

AValiação DA TENACIDADE DE Aço DE ELEVADA RESISTÊNCIA MECÂNICA POR ENSAIO DE DWTT*

Arlindo Lopes Faria¹
Odair José dos Santos²
Ricardo Miranda Alé³
Paulo José Modenesi⁴

Resumo

O *Drop Weight Tear Test* (DWTT) é comumente empregado para avaliar a capacidade de um material impedir a propagação de fratura frágil na temperatura de projeto. Esse ensaio quando aplicado a aços modernos de elevada tenacidade, produzidos via resfriamento acelerado, para aplicação em dutos, pode não exibir o mesmo comportamento à fratura dos aços convencionais, por apresentar um tipo de fratura anormal, denominada fratura inversa. Esse tipo de fratura, por sua vez, invalida os resultados de DWTT segundo os critérios estabelecidos pela API RP 5L3. Neste trabalho, são apresentados os resultados obtidos em ensaio de DWTT, utilizando corpos de prova *full-size* e *sub-size*, de um aço de elevada tenacidade, produzido com distintas condições de processamento termomecânicas evidenciando o fenômeno de fratura inversa. De uma forma geral, observou-se uma correlação entre os resultados de DWTT e as propriedades mecânicas em tração. Os testes também apontaram que a geometria do corpo-de-prova (*full-size* ou *sub-size*) possui uma influência direta no resultado do ensaio de DWTT.

Palavras-chave: DWTT; Fratura inversa; Aço de elevada tenacidade; API RP 5L3

EVALUATION OF TOUGHNESS IN PLATES STEEL OF HIGH STRENGTH BY DWTT TESTING

Abstract

Drop Weight Tear Test (DWTT) is commonly used to determine the material ability to arrest brittle fracture at the design temperature. Modern steels with high toughness, produced by accelerated cooling for applications in linepipes not always exhibit the same fracture behavior of conventional steels when submitted to this test. However, this fracture type invalidates the results of DWTT according to criteria established by API RP 5L3. In the present study, DWTT in full-size and a sub-size specimens were conducted on a high toughness steel, produced with different thermomechanical processing conditions, and the inverse fracture occurring in the hammer-impacted region was evaluated. In a general manner, a correlation between DWTT results and tensile mechanical properties was observed. The tests also show that the geometry of the specimen (full-size or sub-size) has a direct influence on DWTT results.

Keywords: DWTT; Inverse fracture; High-toughness pipeline steel; API RP 5L3.

¹ Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Assistência Técnica, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.
² Engenheiro Metalurgista, M.Sc., D.Sc., Pesquisador Especialista, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.
³ Engenheiro Metalurgista, M.Sc., D.Sc., Especialista de Produto, USIMINAS, Belo Horizonte, MG
⁴ Engenheiro Metalurgista, M.Sc., PhD., Dep. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O *Drop Weight Tear Test* (DWTT) é um método de avaliação da tenacidade empregado para assegurar que o aço usado na fabricação de tubos não esteja sujeito à propagação de fratura frágil quando em serviço, ou seja, caso ocorra uma fratura à temperatura mínima de operação, ela se propagará de modo dúctil [1].

No entanto, tem sido verificado que aços modernos para dutos, produzidos via laminação controlada seguida de resfriamento acelerado, que exibem elevadas resistência mecânica e tenacidade em ensaios de impacto Charpy (entre 200 e 350 J no patamar superior) e, especialmente, espessuras acima de 25 mm, podem não apresentar o mesmo comportamento à fratura que os aços convencionais, quando submetidos ao DWTT [2-4]. Estes aços podem exibir fraturas anormais, denominadas de fratura inversa (figura 1), caracterizadas por uma alteração no modo de propagação da trinca. Esse tipo de fratura invalida os resultados do ensaio, que, segundo a especificação de teste API RP 5L3 [2], somente são considerados válidos corpos de prova (CPs) que:

- exibam iniciação e propagação completamente frágil;
- exibam iniciação e propagação completamente dúctil;
- exibam uma fratura frágil na sua iniciação (junto ao entalhe) e posteriormente uma propagação dúctil.

Assim, observa-se que os critérios de aceitação da API RP 5L3 parecem ser insuficientes para muitos tipos de aço modernos usados para dutos de transporte devido ao fenômeno de fratura inversa que ocorre no DWTT desses aços.

