

# AValiação DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS SOBRE AS MICROESTRUTURAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE TUBOS DE AÇO SEM COSTURA DO TIPO API 5L\*

Betânia Mendes Sena<sup>1</sup>  
Leonardo Barbosa Godefroid<sup>2</sup>

## Resumo

Neste trabalho é apresentada a influência de diferentes processos de tratamentos térmicos sobre as microestruturas e propriedades mecânicas resultantes em tubos de um aço sem costura do tipo API 5L. Após tratamentos térmicos, o material foi estudado em três condições diferentes: apenas laminado, normalizado e temperado e revenido, objetivando obter os graus X42R, X42N e X70Q, respectivamente. Ensaios de tração, dureza e impacto foram utilizados para caracterizar o comportamento mecânico dos diferentes graus do aço. Técnicas de microscopia eletrônica de varredura foram utilizadas para caracterizar as microestruturas resultantes dos tratamentos térmicos e as fractografias dos corpos de prova de tração e impacto. Os resultados mostram que tubos de aço sem costura do tipo API 5L não precisam ser de graus tão elevados quanto os tubos soldados, pois graus intermediários relativos aos tubos sem costura possuem propriedades mecânicas similares aos elevados graus de aço relativos aos tubos soldados, o que evidencia a vantagem da rota de fabricação de tubos sem costura.

**Palavras-chave:** Propriedades mecânicas; Relação microestrutura/ propriedades; Aços API 5L; Tubos de aço sem costura.

## EVALUATION OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT PROCESSES OF HEAT TREATMENTS ON MICROSTRUCTURES AND MECHANICAL PROPERTIES OF SEAMLESS STEEL PIPES API 5L TYPE

### Abstract

This research presents the influence of manufacturing processes and heat treatments on microstructures and mechanical properties of seamless steel pipe API 5L. After heat treatment, the material was studied in three different conditions: as rolled, normalized and quenched and tempered, aiming to get the grades X42R, X42N and X70Q respectively. Tensile tests, hardness tests and impact tests were used to characterize the mechanical behavior of the different grades of steel. Techniques of scanning electron microscopy were used to characterize the microstructures resulting from heat treatments and fractographic analysis of the test pieces. The results show that seamless steel pipes of API 5L type need not be as high as welded pipes grades, because intermediate grades for the seamless pipes have similar mechanical properties to the high steel grades for the welded pipes, which shows the benefit manufacturing processes of seamless steel pipes.

**Keywords:** Mechanical properties; Relationship microstructure/ properties; API 5L steels; Steels for pipelines.

<sup>1</sup> Engenheira Metalurgista, REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, Me., Dr., REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento da indústria de petróleo e gás impulsionou um aumento significativo na demanda mundial por tubos utilizados na construção de oleodutos e gasodutos de grande vazão. Da mesma forma, a utilização de minerodutos para o transporte de polpa de minério de ferro em longas distâncias tem sido uma solução adotada por muitas empresas de mineração. O aumento desta demanda tem exigido não só a utilização intensiva da malha dutoviária já existente como também impulsiona o crescimento e a extensão da vida útil das linhas já instaladas. Neste sentido, sob o aspecto específico de avaliação da integridade estrutural, a necessidade de segurança em sistemas dutoviários tem por objetivo aumentar a confiabilidade operacional de dutos, ampliar a vida útil da malha já instalada e minimizar riscos de vazamentos [1-8].

Na construção de novos dutos terrestres empregam-se tubos de grandes diâmetros que operam sob alta pressão, permitindo um ganho de produtividade tanto pelo aumento do volume de fluido transportado quanto pela redução de peso da estrutura, devido à menor espessura de parede. Isto só se tornou possível com o desenvolvimento contínuo de elevados graus de aços microligados, que atendem a norma API, com características de soldabilidade, resistência mecânica e tenacidade cada vez melhores [9-11]. A fabricação de tubos de aço para a condução de petróleo e gás segue a norma API 5L [12].

O requisito de alta resistência mecânica, combinada com boa tenacidade à fratura em baixas temperaturas e, também, uma boa soldabilidade, implica na utilização de aços microligados de alta resistência e baixa liga (ARBL), obtidos por meio do processamento termomecânico. O objetivo final é obter uma microestrutura de grãos refinados e com a presença de partículas de segunda fase bem selecionadas [1,2,8,13,14].

Há poucos estudos na literatura técnica a respeito das microestruturas e das propriedades mecânicas de tubos sem costura, pois a grande parte das pesquisas concentram-se em tubos soldados, obtidos a partir da laminação controlada [13,14]. Para uma mesma composição química, tratamentos térmicos convencionais aplicados a tubos de aço sem costura resultam em microestruturas especiais que permitem propriedades mecânicas diferenciadas das obtidas via laminação controlada - processo utilizado para se obter as chapas de aço necessárias para a fabricação de tubos de soldados. Em consequência disso, pode-se observar que tubos de aço sem costura não precisam ser de graus tão elevados quanto os tubos soldados, pois graus intermediários relativos aos tubos sem costura possuem propriedades mecânicas similares aos elevados graus de aço relativos aos tubos soldados. Esta é uma grande vantagem da rota de fabricação de tubos de aços com costura, pois a partir de um aço relativamente simples, tal qual o estudado neste trabalho, e com o auxílio de processos de tratamentos térmicos convencionais é possível obter graus intermediários, diferente dos tubos soldados que precisam de uma composição química mais elaborada e criteriosa, além de um processamento termomecânico peculiar [12].

