

Métodos de ensaio e avaliação de desempenho de tubagens em termoplásticos

Aplicação de conceitos de mecânica da fractura

António Assunção *

Resumo

Um significativo número de falhas ocorreu em canalizações feitas em tubos de materiais plásticos, tais como PE e PVC rígidos.

Verifica-se que as fracturas se dão frequentemente dum modo frágil e a níveis de tensão muito mais baixos do que os verificados no caso de solicitações estáticas.

Por outro lado, todos esses tubos haviam satisfeito os testes das normas que procuram avaliar a sua qualidade.

Conclui-se que:

- os testes das normas que procuram avaliar a qualidade dos tubos termoplásticos não se revelam representativos das condições de serviço;
- os tubos “passaram” no critério errado.

Consequentemente, nos últimos anos têm sido levados a cabo numerosos estudos sobre a fragilização e propagação de fissuras utilizando as técnicas da MECÂNICA DA FRACTURA. Deste modo procura-se uma melhor compreensão da rotura de canalizações plásticas em serviço, com vista a melhorar os processos de avaliação de tubagens.

1. Introdução

1.1. Resistência de materiais

Convencionalmente os projectistas usam a tensão de cedência do material para definirem a resistência. A esta tensão é aplicado um factor de segurança.

Contudo o PE (POLIETILENO) não apresenta um comportamento Hookeano e um importante estiramento a frio ocorre uma vez atingida a cedência, indicando que o PE é muito dúctil e tenaz (fig. 1).

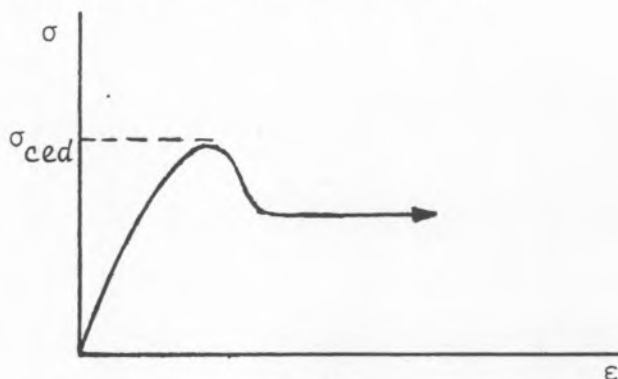


Fig. 1

Diagrama tensão/deformação típica do Polietileno

O valor da tensão de cedência do PE é simultaneamente dependente da temperatura e do tempo (fig. 2).

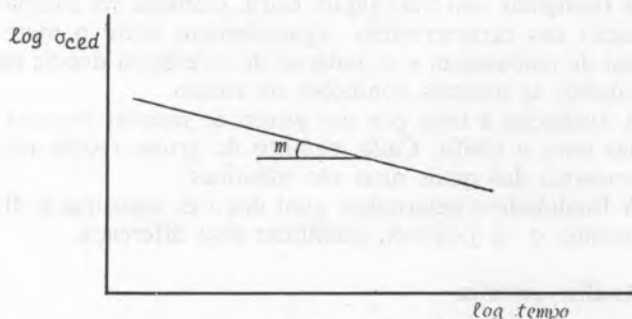


Fig. 2

Dependência no tempo da tensão de cedência do PE

$$\sigma_{ced} = \sigma_o t^{-m}$$

onde

σ_{ced} — tensão de cedência ao fim do tempo t

σ_o — » » » no momento inicial

m — constante que, para cada material, é determinada pelos ensaios convencionais de fluência (e que é um dado frequente em literatura da especialidade).

1.2. Fadiga

Todas as canalizações estão sujeitas a variações de pressão do fluido que conduzem, que se vão traduzir em solicitações cíclicas das tubagens e que inevitavelmente originam fadiga.

Fadiga:

- é um processo de degradação progressiva
- que ocorre nos materiais sujeitos a solicitações (tensões ou deformações) cíclicas
- conduzindo ao aparecimento de fendas
- que se podem propagar até à fractura completa após um certo número de ciclos.

A fractura verifica-se a níveis de tensão muito mais baixos do que nos verificados no caso de solicitações estáticas.

Convencionalmente a fadiga é estudada em curvas SN ou de Wöhler, onde as 3 etapas do processo (iniciação da fenda, propagação e rotura final) se confundem.