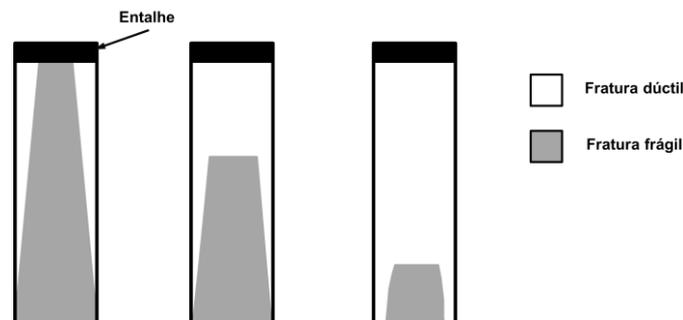


Figura 1. Superfícies de fratura de CP de DWTT contendo fratura inversa [4].

A fratura inversa pode ser atribuída à elevada energia necessária para a iniciação da fratura, com conseqüente encruamento na região de impacto do martelo, no lado oposto ao do entalhe, gerando redução na ductilidade nessa região [5].

Tendo em vista a perda de tenacidade devido ao encruamento, a fratura na região oposta ao entalhe ocorre por clivagem, mesmo que tenha se propagado até essa região de forma dúctil. Este efeito se agrava em materiais de maior tenacidade, expresso pela maior energia absorvida em ensaio de impacto Charpy, e maior espessura [6].

Para contornar o problema de fratura inversa, a especificação API RP 5L3 sugere a adoção de um CP preparado com entalhe do tipo *chevron*. Devido à geometria desse entalhe, a energia de iniciação da fratura é diminuída, favorecendo a iniciação da fratura frágil. Entretanto, essa medida não é suficiente para evitar a fratura inversa, tendendo também a provocar maior dispersão nos resultados.

Uma outra alternativa, apontada na literatura, é realizar os ensaios com CPs *sub-size*. Nessa condição, a extensão do encruamento do aço, na região de impacto do martelo, não é tão grande quanto àquela observada nos CPs *full-size*, o que tende a

reproduzir um teste DWTT com resultados geralmente mais satisfatórios que aqueles conduzidos em CPs *full-size* [6].

Atualmente, não existe um consenso sobre a aceitação ou não da ocorrência de fratura inversa. Algumas empresas seguem os critérios da API RP 5L3, invalidando os testes que a apresentem e, como medida corretiva, utilizam o entalhe *chevron* em substituição ao prensado. Outras simplesmente monitoram a percentagem de área cisalhada, independentemente da ocorrência de fratura inversa, tolerando-a [4].

Neste trabalho, avaliou-se a tenacidade de um aço quando submetido a diferentes condições de processamento termomecânico, utilizando o ensaio DWTT. A influência da espessura do CP, na obtenção de resultados válidos, foi avaliada com base na comparação de resultados de testes realizados com amostras preparadas na condição *full-size* e *sub-size*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Fabricação e Processamento do Aço

Para o processamento do aço, cuja composição química é apresentada na tabela 1, foram selecionadas quatro placas, produzidas em escala industrial pela Usiminas, na Aciaria da Usina Intendente Câmara, em Ipatinga.

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

C	Mn	Si	P	S	Al	Nb+V+Ti	Cu+Ni+Cr+Mo	Pcm ⁽¹⁾
0,021	1,22	0,27	0,008	0,001	0,033	≤ 0,070	≤ 0,60	0,13

$$Pcm = C + Si/30 + (Mn+Cr+Cu)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B \quad (1)$$

As quatro placas de aço foram processadas na Laminação de Chapas Grossas da Usiminas, em Ipatinga, empregando-se a técnica de laminação controlada seguida de resfriamento acelerado. Na etapa de laminação de desbaste, a redução foi de aproximadamente 40% em relação à espessura inicial da placa, com toda a deformação ocorrendo em temperaturas superiores à temperatura de não recristalização, T_{nr} , de forma que ocorresse uma completa e homogênea recristalização da austenita.

