudinal.

Como consequência natural do processo de deformação a frio, tubos em espiral exibem diferenças significativas entre o limite de escoamento medido na direção longitudinal e transversal. Devido ao efeito Bauschinger o limite de escoamento na direção longitudinal é sempre maior que o limite de escoamento na direção transversal ao eixo do tubo.⁽⁵⁾ A diferença dos valores médios na direção transversal e longitudinal é de aproximadamente 40 a 50 MPa. O mesmo é válido para a relação limite de escoamento/limite de resistência (σ_y / σ_r) em ambas direções. O valor medido na direção transversal da relação σ_y / σ_r é sempre menor que os valores na direção longitudinal do tubo. A extensão deste efeito depende do ângulo de formação do tubo, do diâmetro do tubo e da relação diâmetro/espessura de parede.

6 RESULTADO EXPERIMENTAL DE QUALIFICAÇÃO DE TUBO ESPIRAL API 5L X70

A soldagem dos tubos para testes foi feita usando como metal de base bobinas do aço API 5L X70 com 16mm de espessura. O processo de soldagem utilizado foi arco submerso espiral com passe duplo. Utilizou-se a configuração Tandem com arames múltiplos.

Modernos processamento termomecânicos permitem a produção de aços de elevada resistência mecânica e baixo carbono (abaixo de 0,11% em peso). Este baixo teor de carbono e outros elementos de liga, ex. enxofre, garantem uma boa soldabilidade destes aços, tornando possível soldagem em campo sem restrições de processo. Uma composição química típica de um aço X70 é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do metal de base X70 (em % peso)

Bobina	C	Si	Mn	P	S	Al	V	Ti	CE
1	0,090	0,310	1,59	0,016	0,004	0,036	0,054	0,022	0,19
2	0,087	0,327	1,59	0,013	0,007	0,03	0,057	0,021	0,18
3	0,091	0,366	1,50	0,013	0,006	0,031	0,055	0,018	0,18
4	0,092	0,351	1,52	0,012	0,006	0,03	0,055	0,016	0,19
5	0,085	0,295	1,56	0,012	0,004	0,028	0,055	0,021	0,18
6	0,095	0,344	1,47	0,014	0,005	0,024	0,059	0,02	0,19
7	0,125	0,315	1,56	0,010	0,007	0,032	0,058	0,022	0,22
8	0,100	0,322	1,63	0,010	0,006	0,03	0,053	0,021	0,20

Propriedades mecânicas de tração medidas na direção longitudinal do tubo e transversal (35°) ao eixo longitudinal do tubo foram avaliadas para diferentes bobinas. No metal de solda, as medidas foram realizadas na posição transversal ao cordão de solda espiral. A média dos valores de limite de escoamento são apresentados na Figura 8 e Tabela 2. Estes resultados mostram que tanto o metal de base quanto o metal de solda preencheram os requisitos estabelecidos pela API 5L. Figura 9 mostra também que a relação limite de escoamento/limite de resistência (σ_y / σ_r) do metal de base e do metal de solda encontram-se na faixa especificada pela API 5L (PSL 2).

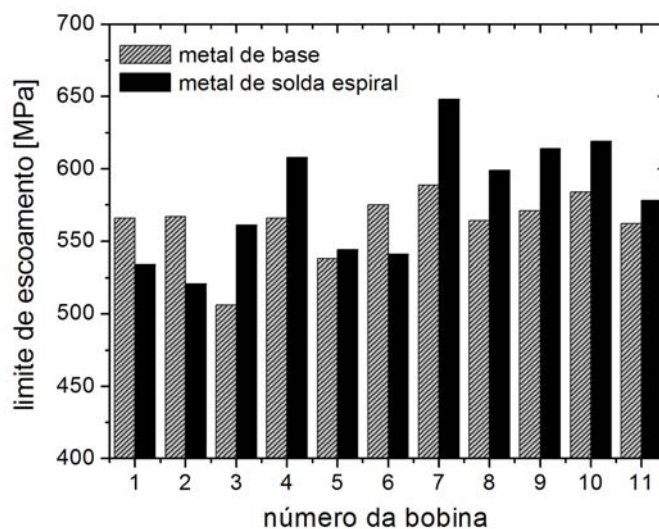


Figura 8. Limite de escoamento do metal de base e metal de solda espiral.

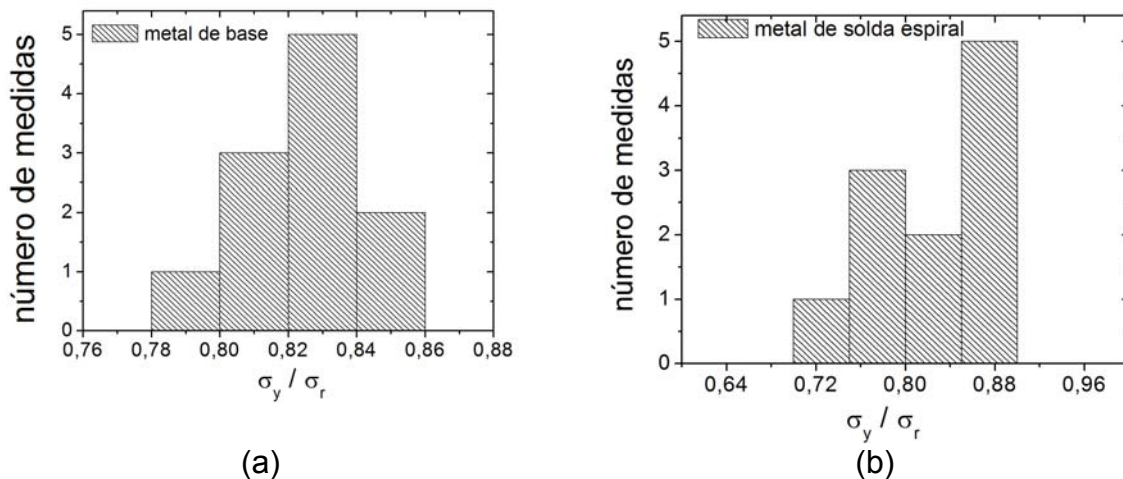


Figura 9. Relação do limite de escoamento / limite de resistência (σ_y / σ_r): (a) metal de base e (b) metal de solda espiral.