Com os materiais plásticos, na generalidade dos casos, já existem defeitos quando o equipamento é colocado em serviço, pelo que as condições de partida diferem substancialmente dos ensaios clássicos de fadiga. É devido à fadiga que esses defeitos vão crescendo até que a fenda atinge dimensões críticas que conduzem à rotura final.

* Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, R. S. Tomé — 4200 PORTO.

A principal questão é como determinar o tamanho crítico de fenda, a partir do qual cessa a propagação estável e se dá a rotura final. Ora isto só é possível recorrendo ao factor intensidade de tensão K , básico nos estudos de MECÂNICA DA FRACTURA.

2. Mecânica da fractura

Quando existem fendas, verifica-se uma redistribuição de tensões na sua proximidade (fig. 3) e a concentração

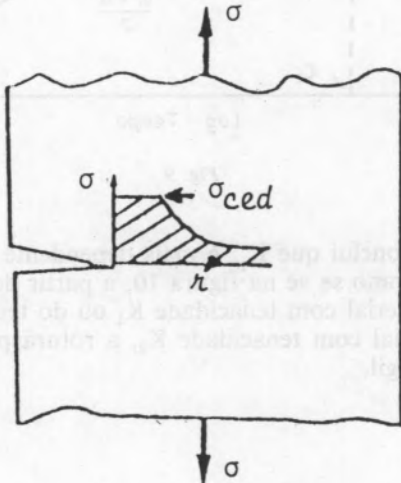


Fig. 3

Redistribuição de tensões na extremidade da fenda

de tensões inevitavelmente conduzirá à rotura do material a uma tensão inferior à tensão de cedência (fig. 4).

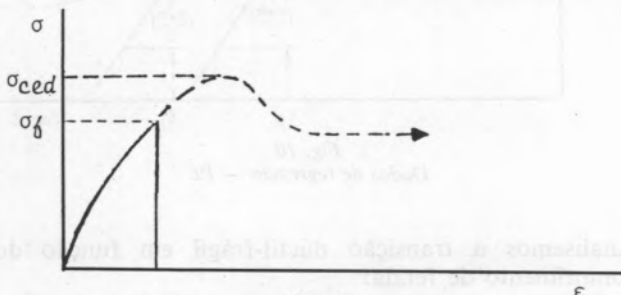


Fig. 4

Rotura antes da cedência, na presença de defeitos

A tensão σ_b à qual a rotura se verifica, é controlada pelo factor intensidade de tensão.

O factor intensidade de tensão K , caracteriza o estado mecânico na vizinhança duma fissura (ref. 1,2).

Consoante o modo de sollicitação, K toma as designações K_I , K_{II} e K_{III} (fig. 5). Ocupar-nos-emos do modo

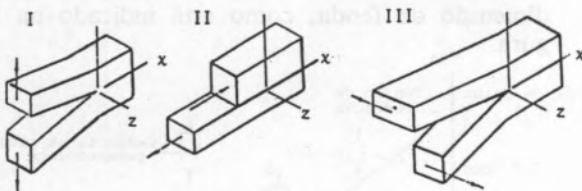


Fig. 5

Modos I, II e III de crescimento da fenda

de maior importância prática, o modo I, K_I , correspondente à abertura de fendas de modo que as suas faces se afastem uma da outra.

O estado de tensão elástica na vizinhança r, θ da extremidade de uma fenda é dado por (fig. 6)

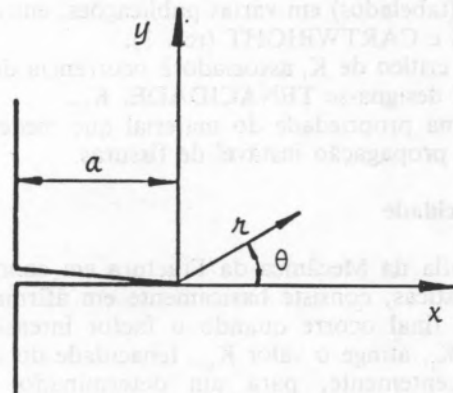


Fig. 6

Referencial para o estudo do campo de tensão na vizinhança da extremidade duma fenda

$$\sigma = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f(\theta)$$

O factor intensidade de tensão K_I (ref. 2) varia com:

- configuração (geometria) da fenda
- dimensão
- carga aplicada

é independente de r e θ , logo controla a intensidade dos campos de tensão, mas não controla a distribuição

As tensões num meio perfeitamente elástico são dadas por (fig. 7):

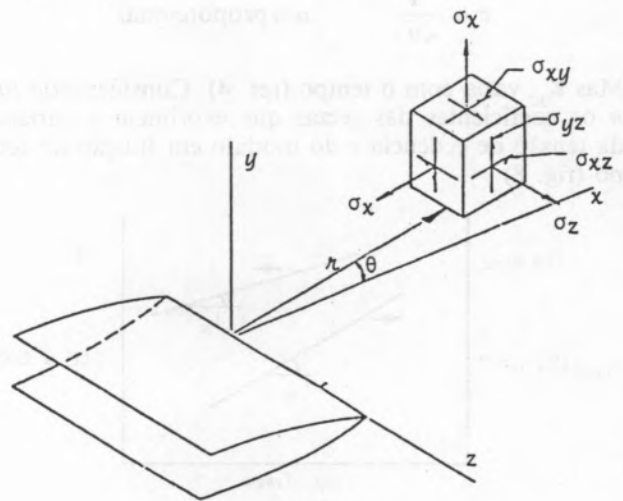


Fig. 7

Sistema de coordenadas associado à extremidade de uma fenda

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

No caso geral

$$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi a}$$

onde Y é um "factor de correcção" função da geometria da peça. Os valores de Y , ou por outras palavras, os valores de K_I para as diversas geometrias estão compilados (tabelados) em várias publicações, entre elas no ROOKE e CARTWRIGHT (ref. 3).

O valor crítico de K_I associado à ocorrência de fractura frágil designa-se TENACIDADE, K_{IC} . K_{IC} é uma propriedade do material que mede a resistência à propagação instável de fissuras.

3. Tenacidade

A filosofia da Mecânica da Fractura em condições linear elásticas, consiste basicamente em afirmar que a fractura final ocorre quando o factor intensidade de tensão, K_I , atinge o valor K_{IC} , tenacidade do material. Consequentemente, para um determinado material (K_{IC}):

- conhecida a tensão de serviço é possível determinar o comprimento máximo da fissura, ou
- conhecido o comprimento da fenda é possível determinar a tensão de trabalho crítica.

Como vimos, a tensão à qual a rotura se dá (σ_f - Tensão de falha) é controlada pela TENACIDADE DO MATERIAL

$$K_{IC} = Y \sigma_f \sqrt{\pi a}$$

onde a é o tamanho da fenda, donde se infere que σ_f diminui com o crescimento do tamanho da fenda de acordo com a lei

$$\sigma_f \propto \frac{1}{\sqrt{a}} \quad \alpha \equiv \text{proporcional}$$

Mas K_{IC} varia com o tempo (ref. 4). Considerando m e n os coeficientes das rectas que exprimem a variação da tensão de cedência e do módulo em função do tempo (fig. 8)

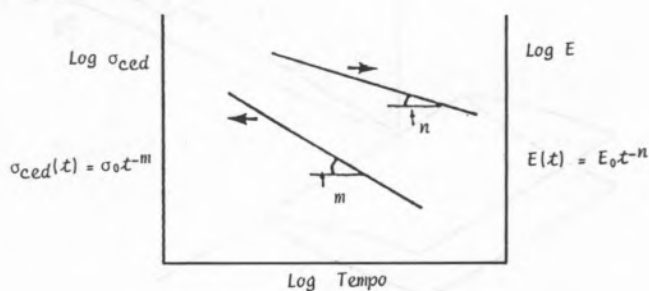


Fig. 8
Dependência no tempo de σ_{ced} e E

$$\sigma_{ced}(t) = \sigma_0 t^{-m}$$

$$E(t) = E_0 t^{-n}$$

verifica-se que (fig. 9)