Na laminação de acabamento, abaixo da T_{nr} , cuja deformação total aplicada foi superior a 70%, foram adotadas duas temperaturas finais de laminação de acabamento. Para cada condição de processamento na laminação de acabamento, foram empregadas duas estratégias distintas de resfriamento acelerado. A espessura nominal das chapas, após laminação, foi de 32,45 mm. O objetivo desta laminação diferenciada foi obter quatro estratégias de laminação e correlacioná-las com as propriedades mecânicas e microestruturais obtidas e os resultados do ensaio DWTT. Por conveniência, as chapas grossas foram nomeadas como CG1, CG2, CG3 e CG4. Na tabela 2 são apresentados os parâmetros de laminação controlada e resfriamento acelerado.

Tabela 2. Parâmetros de resfriamento acelerado

Chapa	Temperatura de acabamento (°C)	Temperatura final de resfriamento (°C)	Taxa de resfriamento (°C/s)
CG1	A _{r3} + 100	M _s – 65	>20
CG2		M _s – 20	
CG3	A _{r3} + 50	M _s – 65	
CG4		M _s – 20	

2.2 Ensaios e Análises

As chapas foram avaliadas em termos de composição química e propriedades mecânicas (ensaio de tração, dureza, impacto Charpy e DWTT) de acordo com a norma API 5L [7]. A microestrutura foi analisada por microscopia eletrônica de varredura.

O DWTT foi realizado em conformidade com a especificação API RP 5L3 em uma máquina de teste com capacidade de 100 kJ. Para cada uma das quatro chapas utilizadas, referentes a cada condição de processamento termomecânico, foram retirados seis conjuntos de CPs, sendo três na condição *full-size* e três na condição *sub-size*, empregando entalhe prensado em todos eles. Os ensaios dos CPs *full-size* foram efetuados às temperaturas de -60°C, -40°C e -20°C. Para os CPs *sub-size*, os valores de temperatura de ensaio foram reduzidos em 17°C em relação às temperaturas empregadas nos ensaios dos CPs *full-size*, conforme os requisitos estabelecidos na especificação API RP 5L3.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Microestrutural

Independentemente da condição de resfriamento empregada, as microestruturas das chapas foram muito similares entre si, formadas predominantemente por ferrita. Na figura 2, são mostrados os aspectos da microestrutura a ¼ e no centro da espessura de uma das chapas.

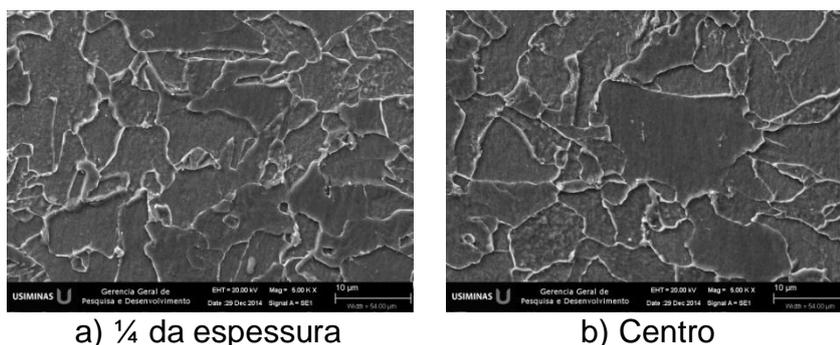


Figura 2. Aspectos da microestrutura de uma das chapas avaliadas. Ataque nital 4%. Aumento: 5000x.

Pode-se evidenciar na figura 2 que alguns grãos de ferrita exibiram contornos com aspecto irregular e ondulado. Por estas características, esses grãos podem ser classificados como ferrita massiva ou do tipo quasi-poligonal [8]. Este tipo de ferrita ocorre em aços com teores muito baixos de carbono, quando submetidos a taxas moderadamente elevadas de resfriamento.

Juntamente com a ferrita massiva, a microestrutura do aço apresentou uma considerável fração de ferrita do tipo poligonal. Essa afirmativa é baseada no fato de que as curvas de tração das chapas exibiram patamar de escoamento bem definido. A ocorrência do patamar nas curvas de tração é um indicativo da presença de ferrita poligonal, já que a ferrita massiva, por ser uma estrutura com elevada densidade de discordâncias, não favorece a tal fenômeno [9].

3.2 Propriedades Mecânicas

Os resultados de ensaio de tração e dureza, obtidos nas quatro chapas, são mostrados na tabela 3. Pode-se verificar que, de forma geral, não foram observadas variações significativas destas propriedades para as distintas condições de processamento utilizadas, durante laminação e resfriamento.

