



# CRITÉRIOS PARA INTERRUPTÃO DE FRATURAS PROPAGANTES DÚCTEIS EM DUTOS DE TRANSPORTE DE CO<sub>2</sub><sup>1</sup>

Pedro da Silva Craidy<sup>2</sup>  
Eduardo Hippert Junior<sup>3</sup>

## Resumo

A instalação de sistemas que utilizam CO<sub>2</sub> para captura e armazenamento de carbono e recuperação avançada de petróleo exige o transporte em dutos de grandes quantidades de CO<sub>2</sub> em estado supercrítico. Nesses sistemas, há possibilidade de ocorrência de fratura propagante dúctil, uma questão importante a ser considerada em projeto. Diante da pouca experiência no mundo em transporte de CO<sub>2</sub> supercrítico, a compreensão dos procedimentos de determinação dos requisitos mínimos de tenacidade para os materiais dos dutos é fundamental para seu projeto e operação seguros. São revisados os principais procedimentos de determinação destes requisitos. O método Battelle das duas curvas é o modelo mais utilizado. Este método tem limitações quanto à consideração imprecisa de aspectos específicos da descompressão de CO<sub>2</sub> supercrítico, dos efeitos de contaminantes nas correntes transportadas, de particularidades de dutos submarinos e de aços de elevada tenacidade. Outros métodos incluem, p.ex. a qualificação através de testes de rompimento em escala real. Para aços de maior tenacidade, o uso da energia Charpy não se apresenta um parâmetro confiável, tendo-se proposto o uso de ensaios DWTT e a expressão da tenacidade em termos de tenacidade à fratura ou medidas de abertura de trinca. Tendo em vista a aplicação em dutos de CO<sub>2</sub> supercrítico, as características dos procedimentos existentes são analisadas comparativamente, evidenciando-se as informações faltantes que devem ser futuramente obtidas.

**Palavras-chave:** CCS; EOR; Transporte de CO<sub>2</sub>; Fratura propagante.

## CRITERIA FOR ARREST OF DUCTILE PROPAGATING FRACTURES IN CARBON DIOXIDE PIPELINES

### Abstract

Carbon capture and storage and EOR systems may demand pipeline transportation of supercritical CO<sub>2</sub> for long distances. On these systems, ductile propagating fractures may occur, and this issue must be considered in the design of the pipelines. Because of the little experience in the world on supercritical CO<sub>2</sub> transportation, understanding of the procedures for determination of minimum toughness for fracture arrest is indispensable for safe design and operation. The most important procedures are reviewed. The Battelle two-curve method is the most used model. This method has limitations regarding the imprecise consideration of specific aspects of supercritical CO<sub>2</sub> depressurization, the effects of impurities in the transported streams properties, the particularities of subsea pipelines and the behavior of higher strength and toughness steels. Other existing methods include, for instance, qualification through real-size burst tests. For higher toughness materials, Charpy energy is not a reliable parameter for crack arrest, and the use of other parameters have been proposed, as drop weight tear energy or crack-tip opening angle. The characteristics of these procedures are comparatively analyzed, and the lacking information of the models is evidenced.

**Keywords:** CCS, EOR, CO<sub>2</sub> transportation, propagating fracture.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2010, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro de Materiais (Petrobras S.A.)

<sup>3</sup> Dr.Sc., Engenheiro de Materiais (Petrobras S.A.)

## 1 INTRODUÇÃO

De modo a minimizar as implicações geradas pelas mudanças climáticas, a necessidade de redução das emissões de gases do efeito estufa é atualmente consensual. Uma das tecnologias propostas para reduzir as emissões de dióxido de carbono para a atmosfera é capturar o CO<sub>2</sub> e armazená-lo em cavernas geológicas. Outra alternativa é utilizá-lo para recuperação avançada de petróleo (EOR – *Enhanced Oil Recovery*), injetando o gás em poços produtores de petróleo.

Por razões econômicas e operacionais, o CO<sub>2</sub> para injeção deve ser transportado em dutos, chamados carodutos, por longas distâncias como fluido no estado supercrítico ou em fase densa\*. Elevadas pressões mínimas de operação são necessárias para manutenção da corrente de CO<sub>2</sub> em fase densa ou supercrítica. Para os dutos de CO<sub>2</sub> de elevada pureza em operação no mundo (%CO<sub>2</sub> >95%), a faixa de pressão e temperatura operacionais está situada tipicamente entre 86,19bar (1.250 psi), 4°C e 153,0bar (2.220psi), 38°C.<sup>(1)</sup>