$$K_{IC}(t) = K_0 t^{-\frac{(m+n)}{2}}$$

No caso do PE o valor da constante n é muito maior que m , pelo que

$$\frac{m+n}{2} > m$$

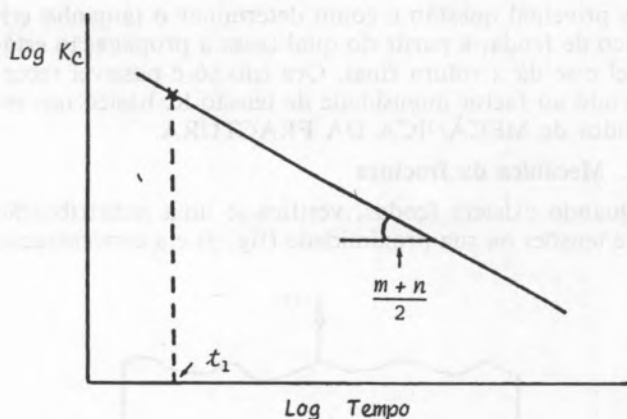


Fig. 9

donde se conclui que K_{IC} é mais dependente do tempo que σ_{ced} . Como se vê na figura 10, a partir do tempo t_1 para o material com tenacidade K_1 ou do tempo t_2 para o material com tenacidade K_2 , a rotura passa a ser do tipo frágil.

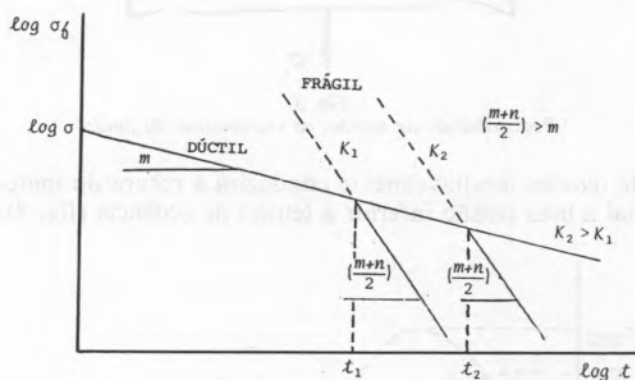


Fig. 10
Dados de regressão — PE

Analisemos a transição dúctil-frágil em função do comprimento de fenda:

a) Se um provete rompesse sempre dum modo dúctil, a variação da tensão de falha (nominal — considerando toda a área, como se não conhecessemos a existência de fendas) com a dimensão da fenda será do seguinte modo (fig. 11):

- se não existir fenda, a tensão de falha coincide com a tensão de cedência
- se a fenda atravessar toda a secção ($a/t=1$) a tensão de falha será nula
- para todas as outras dimensões de fenda, a tensão de falha será inversamente proporcional à dimensão da fenda, como está indicado na figura.

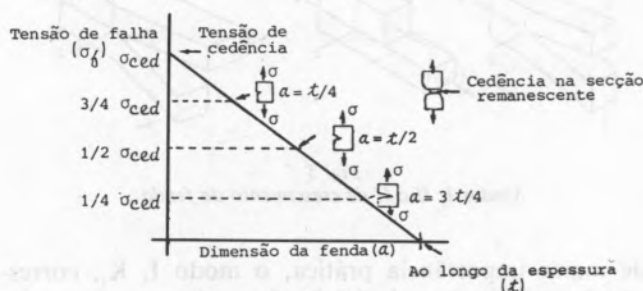


Fig. 11
Critério de rotura de cedência da secção remanescente

b) Por sua vez, para um dado material que rompa de modo frágil a relação existente entre a tensão de falha e a dimensão da fenda

$$f = K \frac{1}{\sqrt{a}}$$

exprime uma curva das do tipo da figura 12.

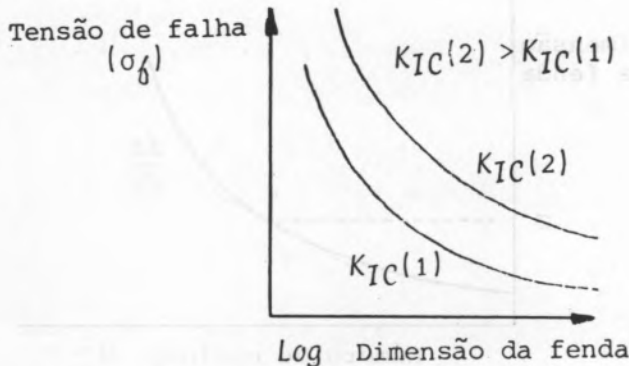


Fig. 12

Tensão aplicada em função da dimensão da fenda

Quando se verifica a rotura frágil num provete entalhado, seja ela provocada por um defeito deliberadamente introduzido ou por uma fissura do próprio material, verifica-se que a tensão de falha varia com a dimensão da fissura do modo indicado na figura 13. De salientar que a rotura frágil dá-se para fendas da dimensão superior a a_0 , isto é, para fendas maiores que a_0 a tensão correspondente à rotura frágil é inferior à tensão de rotura dúctil, pelo que a rotura frágil prevalece.