Tabela 3. Propriedades mecânicas das chapas CG1, CG2, CG3 e CG4.

Propriedade	n	CG1		CG2		CG3		CG4	
		\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
LE (MPa)	4	451,0	4,2	460,8	2,5	476,8	3,6	458,5	7,0
LR (MPa)	4	509,8	1,7	507,0	0,8	506,5	1,0	496,3	1,7
Razão Elástica	4	88,5	0,7	90,9	0,6	94,1	0,5	92,4	1,3
Along. (%) BM=2"	4	68,8	1,0	68,8	1,0	69,1	0,5	69,3	0,0
Dureza (HV ₁₀)	9	162,5	4,5	160,4	3,2	162,2	3,3	158,1	4,7

3.3. Ensaio de Impacto Charpy

Independentemente da temperatura, para todas as condições testadas, os valores de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy foram superiores a 400 J, valores esses muito mais elevados que o mínimo usualmente especificado para tubos destinados a projetos de gasodutos marítimos, figura 3. Além disso, todos os CPs apresentaram 100% de fratura dúctil. A temperatura de transição de fratura dúctil-frágil obtida, independentemente do critério utilizado, foi extremamente baixa, apresentando um valor inferior à menor temperatura de teste avaliada, isto é, abaixo de -130°C. Esses resultados indicam uma alta tenacidade das chapas, evidenciando também que as variações no seu processamento não influenciaram essa propriedade de forma significativa para as condições testadas.

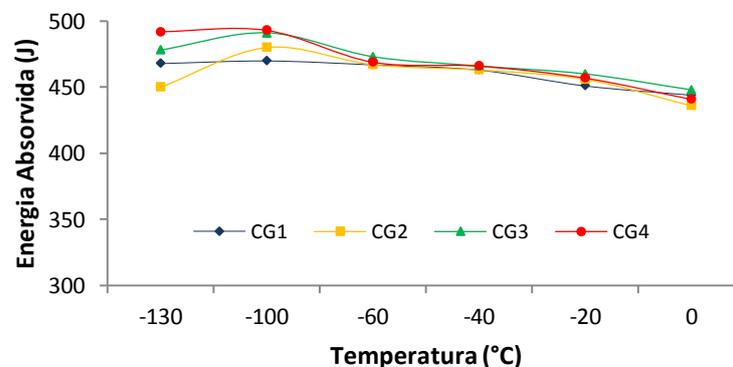


Figura 3. Curvas de transição dos valores de energia absorvida e de percentual de fratura dúctil em relação à temperatura do teste de impacto Charpy

De acordo com a literatura, os aços modernos, destinados a aplicações *linepipe*, processados com o emprego de resfriamento acelerado após laminação controlada, normalmente atingem pelo menos 271J no patamar superior. Além disso, esses aços são geralmente mais espessos devido à tendência de elevadas pressões de operação em dutos. Como será discutida posteriormente, essa combinação de tenacidade e espessura mais elevadas podem gerar problemas na avaliação da sua tenacidade por DWTT [10].

3.4 Ensaio DWTT

Os resultados obtidos nos ensaios DWTT estão mostrados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Aspecto da fratura, fração de área dúctil dos CPs de DWTT *full-size* das chapas a diferentes temperaturas de ensaio

ID	Temp. do teste (°C)	Aspecto predominante da fratura		% de Fratura Dúctil		
		CP1	CP2	CP1	CP2	Média
CG1	-60	CP não rompido	Frágil	-	6	-
	-40	CP não rompido	CP não rompido	-	-	-
	-20	CP não rompido	CP não rompido	-	-	-
CG2	-60	Frágil	CP não rompido	10	-	-
	-40	CP não rompido	CP não rompido	-	-	-
	-20	CP não rompido	CP não rompido	-	-	-
CG3	-60	Inversa	Inversa	81	78	80
	-40	Inversa	Inversa	84	83	84
	-20	Dúctil	Dúctil	100	100	100
CG4	-60	Inversa	Frágil	90	48	69
	-40	CP não rompido	Inversa	-	93	-
	-20	Dúctil	CP não rompido	100	-	-

Tabela 5. Aspecto da fratura, fração de área dúctil dos CPs de DWTT *sub-size* das chapas a diferentes temperaturas de ensaio

