

EFEITO DA CONFORMAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBO UOE*

Wagner Duarte Flores¹
Tadeu Messias Donizete Borba¹
Fábio Dian Murar²

Resumo

A demanda por tubos de aço com rigorosos requisitos de propriedades mecânicas tem crescido devido à exploração de reservas de petróleo e gás natural em regiões remotas e em ambientes hostis. Um grande desafio para as siderúrgicas é prever as alterações de propriedades mecânicas que ocorrem durante a conformação chapa/tubo, associadas ao encruamento e ao efeito *Bauschinger*, visando atender às especificações no tubo. Nesse estudo, foi avaliado o efeito da conformação chapa/tubo nas propriedades mecânicas do aço API X60 (TMCP). Para tal, foram realizados ensaios de tração, de impacto Charpy e de CTOD, em amostras de chapa e de tubo, e análise metalográfica, além de simulação do efeito *Bauschinger* por meio de ensaio cíclico compressão-tração. Os resultados dos ensaios de tração, tanto com os corpos de prova *plate type* quanto com *round bar*, apresentaram aumento da tensão limite de escoamento e redução da ductilidade, devido ao encruamento. Nos corpos de prova que sofreram aplainamento, esse aumento foi menos pronunciado, justificado pela ocorrência do efeito *Bauschinger*. A simulação do efeito *Bauschinger* confirmou a indicação de queda do limite de escoamento devido ao ciclo reverso de deformação. A tenacidade não foi fortemente afetada após a conformação do tubo.

Palavras-chave: Efeito *Bauschinger*; tubo UOE/SAW; TMCP.

EFFECT OF FORMING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF UOE PIPES

Abstract

The request for stringent requirements in mechanical properties in steel pipes have been grown due to exploration of oil and natural gas wells in far-off sites and hostile environments. An important challenge for the steelmakers is to predict the mechanical properties changes during the plate to pipe forming, associated with hardening and Bauschinger effect, in order to meet the specifications in the tube. In this study it was evaluated the effect of plate to pipe forming in the mechanical properties of an API X60 (TMCP) steel grade. To this point, tensile, Charpy, CTOD tests and metallographic analysis were carried out on plate and pipe samples, besides Bauschinger effect simulation through cyclic compression-tensile test. Tensile tests, both with plate type and round bar samples, showed an increase in yield stress and reduction in ductility, due to the hardening. In leveled specimens, this increase was less pronounced, proved by Bauschinger effect incidence. The Bauschinger effect simulation indicated decrease of yield stress due to the reverse cycle deformation. The toughness was not strongly affected after pipe forming.

Keywords: Bauschinger effect; UOE/SAW pipe; TMCP.

¹ Engenheiro Metalurgista, Pesquisador, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, D.Sc., Pesquisador Especialista, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo e gás natural em regiões distantes, inóspitas e que apresentam ambientes agressivos tem crescido nas últimas décadas devido, principalmente, ao aumento do consumo energético mundial e à redução da produção de poços existentes [1-4]. A Figura 1 ilustra a produção mundial de petróleo em milhões de barris diários (mbd) onde é possível notar uma progressiva exploração de novas reservas a partir de 2005, associada a uma redução na produção dos poços de petróleo já existentes. Segundo a IEA (*International Energy Agency*), o gás natural apresenta uma tendência ainda maior de crescimento de produção, sendo apontado como um dos principais combustíveis substitutos do petróleo. O crescente aumento no consumo de gás natural tem sido motivado por fatores tais como a necessidade de preservação do meio ambiente, a disponibilidade de reservas e o preço [3].

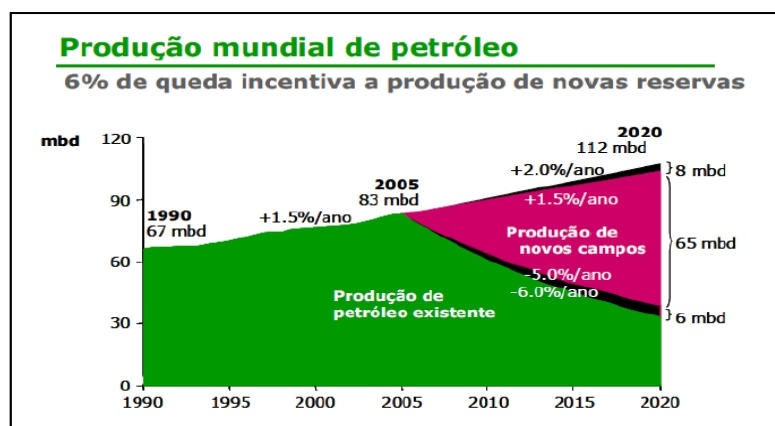


Figura 1. Produção mundial de petróleo em milhões de barris diários – mbd[4].