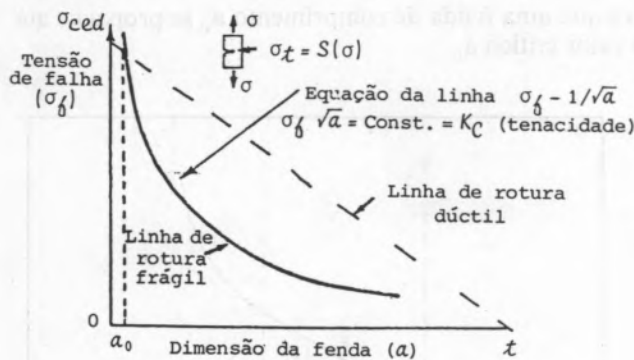


Fig. 13

Rotura frágil características de testes de provetes com entalhe

No caso do PE, o material sujeito a teste pode inicialmente sofrer rotura dum modo dúctil porque a curva que traduz a rotura frágil está acima da recta que traduz a rotura dúctil (figura 14).

Contudo, com o passar do tempo, a curva que traduz a rotura frágil desloca-se para baixo mais rapidamente que a recta de rotura dúctil, conduzindo eventualmente, a longo prazo, à passagem de rotura dúctil para frágil, uma vez que passamos a estar na situação da figura 13.

4. Crescimento de fendas sob cargas constantes

Resultados experimentais mostram que (ref. 4), em muitos polímeros submetidos a carga constante, o

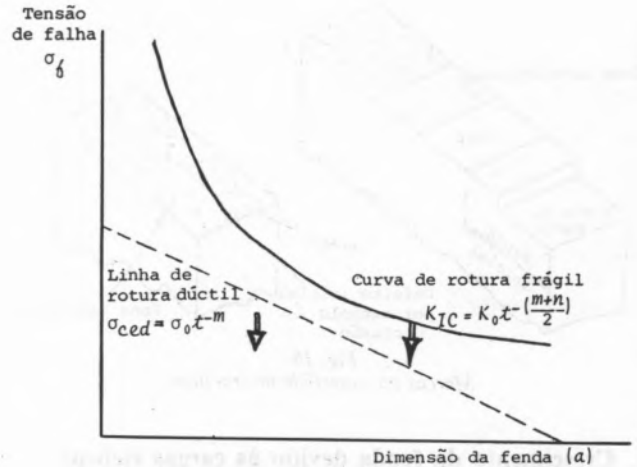


Fig. 14
Rotura dúctil ou frágil

comprimento da fenda a aumenta. A velocidade de propagação

$$\dot{a} = \frac{da}{dt}$$

está relacionada com o valor de K_I ao fim do tempo t por

$$\dot{a} = C_1 K_I^n$$

onde C_1 e n são constantes função do material e condições do teste.

Uma vez que $K_I = Y \sigma \sqrt{\pi a}$, verifica-se que as fendas compridas crescem mais rapidamente que as fendas pequenas. O crescimento da fenda pode ser, em muitos polímeros dividido em 3 zonas de crescimento (fig. 15).