ID	Temp. do teste (°C)	Aspecto predominante da fratura		% de Fratura Dúctil		
		CP1	CP2	CP1	CP2	Média
CG1	-77	Inversa	Inversa	17	28	23
	-57	Inversa	Dúctil	80	100	90
	-37	Dúctil	Dúctil	100	100	100
CG2	-77	Inversa	Inversa	38	34	36
	-57	Dúctil	Dúctil	100	100	100
	-37	Dúctil	Dúctil	100	100	100
CG3	-77	Frágil	Inversa	76	86	81
	-57	Dúctil	Dúctil	100	100	100
	-37	Dúctil	Dúctil	100	100	100
CG4	-77	Inversa	Dúctil	80	100	90
	-57	Inversa	Inversa	82	80	81
	-37	Dúctil	Dúctil	100	100	100

3.4.1 Critérios de avaliação e análise dos resultados do DWTT

De acordo com a especificação API RP 5L3, no DWTT, o conjunto de dois CPs que constituem cada teste, devem ser fraturados, com rompimento completo. A grande maioria das especificações de tubos para gasodutos requer a aprovação do teste, quando a média da área de fratura dúctil do conjunto é maior ou igual a 85%, não podendo cada CP exibir menos que 75% de fratura dúctil. No contexto do presente estudo, os CPs não rompidos foram considerados inválidos e os que apresentaram fratura inversa não foram descartados, apesar de também serem considerados inválidos pela referida especificação. Nas figuras 4 e 5 são apresentadas os aspectos das fraturas obtidas após os ensaios.



Figura 4. Aspecto das fraturas obtidas no DWTT com CP *full-size*: a) CP não se rompeu completamente; b) fratura completamente dúctil; c) fratura inversa; d) fratura dúctil e frágil e, e) fratura completamente frágil.

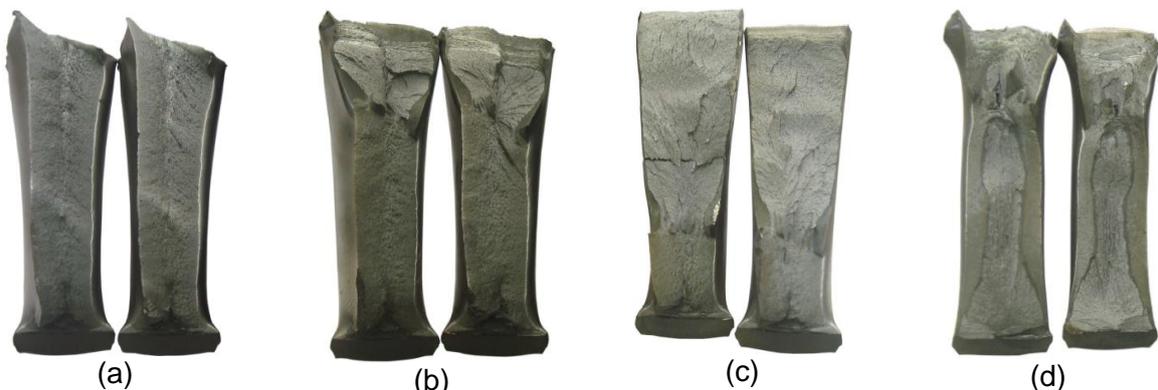


Figura 5. Aspecto das fraturas obtidas nos ensaios de DWTT com CP *sub-size*: a) fratura completamente dúctil; b) e c) fratura inversa e, d) fratura dúctil e frágil.

Para os CPs que exibiram fratura inversa, o valor da área dúctil foi medido considerando a fração de fratura inversa como sendo fração frágil da área de medição.

Nos testes realizados com CPs *full-size*, verificou-se que cerca de metade deles não se rompeu por completo, com o impacto do martelo, o que demonstra uma elevada energia absorvida pelo material para a iniciação da fratura. Por outro lado, nos testes realizados em CPs *sub-size*, todos eles se romperam completamente, permitindo uma melhor avaliação dos resultados. Como era esperado, à medida que se reduziu a temperatura de ensaio, a área da superfície de fratura dúctil foi sendo reduzida, enquanto que as áreas de superfície de fraturas frágil e inversa aumentaram.