Quando linhas transportando CO<sub>2</sub> nestas condições rompem-se, as propriedades do fluido impedem a descompressão da linha, promovendo a ocorrência de fraturas dúcteis propagantes. Considerando que CO<sub>2</sub> em concentrações >10%v é provável que seja instantaneamente fatal (nessas condições o gás CO<sub>2</sub> é asfíxiante), a ruptura de linhas de CO<sub>2</sub> próximo a áreas habitadas pode ter consequências catastróficas.<sup>(2)</sup>

Denominam-se “fraturas propagantes” as fraturas de rápida propagação axial que podem ocorrer em grandes comprimentos em linhas pressurizadas. Para um material frágil, a velocidade de propagação da trinca é próxima à velocidade do som no metal (5.100 m/s); diminuindo com a elevação da ductilidade do material, em virtude da absorção de energia, para valores típicos entre 200 m/s a 300 m/s<sup>(3,4)</sup>

A possibilidade de ocorrência destas fraturas em carodutos foi identificada inicialmente no final dos anos 1970.<sup>(5)</sup>

Após a iniciação da trinca, em geral resultado de dano mecânico ou corrosão, e a mesma ter se tornado passante, o desenvolvimento posterior do processo envolve a competição entre duas velocidades: a velocidade da frente de alívio da pressão do fluido em descompressão e a velocidade de propagação da trinca no material do tubo (Figura 1). Se a velocidade da frente de descompressão é maior que a velocidade de propagação da trinca, há redução das tensões da ponta do defeito. Senão, a pressão interna é mantida elevada na região da ponta da trinca, e a mesma poderá propagar ao longo do duto

As velocidades da propagação da fratura e da onda de descompressão são dependentes das propriedades e do escoamento do fluido, das dimensões do duto e de suas propriedades mecânicas e das interações com o meio externo (solo, água ou ar). A influência e as interações entre estes parâmetros são complexas e não-lineares.

Para minimizar o risco de ocorrência desse modo de falha, algumas alternativas têm sido adotadas. Dentre elas, destacam-se a redução da probabilidade de iniciação da fratura (p.ex. reduzindo a corrosividade do fluido transportado), o emprego de *crack arrestors* (p.ex. trechos de parede espessa) e, principalmente, a seleção de materiais com elevada tenacidade para garantir resistência à propagação de trincas.<sup>(1,6)</sup>

\* No estado supercrítico, o fluido encontra-se a pressões e temperaturas acima dos valores críticos. No estado denso, encontra-se a pressões acima da pressão crítica.

Este trabalho apresenta uma breve revisão sobre o transporte de dióxido de carbono supercrítico em dutos, considerando o modo de falha por fratura propagante. São discutidos aspectos do comportamento sob descompressão deste gás, bem como os efeitos importantes que as impurezas nas correntes têm neste comportamento. Em seguida, são apresentadas as metodologias de cálculo desenvolvidas. Tais métodos são baseados amplamente em resultados de ensaios de rompimento em escala real em dutos para transporte de gás natural. Portanto, são evidenciadas as correções e adaptações necessárias em função da diferença entre os fluidos, e apresentadas as limitações desses métodos. Metodologias alternativas são também discutidas.

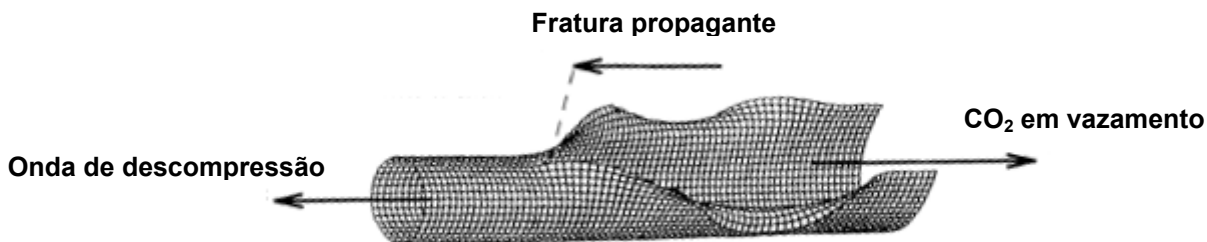


Figura 1. Esquema da fratura propagante em dutos.<sup>(7)</sup>

## 2 RESULTADOS

### 2.1 Comportamento sob Descompressão

Quando uma linha de CO<sub>2</sub> supercrítico (ou denso) se rompe, ocorre a descompressão isentrópica do fluido para o estado líquido e posteriormente para um fluido bifásico (líquido e gás), que se comporta como uma fase única homogênea. Nesse processo, quando o fluido monofásico passa à condição bifásica, há uma queda abrupta na velocidade de descompressão do fluido, até que a pressão de saturação seja alcançada.