Essas previsões de aumento de produção de óleo e gás geram grandes perspectivas para a construção de oleodutos e gasodutos para o transporte desses combustíveis para os grandes centros urbanos estimulando, dessa forma, o consumo de aços para a fabricação de tubos. Esses tubos geralmente são de grande diâmetro, capazes de suportar condições adversas, como por exemplo, elevada pressão de operação, baixas temperaturas, ambientes corrosivos, dentre outros. Dessa forma, tais tubulações devem atender a diversos requisitos, estabelecidos em normas, de forma a assegurar a integridade estrutural e assim, evitar a ocorrência de acidentes que comprometam a segurança e o meio ambiente [5-9]. O diagrama da Figura 2 exemplifica a exigência de alguns desses requisitos, de acordo com determinadas condições e ambientes de operação.

Dentre as várias propriedades dos aços, a elevada resistência mecânica associada a uma boa tenacidade tem sido uma constante exigência na fabricação de tubos de grande diâmetro, as quais são obtidas com sucesso através da fabricação de chapas de aços microligados produzidas por processamento termomecânico de laminação controlada (*Thermomechanical Controlled Rolling - TMCR*) ou ainda por laminação controlada seguida de resfriamento acelerado (*Thermomechanical Controlled Process - TMCP*) [5,9].

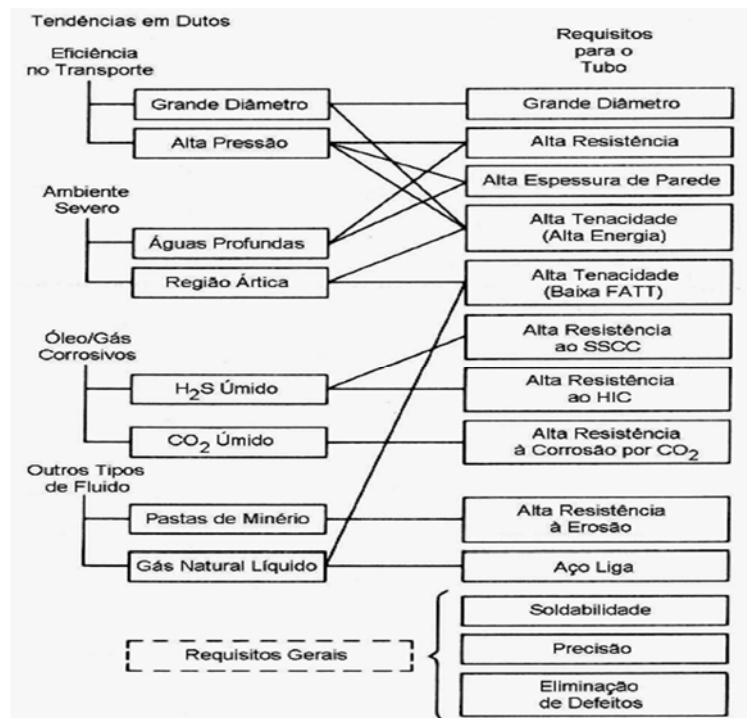


Figura 2. Principais requisitos em tubos de acordo com sua aplicação[5].

A fabricação do tubo, particularmente as etapas de conformação a frio, provoca variações nas propriedades mecânicas originais das chapas de aço decorrente das solicitações mecânicas de compressão e/ou tração desenvolvidas durante o processo de conformação, ilustradas na Figura 3. Essas alterações ocorrem devido ao encruamento do material e ao efeito *Bauschinger*, fenômeno esse último que provoca a redução da resistência mecânica, mais especificamente da tensão limite de escoamento, quando materiais como o aço, o cobre e o alumínio são submetidos a ciclos reversos de deformação [6,8].