3.4.2 Correlação entre fratura inversa e propriedade mecânica em tração

A partir de análise de variância de fator único e nível de confiança de 95%, constatou-se que as médias de razão elástica entre as chapas avaliadas apresentaram diferenças significativas. Foi verificada uma tendência das chapas de menor razão elástica (CG1 e CG2) apresentarem uma maior área de fratura inversa no DWTT utilizando CPs *sub-size*, quando ensaiadas na temperatura mais baixa (-77°C). Esse resultado está de acordo com a literatura em geral, que associa a ocorrência de uma maior fração de fratura inversa a uma menor razão elástica do material no teste de tração [5]. A fração da área da fratura inversa eleva-se com o aumento do expoente de encruamento (n), uma vez que o encruamento, provocado pelo impacto do martelo, afeta negativamente a tenacidade nesta região do CP [11]. Materiais com elevado n geralmente apresentam baixas razões elásticas [5].

Dessa forma, de modo a reduzir a formação de fratura inversa, se faz necessário adotar práticas que minimizem o efeito de encruamento, provocado pelo impacto do martelo durante o ensaio de DWTT, sem que afete a resistência mecânica e a tenacidade do aço. Do ponto de vista prático, foi observado nesse trabalho que a redução da temperatura de acabamento, principalmente quando associada a uma temperatura mais baixa de final de resfriamento, favoreceu ao aumento da razão elástica e, conseqüentemente, à redução da área de fratura inversa no ensaio DWTT.

3.4.3 Correlação entre ensaios DWTT utilizando CPs *full-size* e *sub-size*

Os resultados apresentados nas tabelas 4 e 5 mostram que a espessura do CP possui uma influência significativa na obtenção de resultados válidos de acordo com a API RP 5L3. Para os CPs *full-size*, em função da grande quantidade de CPs não rompidos, não se verificou uma correlação direta dos resultados dos testes realizados com a redução da temperatura de ensaio. Já para os ensaios realizados em CPs *sub-size* essa relação foi verificada, possibilitando construir uma curva de transição dúctil-frágil (figura 6).

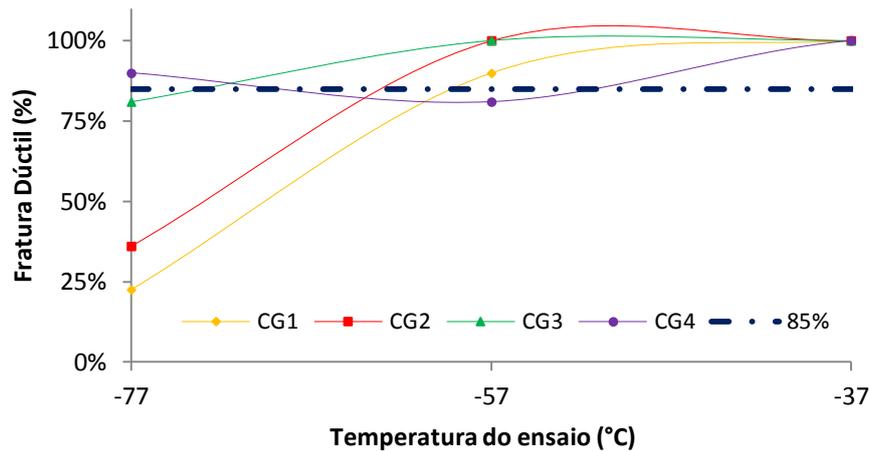


Figura 6. Curva de transição dúctil-frágil, obtida no DWTT com CPs *sub-size*.

Nos ensaios na condição *full-size*, à temperatura de -60°C , especificamente para as chapas de menor razão elástica, foi observada uma anomalia. Enquanto um dos CPs apresentou uma área de cisalhamento muito baixa (\leq que 10%), o outro não se rompeu completamente, fenômeno este, inclusive, relatado também por outros pesquisadores [12]. Esse efeito pode estar associado à maior quantidade de material à frente da trinca dos CPs *full-size*, favorecendo ao desenvolvimento de uma condição de deformação plana, que restringe o escoamento plástico da trinca, com conseqüente ocorrência de fratura frágil [13, 14].