Esse fenômeno tem importância decisiva no projeto de uma instalação quando se considera o risco de fratura propagante, visto que a velocidade de descompressão da mistura de CO<sub>2</sub> deve ser maior que a velocidade de propagação da fratura, para que haja interrupção da propagação da falha.

A velocidade de descompressão é influenciada por:<sup>(8)</sup>

- *Composição da corrente transportada.* A posição da linha de saturação líquido-vapor no diagrama de fases depende da composição de cada mistura. Como discutido anteriormente, isso afeta a velocidade de descompressão para cada cenário considerado. Dessa maneira, parece adequado utilizar o comportamento da corrente na pior estimativa de composição em projetos de estruturas para CO<sub>2</sub>. Das possíveis impurezas, o H<sub>2</sub> tem o efeito mais preponderante no limite das fases e no comportamento sob descompressão do CO<sub>2</sub>.
- *Pressão inicial de operação.* Pressões mais elevadas geram velocidades de descompressão maiores. Por conseguinte, a baixas pressões de projeto (tipicamente <150bar), linhas de CO<sub>2</sub> tendem a apresentar pior desempenho.



- *Temperatura de operação.* Temperaturas de operação mais elevadas resultam em maiores pressões de saturação da mistura. Portanto, a curva de decompressão de CO<sub>2</sub> em temperaturas mais elevadas cruza a curva de saturação, apresentando uma trajetória de decompressão mais longa.

Existem vários modelos para o cálculo teórico da curva de velocidade da onda de decompressão, sendo o Gasdecom o principal deles. Este modelo foi validado utilizando curvas de decompressão de gás natural medidas em ensaios de rompimento em escala real. Entretanto, deve-se atentar que os modelos de decompressão podem ser utilizados com misturas de hidrocarbonetos contendo CO<sub>2</sub>, mas não estão otimizados e validados para misturas com alta proporção de CO<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub> puro.<sup>(1)</sup>

Tais modelos estão baseados em equações de estado, que são uma representação matemática do diagrama de fases, definindo uma relação empírica ou semi-empírica entre pressão, temperatura, volume específico e composições, ou seja, o estado termodinâmico do fluido. O modelo Gasdecom utiliza a equação de estado BWRS (Benedict-Webb-Rubin-Starling), e está limitado a princípio a hidrocarbonetos (metano a hexano), N<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>.<sup>(9)</sup>

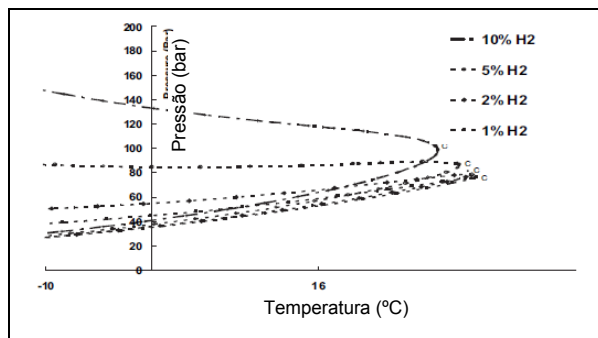
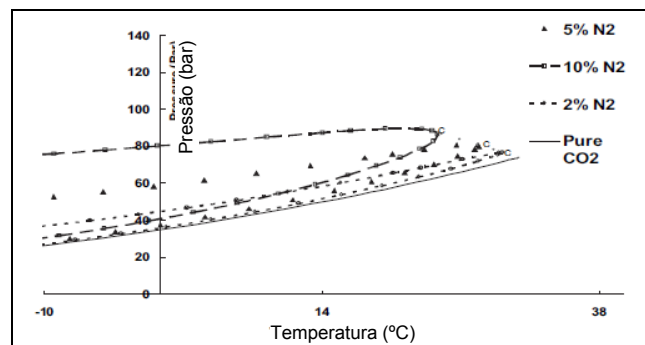
Outras equações de estado comumente utilizadas em misturas contendo gás natural e CO<sub>2</sub> são a equação PR (Peng-Robinson) e a equação GERG-2004.<sup>(10)</sup> O padrão DNV-RP-J202 indica que, para correntes ricas em CO<sub>2</sub>, a equação PR provê exatidão suficiente; contudo, deve-se atentar a uma redução da exatidão em simulações feitas próximo do ponto crítico. Segundo Cosham et al.<sup>(10)</sup>, a equação BWRS fornece previsões de pressão de saturação mais elevadas, para dadas condições iniciais, que a equação PR. Deste modo, o uso de modelos que utilizam a equação BWRS resultará em estimativas mais elevadas de tenacidade requerida para interrupção da fratura.