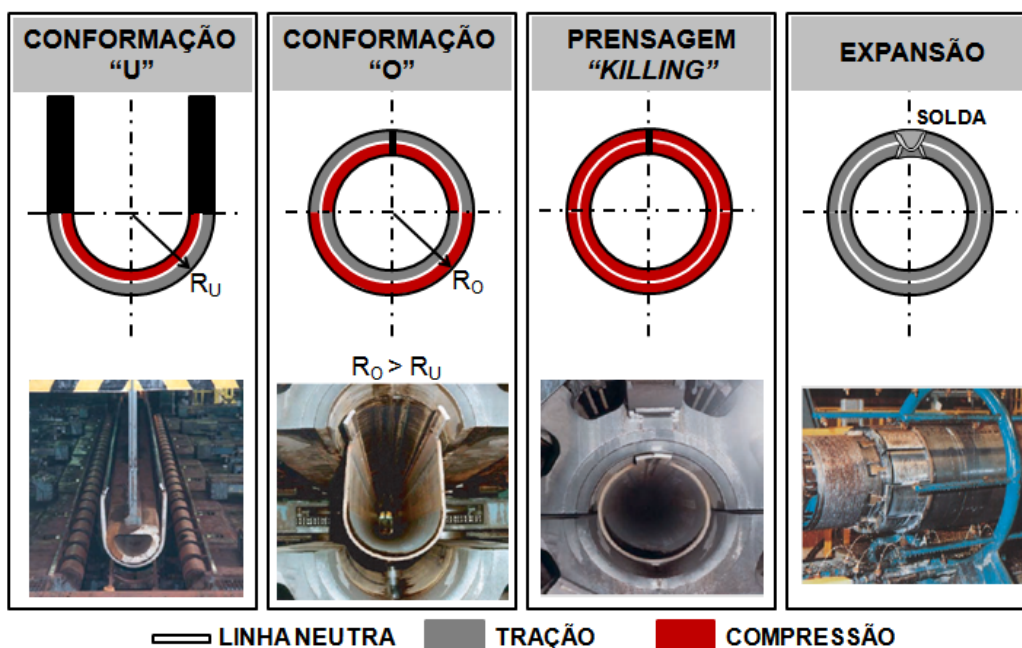


Figura 3. Tipos de solicitações mecânicas (compressão e/ou tração) desenvolvidas em cada etapa da conformação do tubo pelo processo UOE. Adaptado de Antaki [7] e Maita [8].

A redução da resistência mecânica é explicada pelo surgimento de tensões residuais geradas pelo travamento de discordâncias na pré-deformação, as quais auxiliam no escoamento do material no ciclo reverso de deformação, como ilustrado na Figura 4. Outro ponto a destacar é que a utilização da técnica de desempenho de corpo de prova para realização de ensaio de tração na direção circunferencial do tubo introduz ciclos adicionais de deformação, que resultam em novas alterações, podendo induzir a interpretações errôneas sobre os reais valores de resistência mecânica e ductilidade no tubo [8].

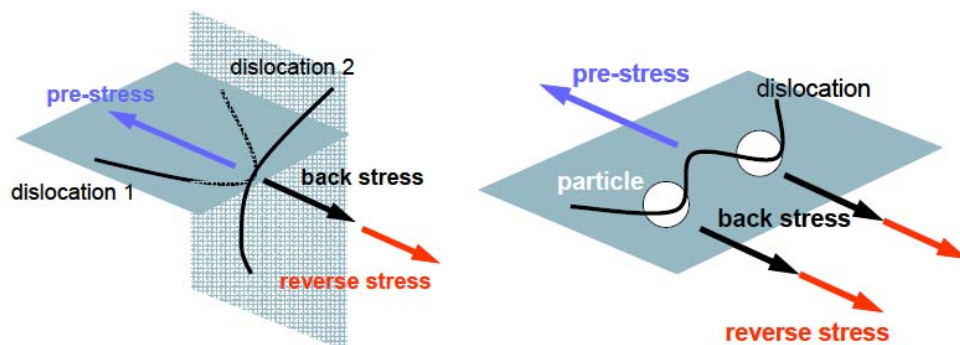


Figura 4. Representação do mecanismo de amaciamento por tensão reversa devido a interações entre discordância-discordância e discordância-precipitados [6].

As variações de propriedades mecânicas entre chapa e tubo são fortemente influenciadas pela composição química, pelo histórico de processamento termomecânico e pela microestrutura do aço. Nos trabalhos de Maita et. al. [8] e Ratnapuli et. al. [9], foi evidenciado que os aços com microestrutura ferrita acicular/bainita são menos suscetíveis ao efeito *Bauschinger* durante a conformação do tubo quando comparados a aços com microestrutura ferrita-perlita, como ilustrado na Figura 5. Dessa forma, para atender os requisitos especificados para o tubo, é essencial que se conheça os fenômenos metalúrgicos associados às alterações de propriedades mecânicas durante a conformação da chapa e, a partir de então, planejar seu controle de produção. Nesse contexto, nesse trabalho pretendeu-se avaliar as variações das propriedades mecânicas em tração e da tenacidade decorrentes da conformação de tubos, pelo processo UOE, de um aço do grau API X60, produzido via laminação controlada seguida de resfriamento acelerado (TMCP).