Deste modo, o presente trabalho objetivou avaliar a influência de diferentes tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas e na microestrutura de um aço API 5L utilizado no projeto de dutos condutores de petróleo e gás. Após tratamentos térmicos, o material foi estudado em três condições diferentes: apenas laminado, normalizado e temperado e revenido, com o intuito de obter os graus X42R, X42N e X70Q, respectivamente. Outro objetivo desta pesquisa foi mostrar a possibilidade de

se alcançar graus de aço API 5L não muito elevados, mas que possuem propriedades mecânicas satisfatórias, usando uma composição química relativamente simples e tratamentos térmicos convencionais, isto é, obter propriedades mecânicas satisfatórias à baixo custo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material estudado foi fabricado pela empresa Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil (VSB), e foi fornecido como tubo de aço sem costura com diâmetro externo nominal medindo 219,10mm e espessura de parede medindo 8,2mm. A Tabela 1 apresenta a faixa de composição química desse aço microligado [12].

**Tabela 1.** Composição química nominal (% massa) do aço API 5L em estudo [12]

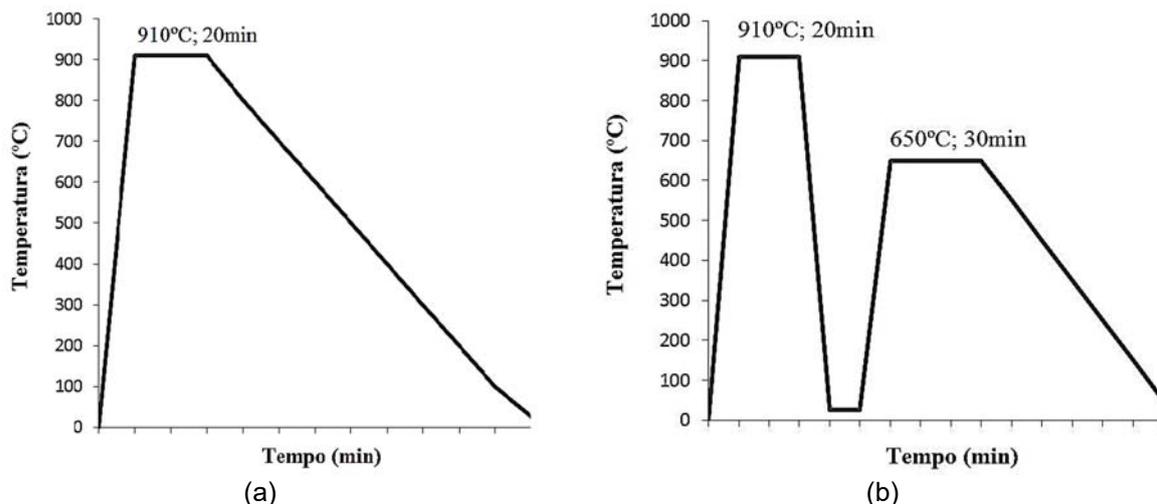
ELEMENTO	C	Mn	Si	P	S	Al	Cu
<b>TEOR</b>	0,18- 0,20	1,00- 1,10	0,20- 0,30	0,000- 0,020	0,000- 0,010	0,020- 0,040	0,00- 0,20
ELEMENTO	Cr	Ni	Mo	Ti	V	Nb	N
<b>TEOR</b>	0,00- 0,20	0,00- 0,20	0,000- 0,070	0,000- 0,010	0,02- 0,03	0,000- 0,010	0,0000- 0,0120

A análise química do aço foi realizada por meio de um espectrômetro de emissão óptica e para isso, utilizou-se um corpo de prova de dimensões 40mm x 40mm x 8,2mm, de acordo com a API 5L [12].

O ponto de partida para a pesquisa foi o aço apenas laminado, que atendeu aos requisitos do grau API 5L X42R. Depois disso, foram realizados tratamentos térmicos nas chapas retiradas do tubo para que, posteriormente, fossem confeccionados corpos de prova. Os tratamentos térmicos de normalização e têmpera/ revenimento tiveram como objetivo atingir aos graus X42N e X70Q, respectivamente. Para os tratamentos térmicos realizados, adotou-se como temperatura de austenitização a temperatura de 910°C, devido ao fato de que a temperatura  $A_{c3}$  deste aço é 835°C, conforme informações da empresa fabricante.

O tratamento térmico de normalização foi realizado de acordo com o ciclo térmico mostrado na Figura 1a, objetivando atender aos requisitos do grau X42N da norma API 5L [12]. As chapas foram austenitizados em um forno de resistência elétrica, e após este processo, o resfriamento das mesmas foi ao ar calmo e a temperatura ambiente.

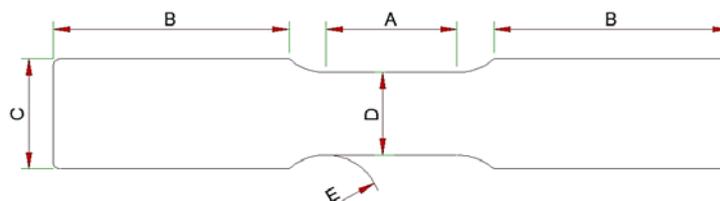
De modo análogo, foi realizado o tratamento térmico de têmpera e revenimento, de acordo com o ciclo térmico mostrado na Figura 1b, onde se objetivou o grau X70Q da norma API 5L [12]. A austenitização foi realizada do mesmo modo que no tratamento térmico de normalização e as chapas foram temperadas a partir de sua temperatura de austenitização com resfriamento rápido em água (inicialmente a 27°C) com agitação em um tanque de resfriamento. O tratamento térmico de revenimento, pós-têmpera, foi realizado a 650°C (temperatura escolhida de acordo com curvas de revenimento fornecidas pela empresa fabricante deste aço) seguido de resfriamento ao ar calmo a temperatura ambiente. A medição do tempo em todas as etapas iniciou-se quando o termopar em contato com a peça indicou a temperatura visada.