## 2.2 Efeitos de Impurezas

Diversos outros componentes podem estar presentes como impurezas na corrente transportada, como hidrocarbonetos, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO, Ar, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>.<sup>(10)</sup>

Poucos modelos e equações de estado incluem os efeitos de impurezas. Destaca-se na consideração da influência especialmente de hidrocarbonetos a equação de estado GERG-2004.

A adição de impurezas à corrente de CO<sub>2</sub> causa alterações no diagrama de fases, conforme pode ser verificado nas Figuras 2 e 3, obtidas a partir de simulações. De modo geral, as impurezas aumentam simultaneamente a pressão de saturação da mistura, a largura do envelope de fases (região em que as fases líquido e gás coexistem em equilíbrio) e a pressão e temperatura críticas. Algumas impurezas, como H<sub>2</sub>, tendem a apresentar um efeito mais pronunciado, enquanto outras, tais como N<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>, provocam menores alterações. A alteração da posição do ponto crítico no diagrama de fases pode reduzir a área supercrítica. Esta é a região de operação ótima do duto, visto que o carboduto deve transportar fluido em estado supercrítico ou em fase densa. Esta alteração no diagrama de fases pode então ter impacto nas condições operacionais do duto.


 Figura 2. Diagrama de fases para o sistema CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>.<sup>(11)</sup>

 Figura 3. Diagrama de fases para o sistema CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>.<sup>(11)</sup>

As impurezas nas correntes de CO<sub>2</sub> afetam as também outras propriedades da mistura, como a densidade. Para CO<sub>2</sub> puro, verifica-se que, em aprox. 50bar, uma pequena variação na temperatura ou pressão tem efeito considerável na densidade.<sup>(11)</sup> Abaixo desta pressão, é possível que líquido de alta densidade e gás co-existam na linha, o que poderia resultar em regiões de estagnação de líquido ao longo do sistema. Finalmente, a presença de impurezas desloca essa descontinuidade para pressões maiores. Com a adição de 5% H<sub>2</sub>, a descontinuidade de pressão situa-se em torno de 110-120bar, ou seja, próximo das pressões de operação usuais.

## 2.3 Metodologias de Projeto para Interrupção da Propagação de Fraturas Dúcteis em Dutos de CO<sub>2</sub>

### 2.3.1 Normas e padrões

Embora alguns padrões e normas reguladoras tratem da propagação de fraturas dúcteis, poucas tratam especificamente do projeto de linhas de transporte de dióxido de carbono.

A norma API 5L:2007 cita os métodos para determinação de valores mínimos de energia Charpy para controle da propagação de fraturas dúcteis em dutos de gás terrestres enterrados.<sup>(12)</sup> Excetuando-se os ensaios em escala real, os métodos descritos neste padrão são confiáveis para projeto de dutos de transporte de correntes de gás natural, ricas em metano. Resultados não-conservativos podem ser obtidos se os mesmos forem aplicados em dutos de transporte de dióxido de carbono.

A norma ASME B31.4:2006, no trecho que trata da propagação de fraturas em carbidutos, estabelece que a possibilidade de ocorrência de fraturas propagantes dúcteis deve ser considerada no projeto das linhas.<sup>(13)</sup> A revisão de 2009 deste padrão não menciona esta exigência.