Tabela 2. Propriedades mecânicas (limite de escoamento (σ_y) e limite de resistência (σ_r) em MPa e alongamento (A) em %) do metal de base (MB) na posição transversal em relação ao eixo longitudinal do tubo e no cordão em espiral na posição transversal ao cordão de solda (MS).

Bobina	Metal de base			Metal de solda espiral			MB	MS
	σ_y	σ_r	A	σ_y	σ_r	A	σ_y / σ_r	σ_y / σ_r
1	566	683	22	534	699	---	0,83	0,76
2	567	683	20	521	713	---	0,83	0,73
3	506	645	23	561	689	---	0,78	0,81
4	566	656	22	608	688	14,5	0,86	0,88
5	538	653	28	544	686	---	0,82	0,79
6	575	683	21	541	657	14	0,84	0,82
7	589	689	24	648	710	22	0,85	0,89
8	564	684	23	599	690	16	0,82	0,87
9	571	675	21	614	679	14	0,84	0,9
10	584	692	23	619	722	22	0,84	0,86
11	562	687	24	578	735	---	0,82	0,79

Medidas da energia Charpy-V foram realizadas no metal de base e no cordão de solda espiral na temperatura de 0°C. No metal de base, a média dos valores foram calculados na posição longitudinal e na posição transversal a 35° em relação ao eixo longitudinal. No metal de solda espiral, a média foi obtida dos valores medidos na posição perpendicular ao cordão de solda e inclinado a 35° em relação ao eixo longitudinal do tubo. A Figura 10 mostra que os requisitos da API 5L, com respeito a tenacidade do metal de base e metal de solda foram atendidos.

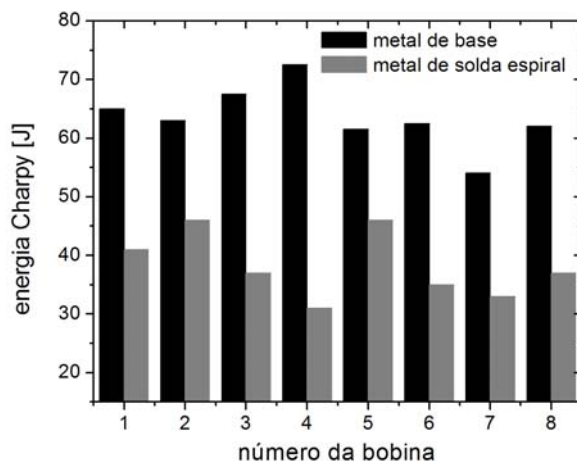


Figura 10. Média da energia Charpy do metal de base (direção longitudinal e transversal-35°) e metal de solda espiral (perpendicular ao cordão e transversal-35°).

7 CONCLUSÃO

O processo de soldagem espiral como processo de fabricação de tubos para gasodutos/oleodutos preenchem quaisquer requisitos de normas internacionais (ex. API 5L) para condução de gás, água, óleo e finos de minério. Todos os requisitos de qualidade exigidos por processos convencionais, ex. soldagem longitudinal, são também atendidos pelo processo de soldagem espiral. Tubos fabricados pelo processo espiral oferece um fator de segurança extra com relação à distribuição de tensão no cordão de solda (50 a 70% menor que a tensão aplicada no cordão de solda longitudinal). O exemplo prático descrito neste trabalho mostrou que tubos soldados pelo processo espiral são qualificados pela norma API 5L. A crescente tendência da utilização do processo de soldagem espiral é alavancada pela crescente preocupação na melhoria dos processos de fabricação de tiras a quente com níveis de qualidade iguais ou até superiores aos processos de laminação a frio.

REFERÊNCIAS

- 1 V. B. Trindade, J. C. Payão, A. S. Guimarães, R. Paranhos, Effect of normalizing heat treatment on the mechanical behaviour of low-alloy steel weld metals, *Materials and Structures*, 38, 2005, 353.
- 2 V. B. Trindade, R. Paranhos, J. C. Payão, L. F. G. Souza, Influência da adição de níquel na tenacidade de metais de solda de aços C-Mn antes e após tratamento térmico de alívio de tensões, *Soldagem & Inspeção*, 10, 2005, 164.
- 3 V. B. Trindade, J. C. Payão, R. Paranhos, R. S. T. Mello, Influence of zirconium on microstructure and toughness of low alloy steel weld metals, *Journal of materials engineering and performance*, 2006, in press.
- 4 G. E. Linert, *Welding metallurgy-carbon and alloy steels*, GML publications, AWS, 4th edition, 1994.
- 5 F. M. Knoop, B. Sommer, Manufacturing and use of spiral welded pipes for high pressure service – state of the art, *Proc. International Pipeline Conference*, 2004, Canada.
- 6 F.B. Pickering, *Physical metallurgy and the design of steels*, Applied science publishers, London, 1983.
- 7 F.O. Koch, Hofmann, Herstellung von Rohrbogen aus Spiralrohren durch Kaltbiegen, 12, 1967, 822.