- Lento — zona da superfície de fractura lisa
- Intermédio — zona da superfície de fractura com linhas que apontam a fonte (origem) de crescimento da fractura
- Rápido — zona da superfície de fractura muito rugosa

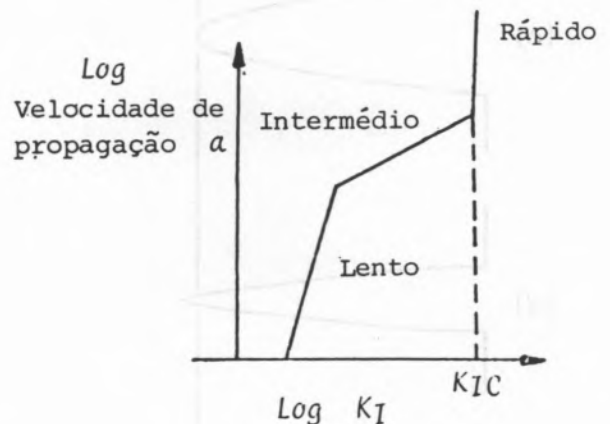


Fig. 15

Propagação da fenda sob carga constante

A figura 16 mostra o aspecto da superfície de fractura de 2 provetes.

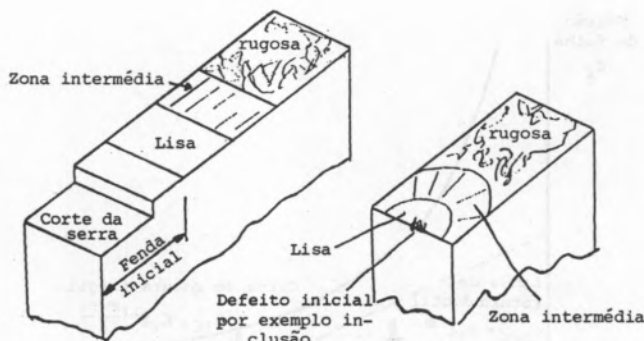


Fig. 16
Marcas na superfície de fractura

5. Crescimento da fenda devido às cargas cíclicas

Entre as muitas causas de cargas cíclicas em canalizações pode-se citar o choque hidráulico e a bombagem e transferência do fluido (ref. 5).

O crescimento da fenda por fadiga poderá ser muito mais rápido do que o verificado sob carga constante. A figura 17 mostra a sequência de abertura e fecho da fenda que se repete em cada ciclo de carga, quando a tensão varia de 0 a σ .

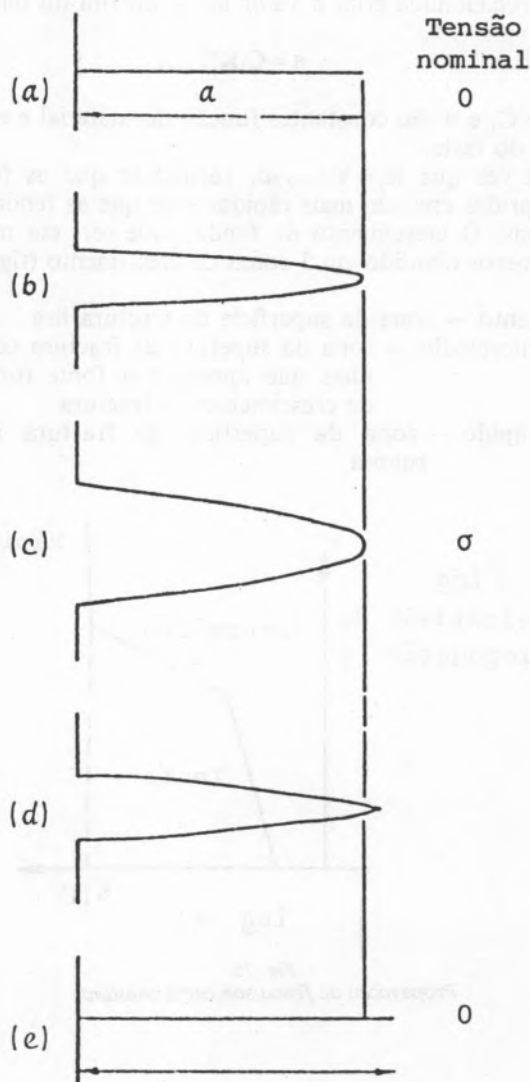


Fig. 17
A sequência (a) a (e) é repetida para cada ciclo de aplicação da carga, de 0 a σ