**Figura 1.** (a) Ciclo térmico de normalização e (b) ciclo térmico de tempera/ revenimento.

Para fazer a caracterização microestrutural na direção transversal, foram confeccionados corpos de prova de dimensões 40mm x 40mm x 8,2mm do material laminado, do normalizado e do temperado/ revenido. As microestruturas foram observadas em um microscópio óptico (MO) e em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), o tamanho de grão foi determinado em um em microscópio óptico (MO) segundo a norma ASTM E112 [15]. Para se caracterizar melhor a estrutura bandeada no material laminado e do normalizado, determinou-se o grau de bandeamento de acordo com a norma ASTM E 1268-01[16].

Os corpos de prova para ensaios de tração seguiram o padrão das normas API 5L [12], ASTM A370 [17] e ASTM E8 [18], conforme ilustram a Figura 2 e a Tabela 2. Estes ensaios foram realizados a temperatura ambiente em uma máquina servo-hidráulica com capacidade de 10ton, aquisição de dados por computador e controle de deformação por meio de extensômetro.



**Figura 2.** Corpo de prova de tração com seção transversal retangular.

**Tabela 2.** Cotas para o corpo de prova para ensaio de tração

COTAS					
	A	B	C	D	E
<b>Valor (mm)</b>	59,2	≥ 100	50,8	38,1	27,4
<b>Tolerância (mm)</b>	(± 2,0)	-	(± 1,0)	(± 1,0)	(± 2,0)

O principal objetivo dos ensaios de dureza foi comparar os valores entre as diferentes condições adotadas (laminado, normalizado e temperado/ revenido) e para isso escolheu-se a escala Vickers. As dimensões dos corpos de prova de dureza são mostradas na Figura 3 e suas dimensões estão de acordo com as normas API 5L [12], ASTM A370 [17] e ASTM E384 [19]. Este ensaio foi realizado a temperatura ambiente em um durômetro universal Ernst®, modelo EM308-10, com capacidade 100 a 255HV.

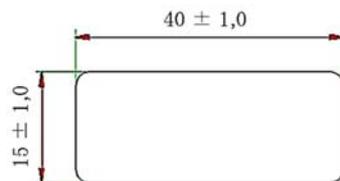


Figura 3. Corpo de prova para ensaio de dureza Vickers retirado na parede do tubo.

O principal objetivo dos ensaios de impacto Charpy foi obter uma estimativa da tenacidade do material por meio da energia absorvida e da porcentagem de fratura dúctil dos corpos de prova. Os ensaios foram realizados em duas temperaturas a 0° e a 21°C. Antes de se ensaiar os corpos de prova a 0°C, os mesmos foram mantidos em um banho de álcool etílico em uma cuba de resfriamento por 10 minutos, esta continha um termômetro que estava ligado a um computador que fazia a aquisição de dados via software específico processando as informações de temperatura e informando por meio de um gráfico a homogeneidade de temperatura do banho. Os parâmetros utilizados para a realização destes ensaios estão de acordo com a norma ASTM E23 [20]. As dimensões dos corpos de prova de impacto Charpy com entalhe em “V” são mostradas na Figura 4 e na Tabela 3 e estão de acordo com as normas API 5L [12], ASTM A370 [17] e ASTM E23 [20].

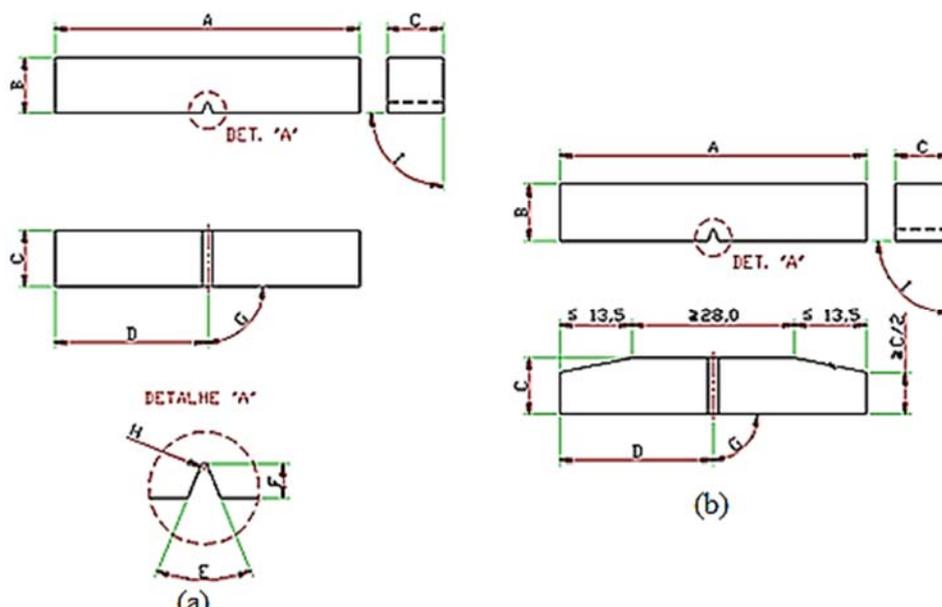


Figura 4. Corpo de prova com entalhe em “V” para ensaio de impacto Charpy: (a) longitudinal e (b) transversal