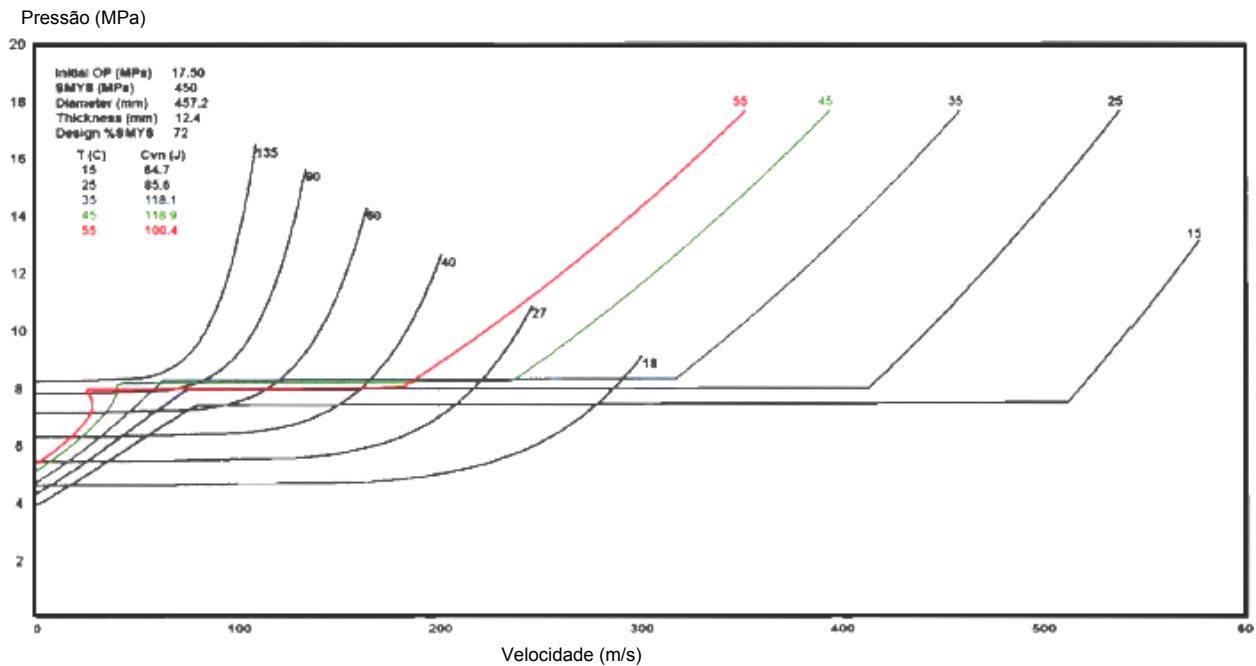
O documento DNV-RP-J202:2010, de projeto e operação de linhas de CO<sub>2</sub>, especifica que as linhas devem possuir adequada resistência a fraturas propagantes. Segundo este padrão, tal resistência pode ser alcançada através do uso de material com baixa temperatura de transição e adequadas tenacidade Charpy e área de fratura cisalhada em ensaios DWTT, da redução do nível de tensão, do uso de *crack arrestors* mecânicos ou através da combinação destes métodos. Segundo este padrão, as soluções de projeto devem ser validadas através de cálculos baseados em experiência e/ou ensaios adequados.

A estratégia de projeto contra fraturas dúcteis propagantes proposta pela DNV-RP-J202 envolve controle tanto da iniciação quanto da propagação da fratura. Um procedimento geral apresentado neste padrão envolve determinar uma pressão de interrupção da fratura  $P_a$  (com base no projeto do duto) e a pressão crítica  $P_c$  (a partir da composição da corrente transportada). Se  $P_a > P_c$ , há interrupção da fratura; senão, deve-se aumentar a resistência a fraturas propagantes da linha. Se esse procedimento não demonstrar uma margem de segurança suficiente entre  $P_a$  e  $P_c$ , recomenda-se utilizar a metodologia das duas curvas, descrita a seguir.<sup>(8)</sup>

### 2.3.2 Método das duas curvas – abordagem Battelle e modelo alternativo

O método Battelle das duas curvas é um modelo para expressão do critério de propagação de uma fratura dúctil em termos da relação entre a velocidade da onda de descompressão do fluido e a velocidade de propagação da trinca no material do duto. O modelo original utilizou dados de mais de 200 ensaios de rompimento em escala real em tubos até grau X65 pressurizados com ar ou gás natural puro para a dedução semi-empírica de duas curvas descrevendo como as velocidades da fratura e da onda de descompressão do gás variam com a pressão.<sup>(14,15)</sup>

A Figura 4 mostra as curvas de velocidade da onda de descompressão do CO<sub>2</sub> para diferentes temperaturas, calculadas usando a equação de estado BWRS, e de velocidade da fratura para diferentes tenacidades, calculadas segundo o método Battelle original. Se a curva da fratura estiver acima da curva de descompressão, a velocidade de descompressão será maior que a velocidade da fratura para todas as pressões, ocorrendo a interrupção da fratura. Quanto mais acima a curva de fratura estiver da curva de descompressão, mais rapidamente ocorrerá a interrupção da fratura. Se a curva da fratura estiver abaixo da curva de descompressão, não ocorrerá descompressão adicional, e a fratura continuará a propagar.



**Figura 4.** Curvas de velocidade da onda de descompressão a partir de 17,5MPa em intersecção com curvas de tenacidade para tubo NPS18 L450 com parede de espessura 12,4mm.<sup>(5)</sup>

O método Battelle é um modelo validado para gás natural e líquidos através de ensaios em escala real. Este método tem boa aplicação para misturas ricas em hidrocarbonetos, aços C-Mn laminados convencionalmente, em geral grau X65 ou inferior, e de energia Charpy de patamar superior menor que 100J. A extensão deste método para aplicação em dutos de CO<sub>2</sub> supercrítico não foi validada até o momento. Diversos estudos têm sido executados para modelar a propagação de fraturas dúcteis baseando-se nesta metodologia.