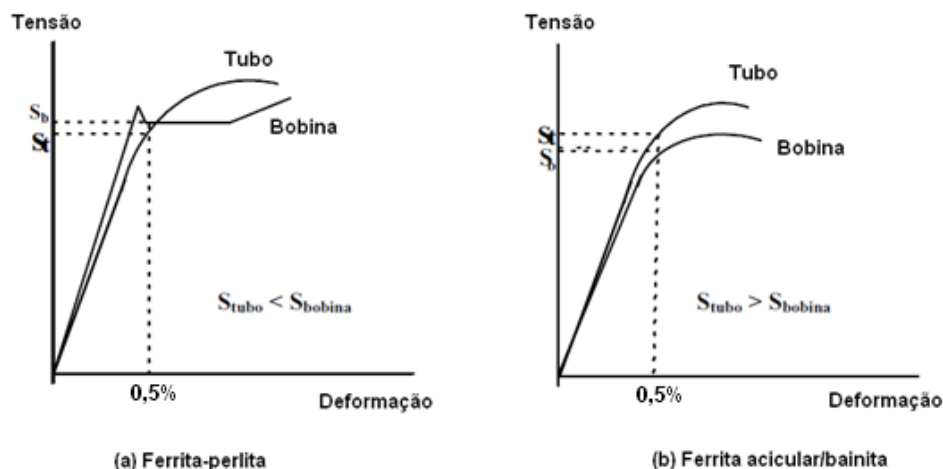


Figura 5. Efeito da microestrutura sobre a variação da tensão limite de escoamento na conformação de tubo. Adaptado de Maita [8].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais avaliados foram amostras de chapa e de tubo de um aço do grau API X60 (TMCP) para aplicação em ambiente ácido (*sour service*). As chapas grossas foram produzidas em escala industrial, na usina de Ipatinga, Usiminas, via laminação controlada seguida de resfriamento acelerado, utilizando a tecnologia CLC (*Continuous on-Line Control*), da NSSMC (Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation). A conformação do tubo foi feita pelo processo UOE e com soldagem por arco submerso, na fábrica da Tenaris, no Brasil. Na Tabela 1 estão mostradas as dimensões nominais da chapa e do tubo.

Tabela 1. Dimensões nominais da chapa e do tubo.

Aço	Chapa			Tubo	
	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Diâmetro (in/mm)	t/D*
API X60 (TMCP)	19,05	1528	12450	20/508	3,75

*t é a espessura e D o diâmetro do tubo.

Para a confecção dos corpos de prova (CPs) foram retirados uma amostra de 600 mm no comprimento da chapa, em toda a extensão da largura, e um anel de 600 mm no comprimento tubo, como ilustrado na Figura 6. Os CPs para os ensaios de tração foram extraídos nas posições referentes a $\frac{1}{4}$ da largura da chapa e a 90° do cordão de solda no tubo, enquanto que os CPs para os ensaios de tenacidade (Charpy e CTOD), foram extraídos nas posições referentes ao centro da largura da chapa e a 180° do cordão no tubo.

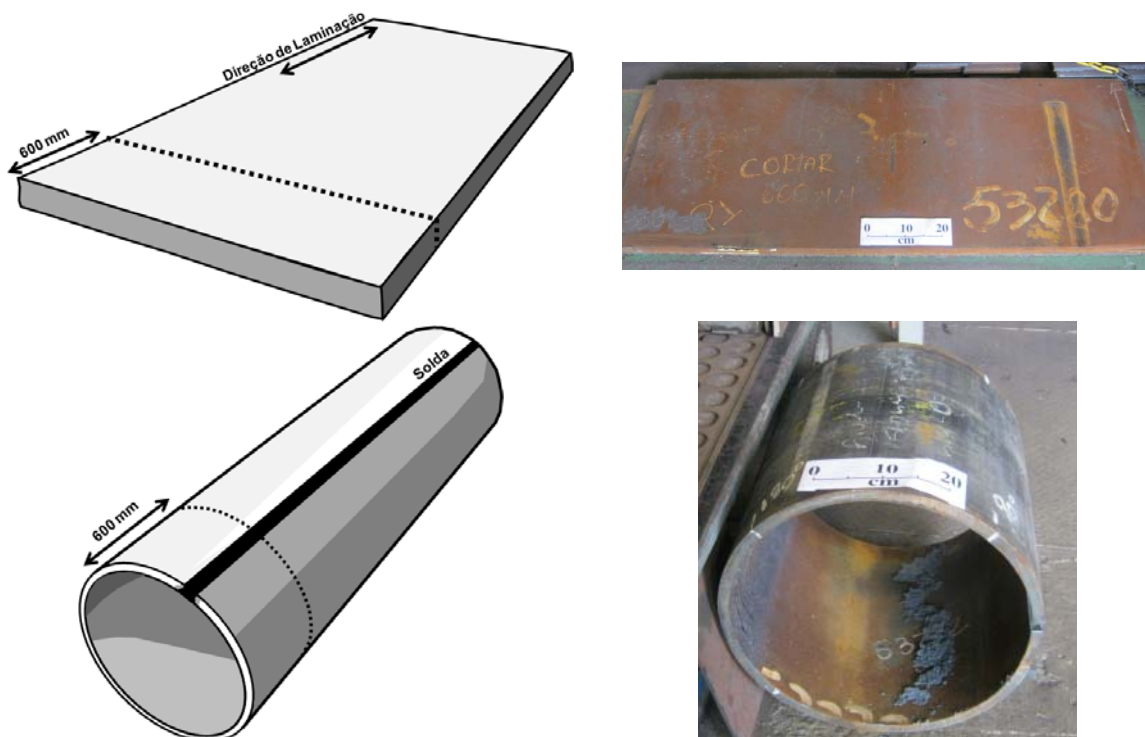


Figura 6. Esquema de amostragem da chapa e do tubo e aspecto das amostras avaliadas.