Tabela 3. Cotas para o corpo de prova para ensaio de impacto Charpy

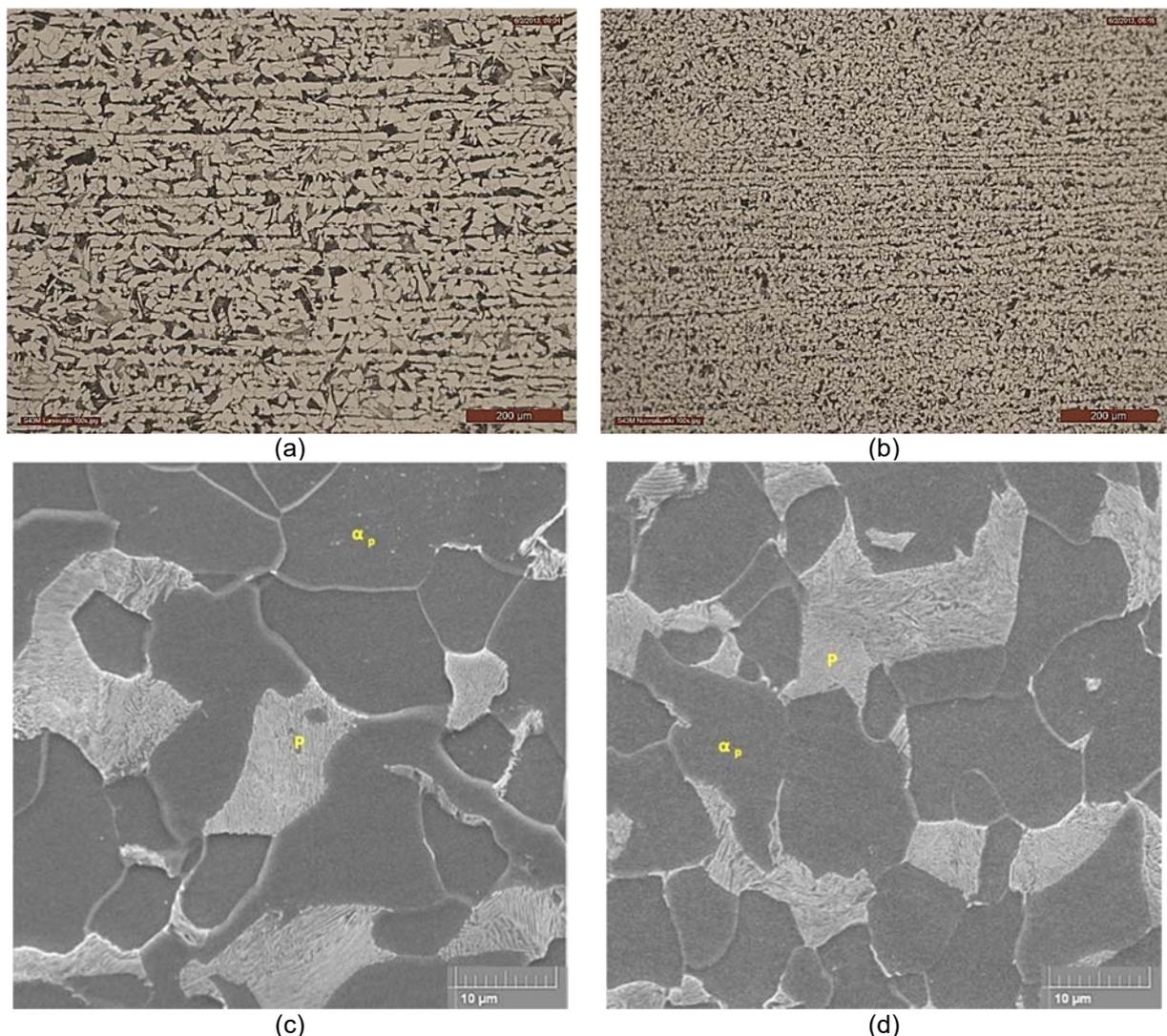
	COTAS				
	A	B	C	D	E
Valor (mm)	55	10	5	A/2	45,0°
Tolerância (mm)	(±1,0)	(±0,025)	(±0,025)	(±1,0)	(±1,000)
	F	G	H	I	
Valor (mm/ °)	2	90,0°	0,25	90,0°	
Tolerância (mm)	(±0,025)	(±2,000)	(±0,025)	(±0,167)	

Por fim, utilizou-se o MEV para caracterizar as superfícies e os micromecanismos de fratura em corpos de prova de tração e em corpos de prova de impacto Charpy.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

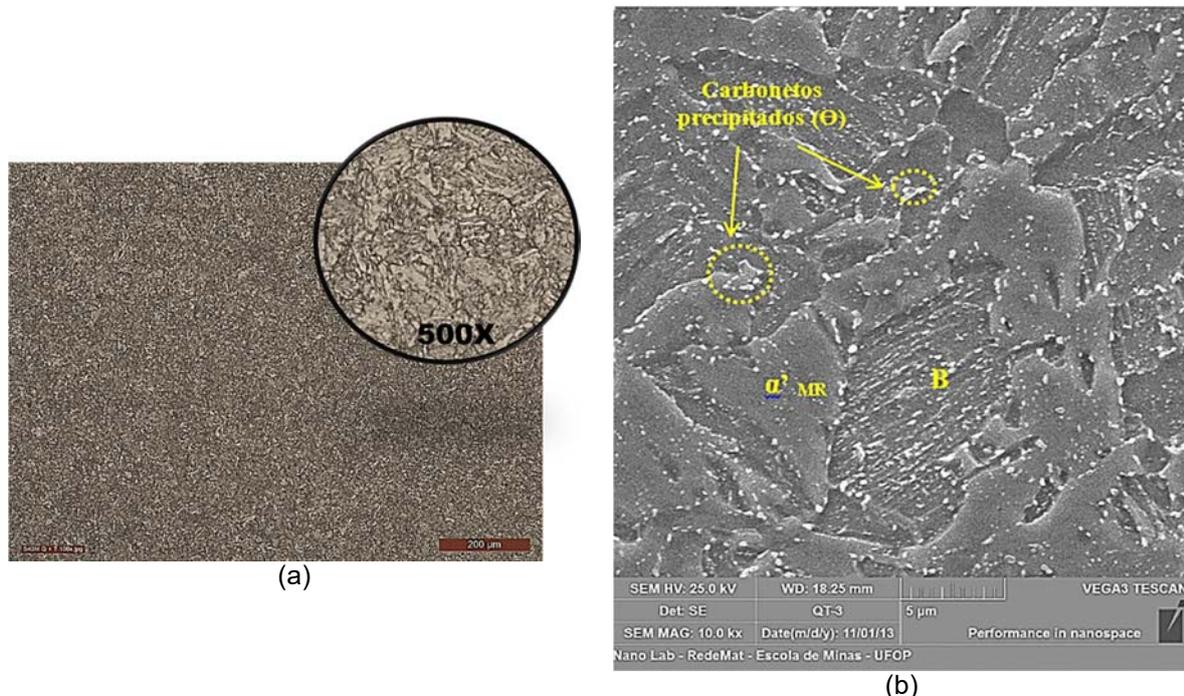
Após a realização da análise química do aço microligado em estudo, verificou-se que a mesma está conforme especifica a norma API 5L [12]. Este é um aço com uma composição química relativamente simples, com carbono equivalente  $C_{eq} = 0,376\%$ . Um ponto importante a ser destacado foi a presença de vanádio na composição química do aço, um elemento adicionado principalmente para controlar o tamanho de grão e promover o endurecimento por precipitação.