Por outro lado, nos ensaios executados em CPs *sub-size*, à temperatura de -37°C , todos os resultados atenderam aos requisitos de validação da API RP 5L3 e apresentaram 100% de fratura dúctil. Como essa temperatura é usualmente especificada como requisito técnico para fornecimentos de chapas grossas, a realização do teste com CP reduzido se mostrou uma opção satisfatória a ser utilizada para avaliação de aços destinados à fabricação de tubos com exigência de DWTT. A -57°C , os testes realizados em CPs das condições CG2 e CG3 apresentaram uma superfície de fratura com aparência 100% dúctil. Embora o resultado do ensaio realizado na CG1 não satisfaça aos requerimentos da API RP 5L3, devido à presença de fratura inversa, os percentuais de fratura dúctil mínimo individual e médio foram iguais a 80 e 90%, respectivamente, isto é, dentro da faixa de aprovação comumente adotada pelas especificações de tubos. Já os ensaios realizados à temperatura de -77°C , em espessura reduzida, apresentaram, de uma forma geral, uma menor área de fratura dúctil, sobressaindo a fratura inversa, todavia com resultados bastante homogêneos. Apenas um dos CPs, retirado na chapa CG3, apresentou uma superfície de fratura com iniciação e propagação frágil (24% de fratura frágil da área avaliada), sendo que os demais ensaios apresentaram fratura inversa.

Apesar de a fratura inversa estar presente tanto em CPs *full-size*, quanto *sub-size*, nestes últimos percebe-se que a deformação plástica na região de impacto do martelo não é tão grande quanto à observada nos CPs *full-size*, sugerindo que a fratura inversa ocorre mais facilmente em CPs *full-size*, como já foi observado por Seokmin e colaboradores [13]. Dessa forma, pode-se concluir que o DWTT utilizando CPs *sub-size* exibem resultados mais representativos da tenacidade do material e que atendem melhor aos requisitos técnicos da especificação API RP 5L3 [6,13].

Os resultados encontrados concordam com Morozov e colaboradores [6], que mostraram que a redução do percentual de fratura dúctil em amostras de espessuras superiores a 25 mm é consequência puramente de um efeito provocado pelo equipamento de teste, sem relação direta com as propriedades mecânicas do material. Em um estudo envolvendo um aço da classe de resistência K65, de 27,7 mm de espessura, os autores evidenciaram, também, a influência da espessura do CP no resultado de DWTT. Neste estudo, os CPs *full-size* foram testados a -20°C, e os CPs *sub-size*, a -31°C. Para permitir a análise estatística dos resultados e a determinação de uma distribuição correspondente ao percentual de fratura dúctil obtida, para cada espessura, Morozov e colaboradores [6] realizaram testes em 100 amostras. Na Figura 7, são apresentadas as distribuições do percentual de fratura dúctil obtidas em CPs *full-size* e *sub-size*. Os autores verificaram que 17% dos resultados de CPs *full-size* e 90% dos resultados em CPs *sub-size* satisfazem às especificações técnicas, que, neste caso, consideraram ser de área de fratura dúctil mínima igual a 90% [6].

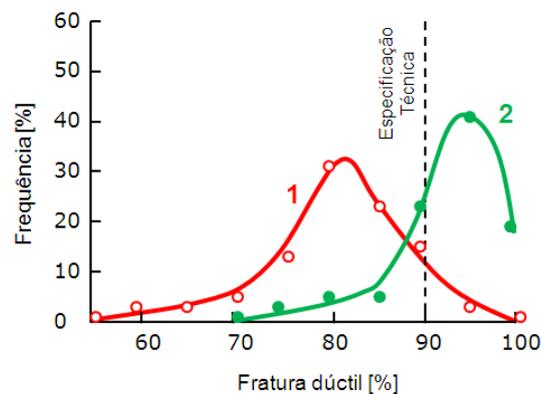


Figura 7. Distribuição do percentual de fratura dúctil de um aço K65, obtido em testes de DWTT em (1) amostras *full-size* (27,7 mm) e (2) amostras *sub-size* (19,0 mm) [6].

4 CONCLUSÃO

Verificou-se a existência de uma correlação das propriedades mecânicas em tração do aço com a ocorrência de fratura inversa. Desta forma, notou-se uma tendência das chapas de maior razão elástica apresentarem uma menor área de fratura inversa no DWTT utilizando CPs *sub-size*. Os maiores valores de razão elástica foram obtidos para as chapas processadas com temperatura de acabamento mais baixa, próxima a A_{r3} .