- *Método Battelle simplificado* - Para linhas de transporte de dióxido de carbono, podem-se aplicar simplificações ao método Battelle original sem perda de exatidão para materiais cuja tenacidade situa-se até aproximadamente 200J.<sup>(5)</sup> Tais simplificações compreendem estabelecer a velocidade da fratura igual a zero e a pressão de interrupção da fratura igual à pressão mais elevada em que o fluido entra na região bifásica, que em geral é igual à pressão de saturação nas condições de projeto. As equações do método Battelle tornam-se então:

$$C_v = \frac{E_N A \sigma_f^2}{E} \sqrt{\frac{Dt}{2}}, \text{ (Equação 1)}$$

sendo

$$E_N = -\frac{24}{\pi} \text{Incos} \left( \frac{3,33\pi \sigma_d}{2 \cdot \sigma_f} \right) \text{ (Equação 2)}$$

$$\sigma_d = \frac{P_d \cdot D}{2 \cdot t} \text{ (Equação 3)}$$

sendo que

$C_v$  é a tenacidade Charpy requerida para interrupção da fratura (J),  $E_N$  é o parâmetro de tenacidade normalizado,  $A$  é a área abaixo do entalhe no corpo-de-prova Charpy (m<sup>2</sup>),  $\sigma_f$  é a tensão de fluxo do aço do tubo, isto é, a média entre as resistências mecânica e de escoamento (Pa),  $E$  é o módulo de

elasticidade (Pa),  $D$  é o diâmetro externo do tubo (m),  $t$  é a espessura de parede (m),  $\sigma_d$  é a tensão circunferencial devido à pressão  $P_d$  (Pa) e  $P_d$  é a pressão de saturação, ou seja, do patamar de descompressão bifásica (Pa).

À medida que a razão  $\sigma_d/\sigma_f$  aproxima-se de 0,30, a tenacidade normalizada  $E_N$  tende a infinito e torna-se altamente sensível a pequenos erros na estimação da pressão  $P_d$  e da tensão de fluxo. Portanto, quando a razão excede 0,28, não se deve utilizar a tenacidade para controle de fraturas dúcteis, devendo-se alterar a espessura de parede do tubo ou instalar *crack arrestors*.

As **equações 1 a 3** podem ser usadas para calcular a tenacidade  $C_v$  usando os valores de  $t$ ,  $D$ ,  $P_d$  e  $\sigma_f$ . Alternativamente, as equações podem ser resolvidas iterativamente para se encontrar a espessura de parede  $t$  necessária para interromper fraturas dúcteis para qualquer tenacidade  $C_v$  determinada.

Considerando as incertezas na aplicação do método Battelle em dutos de  $CO_2$ , uma margem de segurança adicional é requerida; por exemplo, o uso, nas equações, de um valor de  $P_d$  acima do calculado para a mistura transportada ou a aplicação de fator de segurança no valor de tenacidade mínima.

- *Método alternativo* - Um método alternativo para cálculo da propagação de fraturas dúcteis em carbodutos foi proposto por Mahgerefteh, Brown e Zhang<sup>(2)</sup> e Makino et al.<sup>(7)</sup>

Para determinar a velocidade de descompressão de misturas de  $CO_2$  são necessários modelos do escoamento multifásico transiente do fluido, uma equação de estado adequada para misturas ricas em  $CO_2$ , bem como a consideração da fricção e das transferências térmicas.

Para o modelamento da descompressão do fluido, propõe-se a utilização da equação de estado de Peng-Robinson modificada. Para modelamento do escoamento do fluido, são utilizadas equações diferenciais de conservação de massa, momento e energia, com as hipóteses de fluxo unidimensional e homogêneo e a inclusão de termos de transferência de calor e de fricção.

Estas equações diferenciais devem ser resolvidas numericamente, utilizando, por exemplo, o método dos elementos finitos através de programas de CFD. Obtém-se através dessa solução a velocidade de descompressão do fluido e a pressão na ponta da trinca.

A velocidade de propagação da fratura pode ser obtida através de correlações empíricas com resultados de ensaios Charpy ou DWTT, de ensaios de rompimento ou de simulações numéricas. No método Battelle original, correlacionaram-se os dados de testes de rompimento em escala real com a energia Charpy.