A análise microestrutural, Figura 5, mostrou que o material laminado e o normalizado apresentam uma microestrutura bandeada composta por ferrita poligonal e perlita. No material laminado o grau de bandeamento ( $\Omega_{12}$ ) é 0,28 e no normalizado é 0,14, uma ocorrência comum em aços de baixa liga laminados a quente [21-24]. Não foi observada a presença de ferrita acicular, bainita ou constituinte M-A. O aço normalizado mostrou um tamanho de grão ( $TG_{ASTM} = 9$ ) inferior ao aço apenas laminado ( $TG_{ASTM}$  variando entre 6 e 7). Esta determinação foi feita utilizando-se o método comparativo, com base na norma ASTM E112 [15], tabela IB.



**Figura 5.** Microestrutura do material laminado (a,c) e do material normalizado (b,d).  
 $\alpha_p$  = ferrita poligonal; P = perlita.

O aço temperado/ revenido possui uma matriz composta por martensita revenida e bainita com carbonetos finamente dispersos (partículas de cementita), como mostrado na Figura 6. Como o aço em estudo tem vanádio na sua composição química, é possível que haja também carbonetos de vanádio finamente dispersos nesta matriz.



**Figura 6.** Microestrutura do material temperado e revenido (a) MO e (b) MEV.  $\alpha'$  MR = martensita revenida; B = bainita;  $\ominus$  = carbonetos.

A Tabela 4 mostra as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração para os três estados considerados - material laminado (X42R), material normalizado (X42N) e material temperado/ revenido (X70Q) – e a especificação API 5L [12] para atender aos respectivos graus.

**Tabela 4.** Propriedades mecânicas de tração

GRAU	LE (MPa)	Requisito API [12]	LR (MPa)	Requisito API [12]	ALO (%)	Requisito API [12]
X42R	370 ± 5	290-495	536 ± 3	415-760	35 ± 1	27 (mín.)
X42N	352 ± 5	290-495	518 ± 3	415-760	38 ± 1	27 (mín.)
X70Q	546 ± 8	485-635	631 ± 9	570-760	31 ± 1	21 (mín.)

LE = limite de escoamento; LR = limite de resistência; ALO = alongamento percentual até a fratura.

Pela Tabela 4 pode-se concluir que o material apenas laminado atendeu aos requisitos de tração exigidos para o grau X42R. Também pode-se observar que o tratamento térmico de normalização e o de têmpera/ revenimento modificaram a microestrutura e conseqüentemente as propriedades mecânicas dos materiais de modo a tender aos graus X42N e X70Q, respectivamente.

Para melhor analisar a relação microestrutura- propriedades, é interessante separar os materiais em estudo em duas famílias de aços ARBL do tipo API: a família de microestrutura ferrita- perlita (X42R e X42N) e a família de microestrutura composta por martensita revenida, bainita e carbonetos precipitados (X70Q). Assim, é possível afirmar que o tratamento térmico de têmpera/revenimento proporcionou um aumento

significativo do limite de escoamento e do limite e resistência do material, sem perda significativa de ductilidade. Este comportamento é consistente com a literatura [25-43], e pode ser explicado pelo fato de que os carbonetos precipitados na matriz de martensita revenida/ bainita e o vanádio na composição química favorecem o endurecimento por precipitação. Estes resultados reafirmam a possibilidade de se alcançar melhores propriedades mecânicas por meio da rota de fabricação de tubos de aço sem costura. O material de grau X70Q de microestrutura composta por martensita revenida, bainita e carbonetos precipitados destaca-se, neste contexto, uma vez que foi obtido a partir de uma composição química relativamente simples e com um tratamento térmico convencional. Para conseguir este mesmo grau em tubos de aço soldados, seria necessária a modificação da composição química e/ ou modificação de tratamentos térmicos convencionais [23]. Deste modo, haveria um aumento no custo do produto final. De modo distinto, analisando-se a família de aços ARBL do tipo API de microestrutura composta por ferrita-perlita, pode-se observar que, embora o refino de grão observado no aço normalizado quando comparado ao laminado promova o aumento da resistência mecânica, o tratamento térmico de normalização reduz o encruamento do material e, conseqüentemente, a sua resistência mecânica.

O micromecanismo de fratura predominante nos três estados adotados é o de fratura dúctil (conforme ilustrado na Figura 7 para o aço laminado), com nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades, independentemente da diferença nas propriedades mecânicas de tração.

