

Anderson Leris, M.Sc,
Engenheiro de Projetos Sênior – USIMINAS MECANICA S/A
anderson.leris@usiminasmecanica.com.br

Cláudia Nazaré dos Santos, D.Sc,
Professora do Centro Universitário do Leste de Minas
UNILESTEMG – cnsantos03@yahoo.com.br

Avaliação de propriedades mecânicas de tubos em aço estrutural curvados pelo processo de indução eletromagnética

A utilização de estruturas tubulares em aço requer vários processos de fabricação visando à adequação às geometrias, formas e especificações de projetos de engenharia e de arquitetura. Existem diferentes processos relacionados com a fabricação de estruturas, um deles, o curvamento por indução eletromagnética, não possui normas específicas o que torna necessária a confirmação da manutenção das propriedades mínimas requeridas no projeto. Existem inúmeras vantagens na utilização dos perfis metálicos tubulares, dentre elas, seção transversal favorável aos esforços, área de pintura reduzida, maior vida útil na proteção anticorrosão, além de serem utilizados para a passagem de tubulações elétricas e hidráulicas em seu interior (NUIC et. al., 2010). Além disso, a utilização desses perfis permite não só a construção de estruturas metálicas convencionais como também a utilização como elemento de decoração.

Curvamento por indução

De acordo com DUTTA (1998), no processo de curvamento a quente por

indução eletromagnética, uma das extremidades do tubo é empurrada por um impulsor e a outra é fixada por um braço giratório que guia o tubo até a completa conformação da curva, e é através do ajuste do braço giratório que se determina o raio a ser obtido forçando o tubo a mudar de direção continuamente durante a movimentação do impulsor. Logo após o impulsor o tubo passa pela bobina de indução eletromagnética que cria um campo magnético altamente concentrado que induz um potencial elétrico no tubo criando um fluxo de corrente. A resistência do tubo a este fluxo provoca um aquecimento rápido e localizado, imediatamente após passar pela bobina o tubo é resfriado com jato de água.

A figura 1 apresenta o desenho esquemático do curvamento por indução eletromagnética tanto para perfis com seções circulares como perfis com seções retangulares.

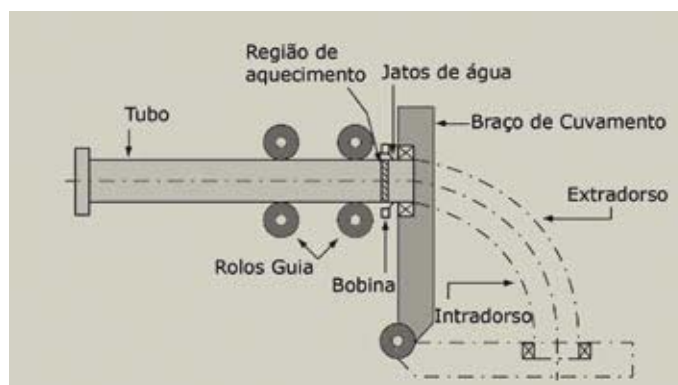


FIGURA 1: Esquema do Curvamento por Indução
Fonte: ISHIKAWA et. al., 2002

A figura 2 é a foto de uma estrutura tubular curvada por indução eletromagnética aplicada na construção da estação de metrô Cidade Nova, na cidade do Rio de Janeiro.

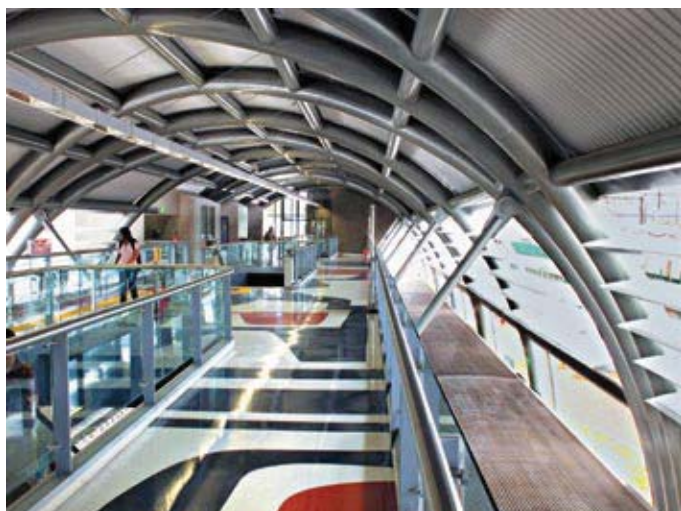


FIGURA 2: Estação Cidade Nova no Rio de Janeiro - tubos curvados por indução eletromagnética.
Fonte: Sidnei Palatnik, 2010.