Os ensaios de tração foram realizados em amostras de chapa e de tubo, com CPs retangulares (*plate type*), com espessura original, e com CPs cilíndricos (*round bar*),

de acordo com a norma ASTM A370 [10]. Os ensaios foram realizados nas orientações transversal e longitudinal em relação à direção de laminação.

Os CPs plate type extraídos na orientação transversal ao comprimento do tubo, foram aplainados/desempenados. Esse procedimento não foi necessário para os CPs *round bar* extraídos na mesma orientação devido ao seu menor comprimento. De acordo com a literatura [8], o desempenho pode resultar em valores não representativos das propriedades mecânicas no tubo pelo fato de incluir um ciclo adicional de deformação no material.

A avaliação do efeito *Bauschinger* foi feita por meio de ensaio cíclico de compressão-tração com CPs cilíndricos extraídos da chapa e usinados com orientação transversalmente em relação à direção de laminação. Esse ensaio foi executado em duas etapas: (i) compressão: foram aplicadas pré-deformações de 0,5%, 2%, e 4% e (ii) tração: os CPs foram tracionados até a sua ruptura. O limite de escoamento foi tomado como o ponto de deformação total igual a 0,5%, de acordo com a norma API 5L [11].

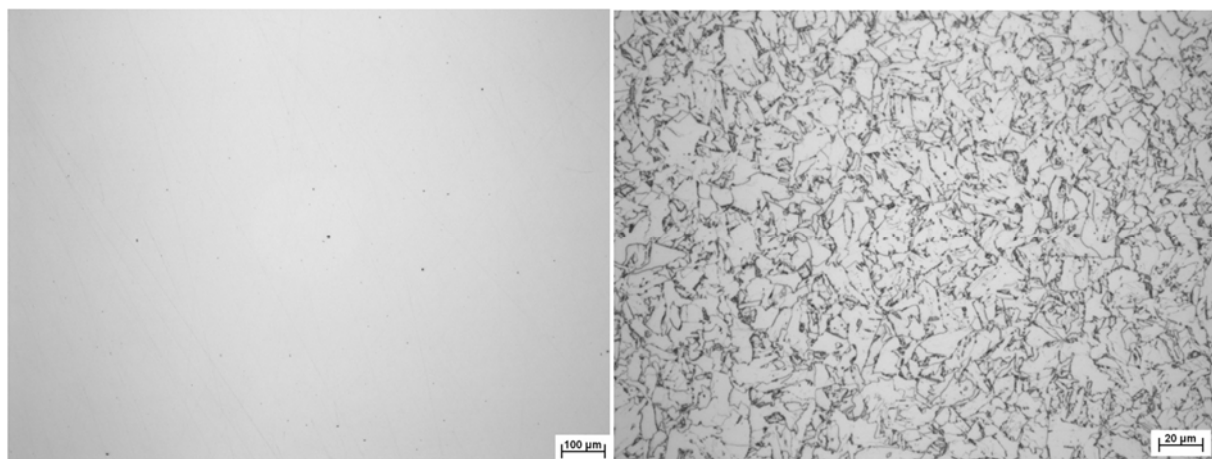
Os ensaios de impacto Charpy foram realizados com corpos de prova *full-size*, de acordo com a norma ASTM A370 [10], com orientação transversal em relação à direção de laminação, no intervalo de temperaturas entre 0°C e -70°C.

Os ensaios de CTOD foram realizados com corpos de prova do tipo SENB, de acordo com as normas ISO12135 [12] e BS7448-1 [13], com orientação transversal em relação à direção de laminação, na temperatura de -10°C.

Além dos ensaios mecânicos, também foi realizada análise metalográfica para caracterização das inclusões e da microestrutura do aço de forma a estabelecer uma correlação com os resultados de propriedades mecânicas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 7 estão mostradas a distribuição das inclusões e a microestrutura do aço. Na Tabela 2 está apresentada a fração volumétrica das fases realizada via análise por microscopia ótica com o auxílio de um analisador de imagem.



(a) Ampliação original: 100X.

(b) Ampliação original: 500X.

Figura 7. Distribuição das inclusões e microestrutura do aço API X60 (TMCP). Ataque com nital 4%.

Tabela 2. Distribuição de fases no aço API X60 (TMCP).