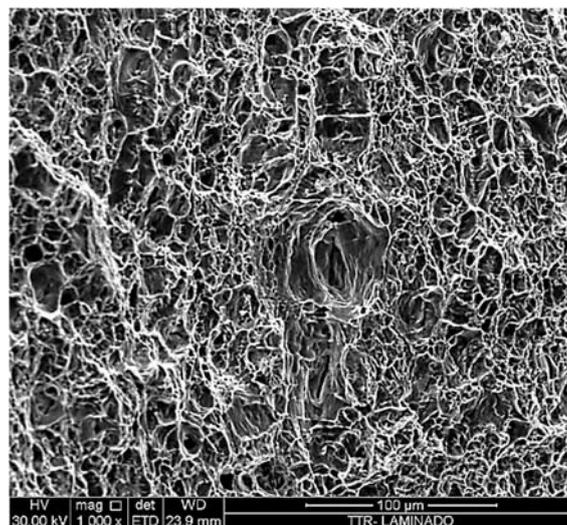


Figura 7. Alvéolos evidenciando a fratura dúctil. Aço laminado.

A Tabela 5 mostra os resultados do ensaio de dureza dos diferentes materiais. Observa-se que estes são consistentes com o efeito de cada tratamento térmico: no caso da normalização (X42N), que promove um alívio de tensão no material, este torna-se mais homogêneo e tem sua dureza reduzida; de outro modo, a têmpera/ revenimento (X70Q) visa aumentar a dureza e o limite de resistência à tração do material por meio da precipitação de partículas de segunda fase e da transformação martensítica. Comparando as Tabelas 4 e 5, é importante observar a coerência da relação direta tradicional entre resistência mecânica à tração e dureza para os aços.

**Tabela 5.** Dureza dos materiais estudados

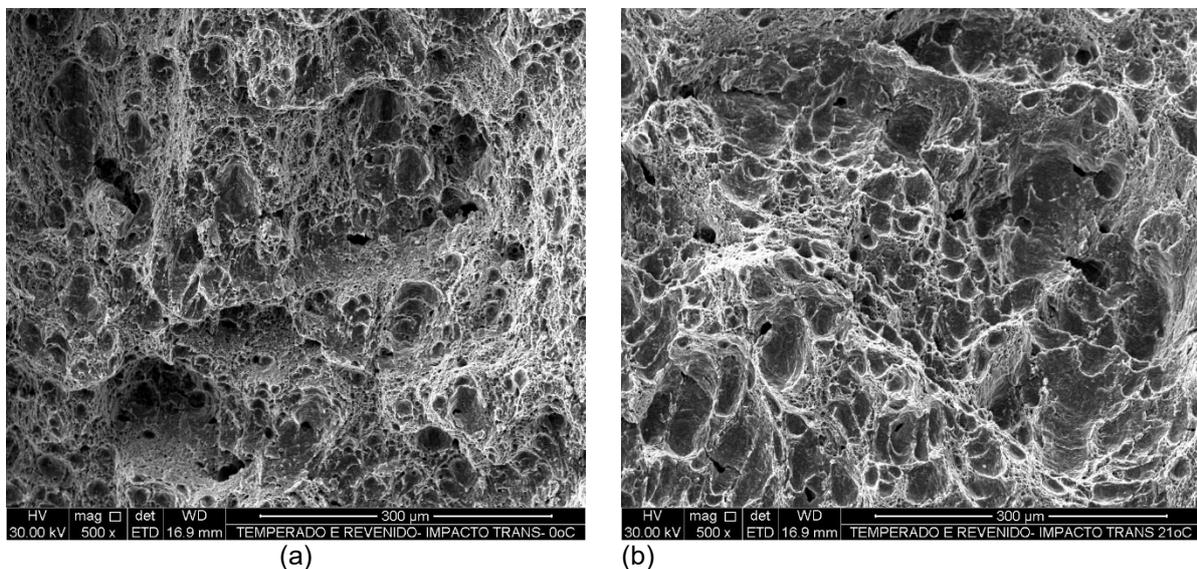
GRAU API 5L	HV
X42R	157 ± 2
X42N	146 ± 1
X70Q	208 ± 6

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos no ensaio de impacto para os três materiais estudados a 0°C e a 21°C. É interessante observar que o aço temperado/ revenido (X70Q) apresentou um melhor desempenho. Comparando as Tabelas 4 e 6, pode-se concluir que o aço de microestrutura composta por martensita revenida, bainita e carbonetos precipitados possui uma relação entre resistência mecânica e ductilidade capaz de garantir uma melhor tenacidade ao impacto [25-42]. Este comportamento pode ser confirmado pela análise fractográfica dos corpos de prova, uma vez que o aço X70Q apresenta fratura predominantemente dúctil (vide a presença de alvéolos na Figura 8, aço temperado/revenido) em ambas temperaturas.

**Tabela 6.** Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de impacto Charpy

GRAU	EA (J)		FD (%)	
	0°C	21°C	0°C	21°C
X42R	33 ± 3	50 ± 5	47 ± 7	68 ± 11
X42N	69 ± 2	76 ± 03	100 ± 0	100 ± 0
X70Q	80 ± 2	82 ± 5	100 ± 0	100 ± 0

EA = energia absorvida; FD = % de fratura dúctil



**Figura 8.** Fractografia de corpos de prova de impacto transversal exibindo alvéolos caracterizando a fratura dúctil: (a) a 0°C e (b) a 21°C. Aço temperado/revenido.

#### 4 CONCLUSÕES

Analisando-se as propriedades mecânicas de tração e impacto dos materiais após tratamentos térmicos, pode-se afirmar que em relação aos requisitos da norma API 5L para o nível de qualidade PSL2 os aços apenas laminado, normalizado e temperado/revenido mostraram-se eficazes para atenderem aos graus X42R, X42N e X70Q, respectivamente. Assim fica evidente que mesmo se tratando de um aço relativamente simples e de baixo custo é possível obter graus intermediários, via rota

de fabricação de tubos de aço sem costura, que têm propriedades mecânicas satisfatórias o suficiente para concorrerem na seleção de materiais do projeto estrutural de dutos com tubos de aço soldados de graus API 5L elevados, que possuem maior custo devido à sua composição química, processo de fabricação e tratamentos termomecânicos.