Neste método alternativo, utilizam-se ensaios de rompimento West Jefferson em substituição a ensaios de rompimento em escala real tradicionais. Tais ensaios utilizam seções de tubo de pequeno comprimento preenchidas com água e pressurizadas com gás, demandam menos tempo e custos e os dados obtidos são independentes do fluido de teste. Os resultados destes ensaios correlacionam-se melhor com os do ensaio de queda de martelo (DWTT). É necessária, portanto, modificação das fórmulas do método Battelle original, para utilização da energia DWTT.

As equações do método Battelle modificado tornam-se:<sup>(7)</sup>



$$V_c = 0,67 \frac{\sigma_f}{\sqrt{\frac{D_p}{A_p}}} \left( \frac{P_t}{P_a} - 1 \right)^{0,393} \quad \text{(Equação 9)}$$

$$P_a = 0,382 \frac{t}{D} \sigma_f \cdot \arccos \left( \exp \left( \frac{-3,8 \cdot 10^7 \cdot \frac{D_p}{A_p}}{(\sqrt{Dt}) \sigma_f^2} \right) \right) \quad \text{(Equação 10)}$$

Sendo  $V_c$  a velocidade de propagação de trinca (m/s),  $P_a$  a pressão de interrupção da fratura (MPa),  $\sigma_f$  a tensão de fluxo (média entre as resistências mecânica e de escoamento, MPa),  $D_p$  a energia DWTT de corpo-de-prova pré-entalhado (J),  $A_p$  a área abaixo do entalhe do corpo-de-prova DWTT pré-entalhado ( $\text{mm}^2$ ),  $D$  o diâmetro externo do tubo (mm),  $P_t$  a pressão na ponta da trinca (MPa),  $t$  a espessura da parede do tubo (mm).

### 2.3.3 Desafios e novos desenvolvimentos

Dois aspectos têm-se apresentado desafiadores no estudo da propagação de fraturas em carbodutos: o projeto para a interrupção de fraturas dúcteis em termos de parâmetros elasto-plásticos e o projeto de carbodutos submarinos.

Com o desenvolvimento de aços de maiores resistência e tenacidade, observaram-se limitações nos modelos baseados em energias Charpy e DWTT. De fato, considerando-se o comportamento das ligas de maior resistência e a baixa restrição de tubos de parede fina, parâmetros linear-elásticos são muito conservativos, de modo que a iniciação e propagação da fratura podem ser mais convenientemente calculadas utilizando medidas elasto-plásticas da tenacidade.

A propagação de uma fratura dúctil está associada com um campo de deformação plástica. A consideração deste campo de deformação levou ao conceito de uma zona de deformação plástica associada com um ângulo de abertura da ponta da trinca constante (CTOA) correspondendo à força-motriz para a propagação da trinca. Quando a carga aplicada faz com que o valor de CTOA aplicado ( $CTOA_a$ ) numa estrutura supere o valor crítico de CTOA ( $CTOA_c$ ), que é uma propriedade do material, independente da geometria da amostra usada para sua obtenção, ocorre extensão da trinca.<sup>(16)</sup> A comparação simples entre o valor de  $CTOA_a$ , calculado nas condições operacionais, e o valor de  $CTOA_c$  do material define um método de engenharia para avaliar a estabilidade do processo de propagação estável da fratura dúctil, e, portanto, as condições de propagação e interrupção da fratura.<sup>(6,15)</sup> Validações de resultados de modelos utilizando CTOA através de ensaios em escala real têm sido feitas, e os resultados têm tentado demonstrar a validade desse procedimento.

A propagação de fraturas dúcteis em linhas submarinas difere em alguns aspectos daquela que ocorre em dutos terrestres. Questões específicas de linhas submarinas incluem o comportamento da descompressão do gás (que em dutos submarinos encontra-se em pressões internas mais elevadas que em dutos terrestres), o efeito da elevada espessura de parede e o efeito de restrição, pela água circundante, no gás e nas abas do tubo fraturado.

A aplicabilidade dos procedimentos de determinação da tenacidade de dutos terrestres para linhas submarinas está ainda sob discussão.<sup>(17)</sup>



A norma DNV-OS-F101 é amplamente utilizada para projeto de dutos offshore.<sup>(17)</sup> Contudo, os requisitos para interrupção de fraturas propagantes disponibilizados por essa norma são válidos somente para linhas de gás transportando metano puro. A execução de ensaios em escala real em condições submersas é operacionalmente mais complexa que em condições terrestres, de modo que poucos ensaios foram executados e existem muito poucos dados disponíveis para validação de modelos. Para tubos transportando dióxido de carbono, nenhum ensaio de rompimento em escala real foi publicado.