Aço	Ferrita (%)	Segunda fase (%) (bainita)
API X60 (TMCP)	87	13

Observa-se que, qualitativamente, o material apresenta uma excelente limpidez e está isento de inclusões alongadas de MnS, ratificando a eficácia dos tratamentos de globulização de inclusões e de duplo refino realizados na aciaria. Essas etapas de tratamento do aço líquido são essenciais para o sucesso da aplicação desse material em ambiente *sour*.

O aço avaliado possui microestrutura refinada com uma fina distribuição de carbonetos em uma matriz constituída, na sua maioria, por ferrita acicular e ferrita poligonal e por uma menor fração de segunda fase. Sua distribuição apresentou-se uniforme e sem presença de segregação. Tais características microestruturais foram favorecidas pela execução das operações de laminação de acabamento e de início de resfriamento acima do campo intercrítico (acima de A_{r3}).

Na Figura 8 estão mostrados os resultados obtidos nos ensaios de tração. Para os resultados com CPs *plate type*, verifica-se, como efeito da conformação chapa/tubo, um aumento da tensão limite de escoamento, seguido de redução da ductilidade. O nível de elevação de resistência mecânica foi similar em ambas as orientações, longitudinal e transversal. Já para os resultados com CPs *round bar*, novamente, verificou-se um aumento da tensão limite de escoamento seguido de redução da ductilidade. No entanto, o aumento na orientação transversal foi acentuadamente maior do que na longitudinal. Tal resultado pode estar associado à ausência do efeito *Bauschinger*, já que esses corpos de prova não sofreram desempenho.

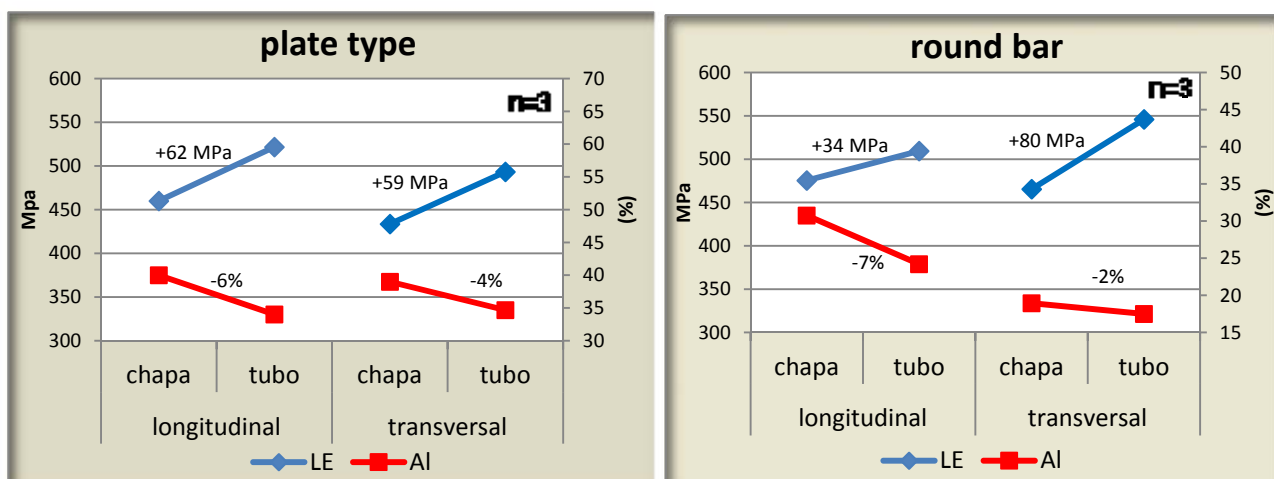


Figura 8. Variação dos valores médios da tensão limite de escoamento e do alongamento (base de medida = 50 mm) decorrente da conformação chapa/tubo, em função do tipo de corpo de prova.

Os resultados dos ensaios cíclicos compressão-tração, mostrados na Figura 9, indicaram uma progressiva queda do limite de escoamento com o aumento da pré-deformação, o que foi justificado pelo efeito *Bauschinger*.