É importante ressaltar o quanto o aço microligado em estudo é sensível à relação microestrutura-propriedades, e as principais conclusões a este respeito estão listadas abaixo:

- Pode-se classificar os materiais após tratamentos térmicos em duas famílias distintas em termos microestruturais e de comportamento mecânico. São elas: a família de microestrutura composta por ferrita-perlita (X42R e X42N) e a de microestrutura composta por martensita revenida, bainita e carbonetos precipitados (X70Q).
- Em relação às propriedades mecânicas de tração pode-se afirmar que:
  - i. Quando comparado ao material laminado, pode-se afirmar que o tratamento térmico de normalização promoveu um alívio de tensões no material, melhorando sua ductilidade. O acréscimo que o refino de grãos promove no limite de escoamento do material normalizado, quando comparado ao material laminado, é contrabalançado pela redução neste que o tratamento térmico de normalização promove devido à redução no encruamento do material.
  - ii. O tratamento térmico de têmpera/revenimento promoveu um aumento significativo no limite de escoamento e no limite de resistência do material, embora houve uma pequena perda de ductilidade, como mostrou o alongamento percentual.
  - iii. O mecanismo de fratura em todos os materiais foi essencialmente dúctil, atestado pela presença de alvéolos.
- O material da família de microestrutura composta por martensita revenida, bainita e carbonetos precipitados (X70Q) possui maior dureza que os materiais da família de microestrutura composta por ferrita-perlita (X42R e X42N) devido ao fato de serem mais resistentes à deformação plástica (indentação).
- Em relação às propriedades mecânicas relativas ao ensaio de impacto Charpy pode-se afirmar que:
  - i O tratamento térmico de normalização e o de têmpera/revenimento promoveram uma melhoria na tenacidade ao entalhe dos materiais. Entretanto o material da família de microestrutura composta por martensita revenida, bainita e carbonetos precipitados (X70Q) apresenta maior capacidade de absorção de energia quando comparado aos materiais da família de microestrutura ferrita-perlita (X42R e X42N).
  - ii Para todos os materiais nas temperaturas de 0°C e 21°C (principalmente), o mecanismo de fratura foi essencialmente dúctil, caracterizado pela nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades (alvéolos).
- Em linhas gerais, o material X70Q possui propriedades mecânicas básicas significativamente superiores aos materiais X42R e X42N.

## Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos e à empresa Vallourec & Sumitomo Tubos do Brasil

(VSB) pela cessão do material, e aos funcionários do Laboratório Mecânico desta empresa pela colaboração em algumas etapas experimentais deste projeto.

## REFERÊNCIAS

- 1 Li L, Xu L. Designing with High-Strength Low-Alloy Steels. In: Handbook of Mechanical Alloy Design. Marcel Dekker, Inc.; 2004. p. 249-320.
- 2 Hillenbrand HG, Gräf M, Kalwa C. Development and production of high strength pipeline steels. In: Niobium Science & Technology. TMS; 2001. p. 543-569.
- 3 Gray JM. An independent view of linepipe and linepipe steel for high strength pipelines. In: API-X80 Pipeline Cost Workshop, ITI; 2002. p. 1-19.
- 4 Hillenbrand HG, Kalwa C. Production and service behavior of high strength large diameter pipe. In: International Conference on Application and Evaluation of High Grade Linepipes in Hostile Environments. EUROPIPE; 2002. p. 1-17.
- 5 Hillenbrand HG, Kalwa C. High strength line pipe for project cost reduction. World Pipelines. 2002; 2(1):1-10.
- 6 Kalwa C, Hillenbrand HG, Gräf M. High strength steel pipes – new developments and applications. In: Onshore Pipeline Conference. EUROPIPE; 2002. p. 1-12.
- 7 Gräf M, Hillenbrand HG, Heckmann CJ, Niederhoff KA. High-strength large-diameter pipe for long-distance high pressure gas pipelines. In: 13th International Offshore and Polar Engineering Conference. EUROPIPE; 2003, pp. 97-104.
- 8 Taiss EJM. O Mercado de Aços de Elevado Valor Agregado – Tendências Tecnológicas e a estratégia da Usiminas no Atendimento às Demandas. In: Workshop: Inovações para Desenvolvimento de Aços de Alto Valor Agregado - Tubos de Alta Resistência para Aplicações Estruturais e Transmissão de Fluídos. ABM; 2007. CD-ROM.
- 9 Siciliano F, Stalheim DG, Gray MJ. Modern High Strength Steels for Oil and Gas Transmission Pipelines. In: 7th International Pipeline Conference. TMS; 2008.
- 10 Gray MJ, Siciliano F. High Strength Microalloyed Linepipe: Half a Century of Evolution. In: Microalloyed Steel Institute, USA, 2009. p. 20-45.
- 11 Barbaro F, Fletcher L, Dinnis C, Piper J, Gray JM. Design and specification of line pipe and line pipe steels for weldability, constructability and integrity. In: 18th JTM on Pipeline Research. PRCI/AFIA/EPRG; 2011. p. 1-21.
- 12 American Petroleum Institute: Specification for Line Pipe. ANSI/API Specification 5L, Forty-Four Edition, 2008.
- 13 Godefroid L B, Cândido L C, Toffolo R, Barbosa L H. Microstructure and mechanical properties of two API steels for iron ore pipelines. Materials Research – Ibero-American Journal. 2014; 14:114-120.
- 14 Toffolo RB, Cândido LC, Godefroid LB, Mattioli R. Fracture behavior of two API steels used in iron ore pipelines. In: IX Brazilian MRS Meeting. Brazilian Materials Research Society - SBPMAT; 2009.
- 15 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM E112: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 2012, EUA.
- 16 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM E1268- 01: Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures. 2007, EUA.
- 17 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. 2012, EUA.
- 18 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2013, EUA.
- 19 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM E384: Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. 2011, EUA.
- 20 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM E23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 2012, EUA.