Em um de seus trabalhos Meireles (2009) comenta sobre algumas variáveis que podem influenciar as propriedades de um tubo curvado e as condições de curvamento: dimensão do tubo reto, diâmetro, espessura, raio de curvamento, velocidade de curvamento, temperatura de curvamento, velocidade de resfriamento e composição química do aço. Essas variáveis interferem diretamente no surgimento de diferentes fases na microestrutura do material.

Propriedades mecânicas de um tubo

Visando observar a influência do curvamento por indução, realizou-se um trabalho de análise e comparação com os requisitos dos documentos normativos (referentes às propriedades mecânicas) de um tubo fabricado pelo processo U-O-E a partir de chapas em aço estrutural ASTM A 572 GR 50 (2007) e utilizado na fabricação de um edifício após o processo de curvamento por indução eletromagnética. Para garantir a aleatoriedade dos resultados, e assim garantir a aplicabilidade do processo para

a fabricação de estruturas metálicas optou-se por não executar curvas específicas para este estudo, sendo utilizadas partes de curvas que utilizaram os mesmos parâmetros. Os parâmetros utilizados para o curvamento foram temperatura de 900°C, raio de aproximadamente 7632 mm, velocidade do processo 1,9mm/s, taxa de resfriamento de 90°C/s, espessura e diâmetro do tubo respectivamente 14,3mm e 457 mm.

As análises consistiram em caracterizações das propriedades mecânicas do tubo reto na condição recebida e do tubo curvado, sendo que este último foi submetido ao ensaio de tração, em suas três principais regiões no sentido do comprimento do tubo: intradorso, extradorso e linha neutra oposta à solda, baseado na norma ASTM A 370 (2009) conforme Figura 3.

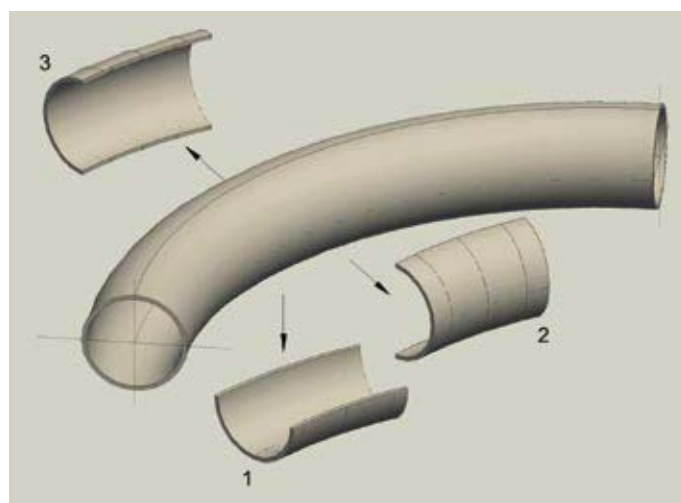


FIGURA 3: Regiões de retirada dos CPS: 1- Linha neutra oposta à solda; 2- intradorso e 3- extradorso.
Fonte: O Autor, 2010.

Os resultados do ensaio de tração apresentaram-se superiores aos valores mínimos exigidos pela norma do aço ASTM A 572 GR50 (2007), tanto para o limite de escoamento (LE) e quanto para o limite de resistência (LR). Com base Tabela 1.

	LE (Mpa)	LR (Mpa)	Alongamento (%)	LR/LE
Tubo reto	499	625	26	1,25
Linha Neutra	485	742	23	1,55
Extradorso	498	732	21	1,54
Intradorso	511	770	22	1,50
ASTM A 572 Gr 50 (2007)*	345	450	18	-
NBR 8800 (2008)*	-	-	-	1,18

*Valores Mínimos

Na Figura 4 observa-se um aumento significativo no LR dos tubos curvados, o que não ocorre para o LE. Em um dos seus trabalhos Gorni et. al. (2002) sugerem que esse aumento no LR pode ser explicado pelo aumento da fração volumétrica de bainita e martensita que eleva o limite de resistência do material sem afetar seu limite de escoamento. A linha neutra apresentou maior LR seguida pelo intradorso, extradorso e tubo reto.

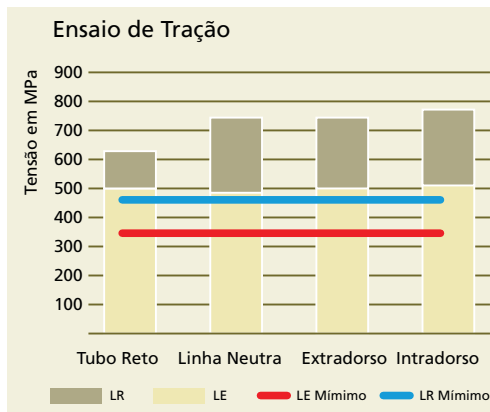


FIGURA 4: Resultado dos ensaios de tração. Fonte: O Autor, 2010.