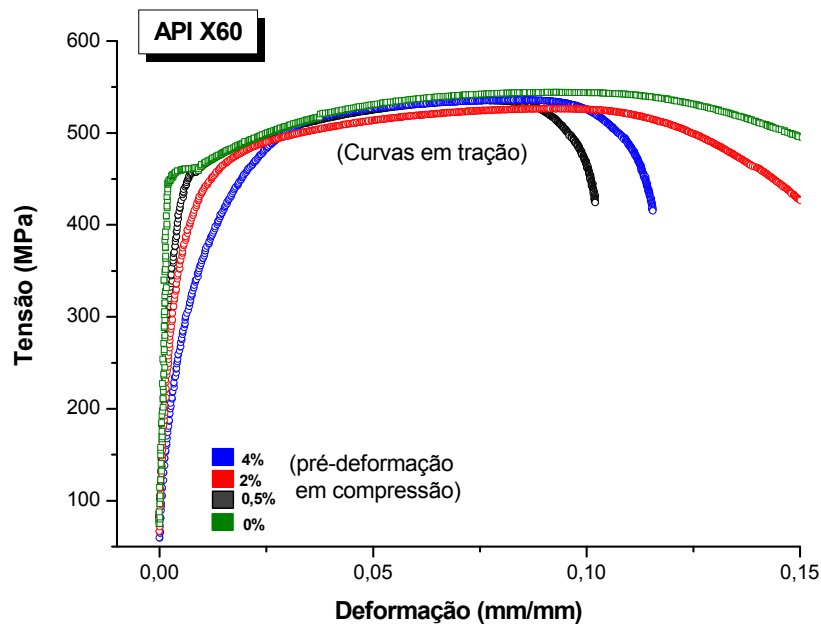


Figura 9. Variação da tensão limite de escoamento em função da pré-deformação em ensaio cíclico compressão-tração do aço API X60 (TMCP).

Os resultados de tenacidade obtidos em ensaio de impacto Charpy, mostrados na Figura 10, indicaram que não houve queda acentuada da energia absorvida devido à conformação chapa/tubo para o aço avaliado, particularmente até a temperatura de -40°C . Os altos valores de energia para o aço API X60 em todas as temperaturas avaliadas sugerem que se encontram no patamar superior da curva de transição. Os resultados de ensaio de CTOD, mostrados na Figura 11 e na Tabela 3, também indicaram que não houve queda acentuada da tenacidade à fratura devido à conformação chapa/tubo. Os elevados valores observados tanto no ensaio Charpy-V quanto no ensaio de CTOD são justificados pela elevada limpidez do aço, pela composição química com baixos teores de carbono, fósforo e enxofre e pela matriz composta de ferrita acicular, homogeneamente distribuída, sem presença de segregação. O maior controle de composição química e de microestrutura desse aço se deve à sua aplicação mais restrita, para condição *sour service*.

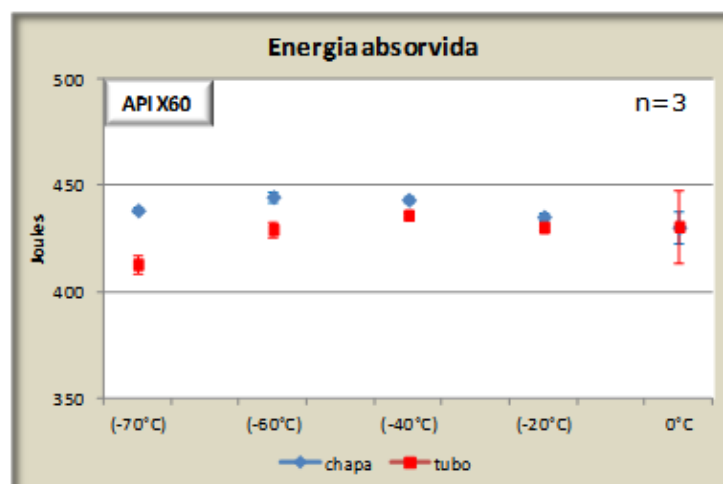


Figura 10. Variação da energia absorvida, em função da temperatura, para o aço API X60 (TMCP), em chapa e em tubo.

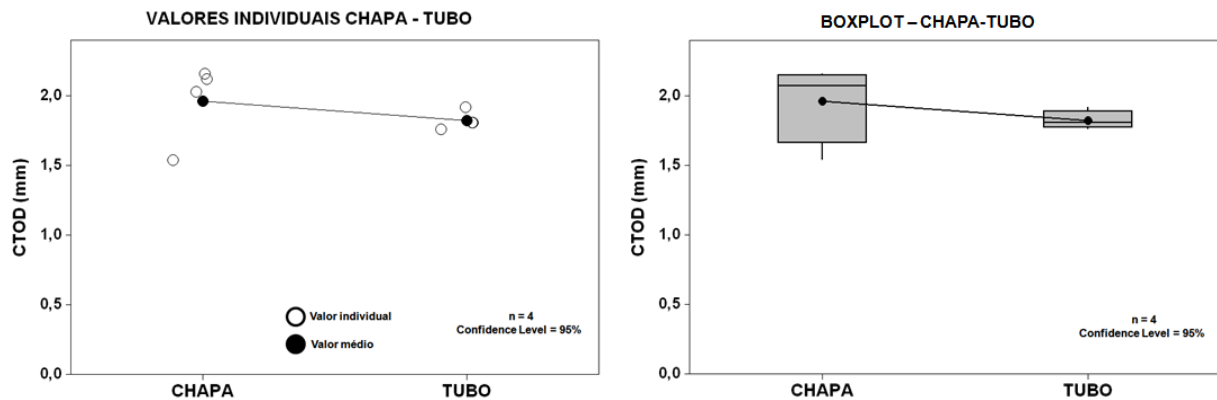


Figura 11. Variação da tenacidade, em ensaio de CTOD, devido à conformação chapa/tubo para o aço API X60 (TMCP).