- 21 Thompson SW, Howell PR. Factors influencing ferrite/pearlite banding and origin of large pearlite nodules in a hypoeutectoid plate steel. *Mater. Sci. Technol.* 1992; 8:777-784.
- 22 Krauss G. Solidification, segregation and banding in carbon and alloy steels. *Metall. Mater. Trans.* 2003; 34B:781-792.
- 23 AMERICAN SOCIETY FOR METAL. High-strength structural and high-strength low-alloy steels. In: *ASM Handbook, vol. 01: Properties and Selection*. 10ª. Ed. Metals Park: Ohio, ASM, 1990, p. 389-423.
- 24 AMERICAN SOCIETY FOR METAL. Microstructures and Properties. In: *ASM Handbook, vol. 19: Fatigue and Fracture*. Metals Park: Ohio, ASM International, 1996.
- 25 Taira T, Yamaguchi T, Iwasaki N, Tsukada K. Development of heavy wall X65 line pipes manufactured from quenched and tempered plates for low temperature service. *Mech. Work Process Steel Conformation*, 1976; 18: 52-86.
- 26 Shehata, M. T., Boyd, J. D. Quantitative correlations between toughness and microstructure for commercial line pipe steel. In: SHEHATA, M. T. & BOYD, J. D. *Physical Metallurgy Research Laboratories*. Canada. Centre for Mineral and Energy Technology, 1981. p. 229-236.
- 27 Zhao M.C., Yang K., Shan Y.Y. The effects of thermo-mechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel. *Mater. Sci. Engng. A.* 2002; 335:14-20.
- 28 Zhao M.C., Yang K., Shan Y.Y. Comparison on strength and toughness behaviors of microalloyed pipeline steels with acicular ferrite and ultrafine ferrite. *Mater. Letters.* 2003; 57:1496-1500.
- 29 Xiao F., Liao B., Ren D., Shan Y., Yang K. Acicular ferritic microstructure of a low-carbon Mn-Mo-Nb microalloyed pipeline steel. *Mater. Charact.* 2005; 54:305-314.
- 30 Stalheim D.G., Barnes K.R., McCutcheon D.B. Alloy Designs for High Strength Oil and Gas Transmission Linepipe Steels. In: *International Symposium Microalloyed Steels for the Oil and Gas Industry*. CBMM/TMS; 2006. CD-ROM.
- 31 Xiao F.R., Liao B, Shan Y.Y., Qiao G.Y., Zhong Y., Zhang C., Yang K. Challenge of mechanical properties of an acicular ferrite pipeline steel. *Mater. Sci. Engng. A.* 2006; 431:41-52.
- 32 Shanmungam S., Misra RDK, Hartmann J, Jansto SG. Microstructure of high strength niobium-containing pipeline steel. *Mater. Sci. Engng. A.* 2006; 441:215-229.
- 33 Shin, S.Y., Hwang, B., Kim, S., Lee, S. Fracture toughness analysis in transition temperature region of API X70 pipeline steels. *Mater. Sci. Engng. A.* 2006; 429; 196-204.
- 34 Shin, S.Y., Hwang, B., Lee, S., Kim, N.J., Ahn, S.S. Correlation of microstructure and charpy impact properties in API X70 and X80 line-pipe steels. *Mater. Sci. Engng. A.* 2007; 458; 281-289.
- 35 Bai, D., Collins, F., Hamad, F., Chen, X., Klein, R. Microstructure and Mechanical Properties of High Strength Linepipe Steels. *MS&T 2007 AIST/ASM Congress*, Detroit, USA; 2007; 355-366.
- 36 Shanmugam S., Ramiseti N.K., Misra N.D.K., Hartmann J., Jansto S.G. Microstructure and high strength-toughness combination of a new 700MPa Nb-microalloyed pipeline steel. *Mater. Sci. Engng. A.* 2008; 478:26-37.
- 37 Wang W., Shan Y., Yang K. Study of high strength pipeline steels with different microstructures. *Mater. Sci. Engng. A.* 2009; 502:38-44.
- 38 Shin S.Y., Woo K.J., Hwang B., Kim S., Lee S. Fracture-toughness analysis in transition-temperature region of three API X70 and X80 pipeline steels. *Metall. Mater. Trans.* 2009; 40A:867-876.
- 39 Wang W., Yan W., Zhu L., Hu P., Shan Y., Yang K. Relation among rolling parameters, microstructures and mechanical properties in a acicular ferrite pipeline steel. *Mater. Design.* 2009; 30:3436-3443.
- 40 Smirnov, M.A., Pyshmintsev, I.Y., Maltseva, A.N., Mushina, O.V. Effect of ferrite-bainite structure on the properties of high-strength pipe steel. *Metallurgist*, 2012; 56; 43-51.

- 41 El-Danaf, E., Baig, M., Almajid, A., Alshalfan, W., Al-Mojil, M. Al-Shahrani, S. Mechanical, microstructure and texture characterization of API X65 steel. *Materials and Design*, 2013; 47; 529-538.
- 42 Sami, Z., Tahar, S., Mohamed, H. Microstructure and Charpy impact properties of ferrite-martensite dual phase API X70 linepipe steel. *Mater. Sci. Engng. A*. 2014; 508:338-342.
- 43 Rodrigues, E.M., Matias, A., Godefroid, L.B., Bastian, F.L., Al-Rubaie, K.S. Fatigue crack growth resistance and crack closure behavior in two aluminum alloys for aeronautical applications. *Materials Research – Ibero-American Journal*. 2005; 8:287-291.