Os testes apontaram que a geometria do CP possui influência direta no resultado do DWTT. A utilização de CPs *sub-size* permite a obtenção de resultados mais representativos da tenacidade do material e de uma maior quantidade de resultados válidos, que atendem aos requisitos técnicos da especificação API RP 5L3.

Esses resultados permitem concluir que o processamento do material com uma temperatura de acabamento mais próxima de A_{r3} e a utilização de CPs *sub-size* contribuem para a obtenção, ao mesmo tempo, de melhores valores de tenacidade e resultados válidos no ensaio de DWTT.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece a Universidade Federal de Minas Gerais e ao CAPES-PROEX pelo apoio e orientação para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Wilkowski, G. M.; Maxey, W. A.; Eiber, R. J. Use of the DWTT Energy for Predicting Ductile Fracture Behavior in Controlled-Rolled Steel Line Pipes. *Canadian Metallurgical Quarterly*, p. 59-77. 1980.
- 2 API. Recommended Practice for Conducting Drop Weight Tear Tests on Line Pipe 5L3. API, 3rd Edition, 2014.
- 3 Hwang, B.; Lee, S.; Kim, Y. M.; Kim, N. J.; Yoo, J. Y.; Woo, C. S. Analysis of Abnormal Fracture Occurring During Drop-Weight Tear Test of High-Toughness Line-Pipe Steel. *Materials Science and Engineering A*. 368, 2004, p.18-27.
- 4 Fonzo, A.; Mannucci, G.; Gray, J. Prci Project MAT-8-1 Report - Developing Tools to Assure Safety against Propagating Cracks in Gas Pipelines made from Modern Steels with High Charpy Upper Shelf Energy. CSM Report nº 15978R. 2012.
- 5 Sung, H. K.; Sohn, S. S.; Shin, S. Y.; Lee, S.; Kim, N.J.; Chon S.H.; Yoo; J.Y. Effects of Finish Rolling Temperature on Inverse Fracture Occurring During Drop Weight Tear Test of API-X80-Pipeline Steels. *Materials Science and Engineering A*. 541, 2012, p.181-189.
- 6 Morozov, Y. D.; Pemov, I. F.; Goli-Oglu, E. A.; Lyuchkov, A. D.; Kornilov, V. L.; Efremova, M. V. Optimizing Drop Tests of High Ductility Pipe Steel. *SSN 0967_0912, Steel in Translation*, Vol. 42, No. 2, p. 196–199. 2012.
- 7 API - Specification for line pipe, ANSI/API Spec 5L, 45ª Edition, 2012.
- 8 Thompson, S. W.; Krauss, G.; Ferritic Microstructures in Continuously Cooled Low and Ultralow Carbon Steels. *ISIJ International*, v.35, n.8, p. 937-945, 1995.
- 9 Roberts, M. J. Effect of Transformation Substructure on the Strength and Toughness of Fe-Mn Alloys. *Metallurgical Transactions* 1(12): 3287–3294.
- 10 Eiber, R. Drop-weight tear test application to natural gas pipeline fracture. *The Journal of Pipeline Engineering*, p. 175-182, Vol.12, No.3, Setembro/2013.
- 11 Hwang, B.; Kim, Y. G.; Lee, S.; Kim, N. J.; Yoo, J. Y. Effects Of Microstructure on Inverse Fracture Occurring during Drop-Weight Tear Testing of High-Toughness X70 Pipeline Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36A, p. 371–387.
- 12 Wilkowsky, G.; Shim, D. J.; Hioe, Y.; Kalyanam, S.; Brust, F. Old Versus New Low-Grade Linepipe Steels – How Their Fracture Properties Differ. *Pipelines International*. Issue 17. Engineering Mechanics Corporation of Columbus, Columbus, OH, USA. Setembro 2013
- 13 Seokmin, H.; Sang, Y. S.; Sunghak L.; Nack J. K. Effects of Specimen Thickness and Notch Shape on Fracture Modes in the Drop Weight Tear Test of API X70 and X80 Linepipe Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2011, Volume 42, No 9, p. 2619.
- 14 Guo, W.; Dong, H.; Lu, M.; Zhao, X. The Coupled Effects of Thickness and Delamination on Cracking Resistance of X70 Pipeline Steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 79. 2002, p. 403–412.