Para a relação de LR/LE os valores apresentados (Figura 5) foram favoráveis, ficando todos acima do valor mínimo especificado pela norma, inclusive para o tubo reto. Observou-se um aumento considerável desta relação para os tubos curvados, este aumento apresentado pode ser considerado como consequência do aumento do limite de resistência conforme destacado por Ishikawa et. al. (2002) em um dos seus trabalhos.

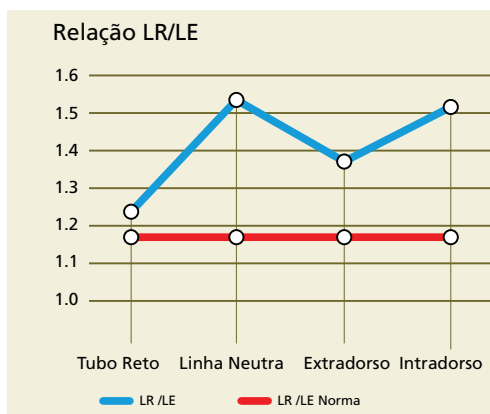


FIGURA 5: Relação LR/LE. Fonte: O Autor (2010).

Os resultados do alongamento (AL) estão apresentados na figura 6. Pela norma ASTM A 572 (2007) o mínimo é determi-

nado como 18%, no caso dos tubos analisados, os valores foram todos acima do mínimo requerido. Observa-se que as posições do tubo curvado apresentaram valores menores do que do tubo reto, esta diminuição já era esperada, refletindo o comportamento mecânico do material, ou seja, aumento do LR, diminuição do AL como destaca JUNIOR (2007).

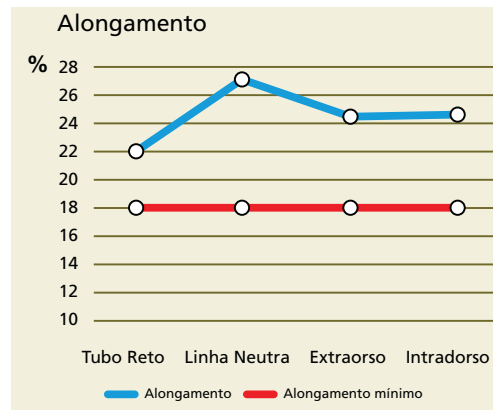


FIGURA 6: Alongamento no ensaio de tração. Fonte: O Autor (2010).

Análise dimensional

Um dos aspectos importantes a serem observados após o curvamento é a análise da variação dimensional dos tubos. Durante o processo, o material sofre grande deformação plástica, sendo que o extradorso (região tracionada da curva) sofre redução de espessura, enquanto o intradorso (região comprimida) sofre aumento de espessura, como destaca MUTHMANN et. al. (2006), e pode ser observado com os gráficos das Figuras 7 e 8. Além disso, HU et. al. (1999) destacam também que o tubo poderá apresentar ovalização após o processo de curvamento.

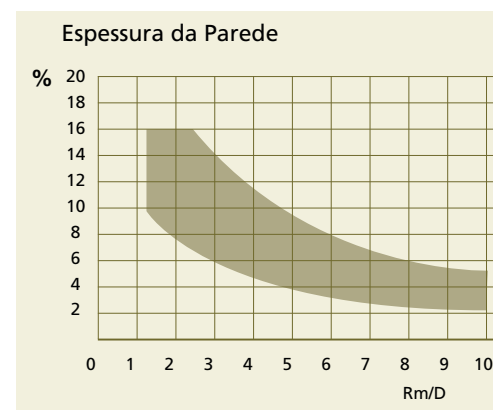


FIGURA 7: Redução da espessura no extradorso da curva com a variação do raio médio/diâmetro (RM / D). Fonte: MUTHMANN E. et. al. (2006).

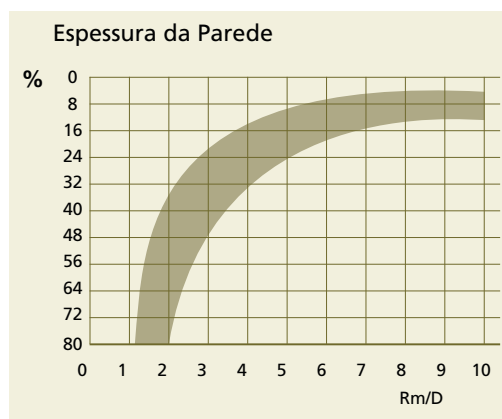


FIGURA 8: Aumento da espessura no intradorso da curva com a variação do raio médio/diâmetro (RM / D).
Fonte: MUTHMANN E. et. al., 2006.