### 3 COMENTÁRIOS FINAIS

Atualmente há deficiência na regulamentação específica para o projeto e operação de dutos para transporte de CO<sub>2</sub>. Adicionalmente, as metodologias existentes de previsão da tenacidade mínima em materiais para carodutos ainda precisa ser aprimorada, visto que os modelos de descompressão disponíveis não foram calibrados para misturas ricas ou pobres em CO<sub>2</sub> e que os métodos de cálculo foram em geral baseados em ensaios de rompimento em escala real de dutos de gás natural.

Dessa maneira, muito esforço em pesquisa tem sido feito em todo mundo para tentar validar, através de resultados experimentais em escala real, as previsões do comportamento físico-químico das misturas determinadas através das equações de estado e dos modelos de descompressão. Nesse cenário, o desenvolvimento de uma metodologia mais robusta para a estimativa da tenacidade mínima do material empregado em equipamentos para transporte de correntes de CO<sub>2</sub> é muito importante.

### Agradecimentos

Agradecemos aos colegas Sergio Furley dos Santos Jr. e Jussara de Mello Silva, da Petrobras, pelas discussões durante a realização desse trabalho.

### REFERÊNCIAS

- 1 Cosham, A., Eiber, R. "Fracture control in carbon dioxide pipelines". The Journal of Pipeline Engineering. pp. 147-158. 2007.
- 2 Mahgerefteh, H., Brown, S., Zhang, P. "A dynamic boundary ductile-fracture propagation model for CO<sub>2</sub> pipelines". The Journal of Pipeline Engineering. P. 265-276. Dezembro 2010.
- 3 Andrews, R., Haswell, J., Cooper, R. "Will fractures propagate in a leaking CO<sub>2</sub> pipeline?". The Journal of Pipeline Engineering. P. 277-287. Dezembro 2010.
- 4 Bratfos, H., Leinum, B., Torbergsen, L., Saugerud, O. "Challenges to the pipeline transportation of dense CO<sub>2</sub>". Global Pipeline Monthly. Julho 2007.
- 5 King, G., Kumar, S. "How to select wall thickness, steel toughness, and operating pressure for long CO<sub>2</sub> pipelines". The Journal of Pipeline Engineering. P. 253-263. Dezembro 2010.
- 6 Buzzichelli, G. "Designing against ductile fracture propagation in very high strength steel gas pipelines: a review". In "Fracture Mechanics: Application and Challenges". 13<sup>th</sup> European Conference on Fracture. V. 26. P. 1-263. 2000.
- 7 Makino, H., Takeuchi, I., Tsukamoto, M., Kawaguchi, Y. "Study on the Propagating Shear Fracture in High Strength Line Pipes by Partial-gas Burst Test". ISIJ International. V. 41. P. 788-794. 2001.



- 8 Det Norske Veritas. "Recommended Practice DNV-RP-J202 – Design and Operation of CO<sub>2</sub> Pipelines". Abril 2010.
- 9 Botros, K., Geerligs, J., Eiber, R. "Measurement of Decompression Wave Speed in Rich Gas Mixtures at High Pressures (370bars) Using a Specialized Rupture Tube". Journal of Pressure Vessel Technology. V. 132. P. Outubro 2010.
- 10 Cosham, A., Eiber, R., Clark, E. "GASDECOM: Carbon Dioxide and Other Components". 8th International Pipeline Conference, Alberta. Outubro 2010.
- 11 Seevam, P., Race, J., Downie, M. "Carbon dioxide pipelines for sequestration in the UK: an engineering gap analysis". Global Pipeline Monthly. P. 1-15. Julho 2007.
- 12 "ANSI/API Specification 5L - Specification for Line Pipe". 44<sup>th</sup> ed. Outubro 2007.
- 13 "B31.4 - Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other liquids". ASME. 2006.
- 14 Maxey, W., Kiefner, J., Eiber, R. "Ductile Fracture Arrest in Gas Pipelines". Contract NG-18. Report n° 100. Catalog N° L32176e. PRCI. 1975.
- 15 Andrews, R., Batte, A. "Developments in Fracture Control Technology for Gas Pipelines utilizing High Strength Steels". IGU 22<sup>nd</sup> World Gas Conference, Tokyo. 2003.
- 16 Rudland, D., Shim, D., Xu, H., Rider, D., Mincer, P., Shoemaker, D., Wilkowski, G. "First Major Improvements to the Two-Curve Ductile Fracture Model – Part I Main Body". Emc<sup>2</sup> project number 03-G78-01. PRCI. 2007.
- 17 Torselletti, E., Vitali, L., Bruschi, R. "Design criteria vs. line pipe requirements for offshore pipelines". Acessado em 2 de fevereiro de 2011. Disponível em: <http://www.advancepipeliner.com/Resources/Pipeline/wallthickness/192.pdf>.