Como se verifica na figura 18, à medida que a fenda cresce, a velocidade de propagação também aumenta. Paul Paris (1970) concluiu que a velocidade de crescimento estável da fissura

$$\dot{a} = \frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^n$$

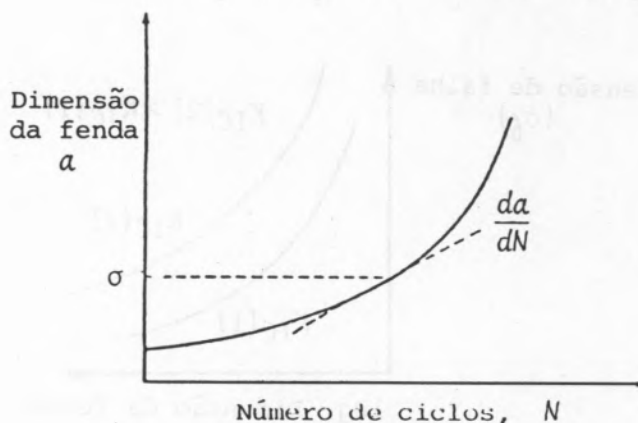


Fig. 18
Variação da dimensão da fenda com o número de ciclos

onde N é o número de ciclos, n e C são constantes a determinar experimentalmente e $\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi a} = Y(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \times \sqrt{\pi a} = K_{\max} - K_{\min}$. Quando $\sigma_{\min} < 0$, considera-se $\sigma_{\min} = 0$ pois uma tensão de compressão não contribui para a abertura de fendas. Consequentemente $K_{\min} = 0$, logo $\Delta K = K_{\max}$. A representação desta equação em coordenadas logarítmicas é uma recta — zona B da figura 19. Determina-se deste modo a velocidade de propagação estável de fendas de fadiga sendo possível, por integração da lei de Paris, determinar o número de ciclos necessários para que uma fenda de comprimento a_0 se propague até ao valor crítico a_c .

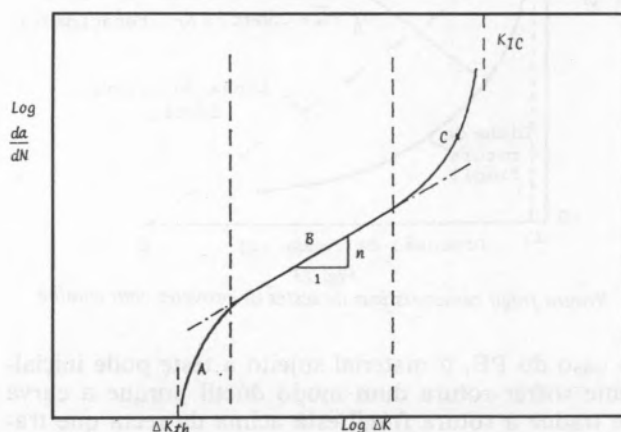


Fig. 19
A velocidade de propagação de fendas de fadiga em função de ΔK

Se associado à fadiga houver alta frequência, a situação é muito mais gravosa devido à elevação de temperatura que se gera, mas tal não é o caso das canalizações.

Conclusões

Descreveu-se uma técnica de caracterização do comportamento de tubagens de materiais polímeros muito mais

realista que técnicas convencionalmente usadas nas normas ainda em vigor. Muito foi feito nesta área nos últimos dez anos, mas muito ainda há a fazer até que essas técnicas e métodos de análise possam ser utilizadas para quantificar com sucesso o comportamento crítico de tubagem plástica até que se possa garantir a sua fiabilidade. Sugere-se que a Mecânica da Fractura desempenhará papel progressivamente mais importante nestes estudos.

REFERÊNCIAS

- [1] BROEK, D. "Elementary Engineering Fracture Mechanics" Sijthoff and Noordhof, 1978.

- [2] CASTRO, P.T. Notas do Curso de Mecânica de Materiais do Curso de Mestrado em Materiais e Processos de Fabrico, FEUP, 1984/1985.
[3] ROOKE, D.P. e CARTWRIGHT, D.J. "Compendium of Stress Intensity Factors" H.M.S.O., LONDON, 1976.
[4] MARSHALL, G.P. "Design for Toughness in Polymers 1 — Fracture Mechanics" Plastics and Rubber Processing and Applications 2 (1982) pp. 169-182.
[5] POWELL, P.C. "The how and why of crack growth in Polymers" Imperial College of Science and Technology.
[6] WILLIAMS, J.G. "The use of Fracture Mechanics in Design with Polymers" Plaston 81 — Engineering Design with Plastics.