A Figura 9 mostra a distribuição do alongamento e compressão para uma curva de raio equivalente a 5 vezes o diâmetro (48" x 24 mm - Aço API) durante o curvamento.

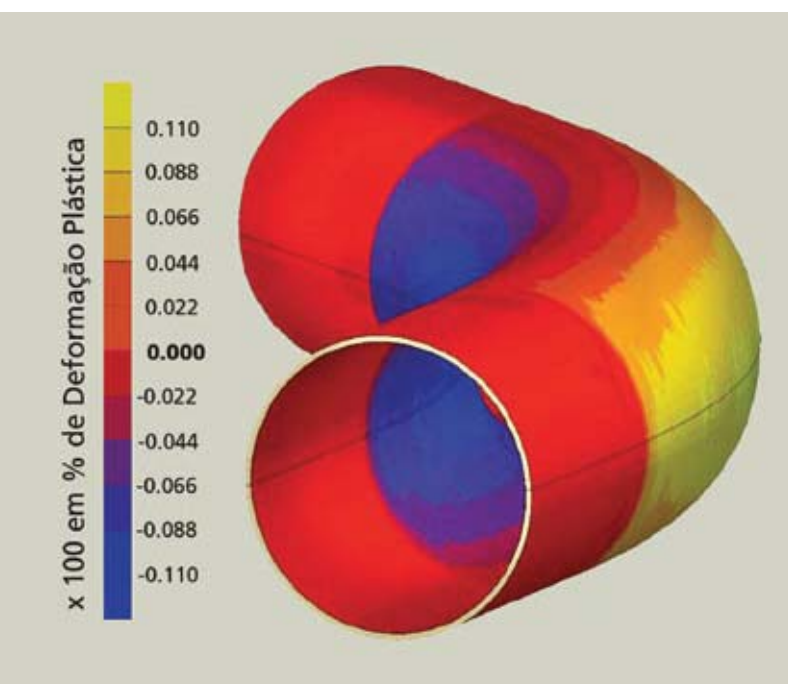


FIGURA 9: Distribuição do alongamento e compressão para uma curva de raio de 5 vezes o diâmetro (48" x 24 mm - Aço API Grau X65).
Fonte: MUTHMANN E. et. al., 2006.

Através dos resultados das inspeções realizadas após o curvamento foi elaborado o gráfico da Figura 10.

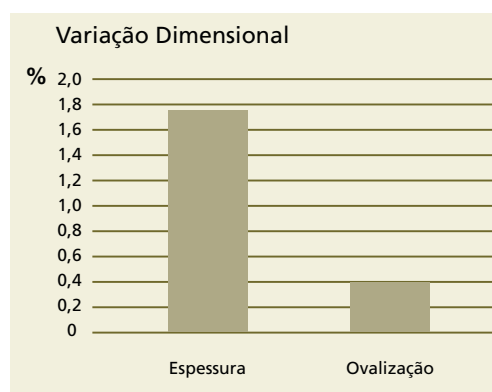


FIGURA 10: Variação dimensional medida após o curvamento.
Fonte: O Autor, 2010.

Observa-se que a variação de espessura e da ovalização é percentualmente menor em comparação com normas, por exemplo a ASTM A501, que permite a variação de -12,5% para a espessura e 1% para a ovalização. Esta pequena variação pode ser devido ao grande raio (aproximadamente 7632 mm).

Conclusões

Os resultados indicam que o curvamento por indução eletromagnética do tubo produzido com o aço ASTM A 572 GR 50 é viável considerando os parâmetros utilizados. O limite de escoamento não sofreu aumento significativo para todas as partes do tubo curvado. O limite de resistência sofreu aumento para todas as partes do tubo curvado, corroborando o aumento da relação LR/LE.

O processo de curvamento não comprometeu as propriedades mecânicas do aço, havendo inclusive melhorias significativas nestas propriedades, sendo assim favorável a sua aplicação em estruturas metálicas. Além disto, a variação dimensional se apresentou muito inferior ao limite mínimo da norma.

Agradecimentos

Os autores agradecem às empresas USIMINAS MECÂNICA S/A por disponibilizar as amostras e pela realização dos ensaios mecânicos e PROTUBO pelo fornecimento de informações técnicas sobre o curvamento. ■