Tabela 3. Valores de CTOD do aço API X60 (TMCP).

Aço	CTOD (mm)	
	Chapa	Tubo
API X60 (TMCP)	2,12	1,76
	1,54	1,81
	2,16	1,92
	2,03	1,81
Média	1,96 ± 0,29	1,82 ± 0,07

4 CONCLUSÃO

Um estudo da evolução de propriedades mecânicas entre a chapa e o tubo foi realizado, para um aço fabricado por TMCP, na Linha de Chapas Grossas da Usiminas, em Ipatinga. Nos ensaios de tração, realizados com geometrias de corpos de prova *plate type* e *round bar*, verificou-se um aumento da tensão limite de escoamento e redução da ductilidade devido ao encruamento do material durante a conformação chapa/tubo. O aumento da resistência mecânica na orientação transversal foi mais pronunciado para os corpos de prova *round bar*, o que foi justificado pelo maior nível de deformação nessa orientação, em relação à longitudinal. Ao avaliar os resultados dos corpos de prova *plate type*, esse aumento não foi tão pronunciado, o que pode ser justificado por uma queda da resistência mecânica devido ao efeito *Bauschinger* na etapa de desempenho do corpo de prova, visto que o encruamento e o efeito *Bauschinger* são fenômenos concorrentes. A simulação de efeito *Bauschinger* por meio de ensaio cíclico compressão-tração confirmou a tendência de queda do limite de escoamento, em um ciclo reverso de deformação, com o aumento do nível de pré-deformação. Tais resultados sugerem que a aplicação do procedimento de desempenho possa mascarar os valores reais de propriedades mecânicas no tubo. A literatura indica que uma microestrutura com matriz do tipo ferrita acicular, como a encontrada no aço API X60 avaliado nesse estudo, é menos propícia ao efeito *Bauschinger* em relação a um aço que possui uma microestrutura do tipo ferrita-perlita. Em relação à tenacidade, tanto em ensaio de impacto Charpy quanto em ensaio de CTOD, não foi verificada uma deterioração acentuada devido à conformação chapa/tubo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Tenaris pela cessão de amostra de um tubo.

REFERÊNCIAS

- 1 Exxonmobil. The Outlook for Energy: A View to 2040”, 2013. [acesso em 18/01/2013]. Disponível em http://www.exxonmobil.com/corporate/files/news_pub_eo2013.pdf.
- 2 Energy Information Administration - EIA. International Energy Outlook. 2011. [acesso em 18/01/2013]. Disponível em: <http://www.eia.gov/>.
- 3 International Energy Agency - IEA. World Energy Outlook. 2011. [acesso em 17/10/12]. Disponível em <http://www.iea.org>.
- 4 Silva RC. Caracterização de um Aço Microligado ao Boro e Tratado Termicamente Utilizado na Fabricação de Tubos. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista. 2009.
- 5 Gorni AA, Silveira JHD, Reis JSS. Metalurgia dos Aços Microligados Usados na Fabricação de Tubos Soldados com Grande Diâmetro. Revista Tubo & Companhia. 2009: 52-63.
- 6 Kostryzhev AG. *Bauschinger* Effect in Nb and V Microalloyed Line Pipe Steels. Tese de Doutorado – Universidade de Birmingham. 2009.
- 7 Antaki GA. Piping and Pipeline Engineering – Design, Construction, Maintenance, Integrity and Repair. ed. Dekker. 2003.
- 8 Maita J. Castella A. Barbaro M. Basanta R. Maini O. Flores TV. Bruna R. Acero Microaleado de Alta Resistencia Y Tenacidad Resistente al Efecto *Bauschinger*. 16º IAS Rolling Conference, San Nicolas – Argentina. 2006.
- 9 Ratnapuli RC. Castro I. Pereira AM. Propriedades Mecânicas dos Aços Bainíticos Baixo Carbono Microligados com Nb. 48º Congresso Anual da ABM. 1993.
- 10 American Society for Testing And Materials. ASTM A370 – Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. 2009.
- 11 American Petroleum Institute. API 5L – Specification for Line Pipe. 2007.
- 12 International Standard. ISO12135 – Metallic Materials – Unified Method of Test for the Determination of Quasistatic Fracture Toughness. 2002.
- 13 British Standard. BS7448 - Fracture Mechanics Toughness Tests: Part I – Method for determination of KIC, critical CTOD and critical J values of metallic materials. 1991.