

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE NORMALIZAÇÃO LINEAR PARA O LEVANTAMENTO DE CURVAS J-R¹

José Ricardo Tarpani²

Dirceu Spinelli³

Resumo: Neste trabalho é efetuada a avaliação da mais recente técnica analítica de normalização para a determinação de curvas de resistência J, utilizando-se como referência os resultados obtidos segundo a difundida técnica da variação da flexibilidade elástica. São utilizados corpos de prova do tipo compacto padrões-proporcionais com 1 polegada de espessura, lateralmente entalhados, extraídos segundo a orientação ST de uma placa forjada de aço de grau nuclear ASTM A508-Classe 3A. Os ensaios são conduzidos às temperaturas ambiente e 175°C, sob uma taxa de carregamento de 0,5mm/min, em um sistema universal de ensaios MTS totalmente automatizado. Os resultados demonstraram o saudável conservativismo das curvas J-R produzidas segundo a técnica de normalização linear e por meio de ajuste de dados com lei de potência, bem como a tendência à geração de curvas mais liberais por meio da técnica de flexibilidade elástica em situações em que são observados efeitos de fechamento de trinca. Análises mais precisas foram efetuadas com o auxílio dos correspondentes diagramas J-T, onde são melhor verificados os efeitos da temperatura (envelhecimento por deformação) e do grau de entalhamento lateral dos corpos de prova em ambas as abordagens. É por fim sugerida a utilização de ajustes logarítmicos de dados de propagação de trincas em casos onde a tradicional lei de potência não fornece resultados satisfatórios, o que inclui o desenvolvimento do fenômeno de saturação do valor J.

Palavras-Chaves: curva J-R, normalização linear, flexibilidade elástica

1 - Introdução

As avaliações de integridade estrutural de componentes robustos de elevada responsabilidade por meio das metodologias mais avançadas da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica, invariavelmente requerem a realização de ensaios em nível

¹Trabalho a ser apresentado no I Seminário de Mecânica da Fratura, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, Ouro Preto, MG, 01 e 02 de Junho de 1995.

²Doutorando em Engenharia Metalúrgica pelo Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

³Professor do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

laboratorial onde se impõem grandes níveis de crescimento relativo de trinca em corpos de prova padronizados. Especificamente, a aplicação das análises de instabilidade do rasgamento dúctil através dos diagramas J versus T (respectivamente integral-J e módulo de rasgamento) exigem a obtenção de curvas de resistência J (curvas J-R) para níveis de extensão de trincas dúcteis que podem chegar até os 50% do ligamento original ($\Delta a_p = 0,5b_0$) dos corpos de prova de tenacidade à fratura [1]. Apesar da possibilidade da utilização de procedimentos de extrapolação de dados de propagação, seja no espaço J x Δa_p (extensão dúctil de trinca), ou no J x T, para tais níveis de propagação, a sua aplicabilidade parece estar necessariamente vinculada a certo grau de liberalismo, tanto maior quanto mais próximos da origem dos diagramas J x Δa_p estiverem os pontos de dados experimentalmente obtidos, e quanto mais extensivo for o processo de extrapolação, o que por si só introduz uma perda de confiabilidade nas análises de avaliação de integridade estrutural assim realizadas [1,2]. Deste modo, é aconselhável a obtenção experimental dos pontos de dados para níveis de crescimento de trincas tão próximos quanto possível daquele esperado ocorrer no componente estrutural anteriormente à sua falha por mecanismos de instabilidade dúctil, o qual é obviamente uma função da massividade do componente, porém certamente sempre ultrapassando uma dezena de milímetros mesmo em componentes de porte intermediário (vasos PWR com espessura de parede igual a 130mm por exemplo [1]).

Dentre as técnicas comumente aplicadas na tarefa do levantamento das curvas J-R e, por decorrência, dos diagramas J-T, estão as de múltiplos corpos de prova [3], de queda do potencial elétrico [4] e principalmente a de variação da flexibilidade elástica [5]. A de múltiplos corpos de prova, embora seja de simples execução e tenha servido como padrão para a verificação da validade e precisão das técnicas mais avançadas, tem grandes desvantagens, tais como a de ser muito susceptível às não-homogeneidades microestruturais inerentes aos materiais, bem como de ser muito consumidora de tempo e material, não sendo portanto indicada como método de ensaios de rotina [6-8]. Com relação às técnicas mais sofisticadas de flexibilidade elástica e de potencial elétrico, embora reduzam drasticamente o consumo de tempo e material ensaiado, possuem certas desvantagens que podem até mesmo inviabilizá-las em determinadas ocasiões. É amplamente reconhecido [9,10] o efeito deletério da plasticidade do material ensaiado e das consequentes variações dimensionais do corpo de prova, em ambas a técnicas, reduzindo a capacidade de predição de comprimentos de trinca pelas mesmas, o que se acentua à medida em que se produzem maiores extensões relativas de trinca ($\Delta a_p/b_0$). Em adição, no caso específico da técnica de flexibilidade elástica, existem alguns questionamentos com relação aos efeitos da aplicação dos ciclos de descarregamento/recarregamento parciais na indução de propagação de trinca por fadiga de baixo ciclo (altas deformações) [11]; também, o caráter descontínuo na aplicação da carga (via controle de deslocamento ou deformação), inerente à própria técnica, tem sido suposto produzir avaliações duvidosas do parâmetro elasto-plástico integral-J [12]. Ainda com relação à essa técnica, a inexistência de extensômetros ("clip-gages") comercialmente disponíveis que possuam grandes capacidades de abertura, e consequentemente permitam grandes extensões de trincas, limitam a sua aplicabilidade aos materiais menos tenazes e aos corpos de prova de menor porte, que não refletem o comportamento real de fratura dos componentes estruturais mais

robustos. Os ensaios via flexibilidade elástica e potencial elétrico são também limitados por fatores que incluem taxa de carregamento, temperatura de ensaio e agressividade do ambiente onde se realizam os mesmos [9,13]. Finalmente cabe ressaltar os altos custos de implementação de ambas as técnicas, que por vezes é muito superior à disponibilidade dos laboratórios mais simples de Mecânica da Fratura.

No intuito de eliminar estes obstáculos tem havido recentemente um grande progresso no desenvolvimento de técnicas essencialmente analíticas para o levantamento de curvas J-R para qualquer nível de extensão dúctil de trinca, as denominadas técnicas de normalização. Elas se baseiam no princípio amplamente validado da separação da carga mecânica [14], onde a carga pode ser explicitada em termos de duas expressões multiplicativas separadas, funções do comprimento da trinca e da correspondente deformação plástica, melhor traduzida em termos do deslocamento plástico aplicado ao corpo de prova. Landes et alii [15] desenvolveram de início um método de normalização que utiliza três constantes de ajuste ("função LMN") e requer portanto a avaliação das mesmas em três distintos pontos de calibração nos quais a carga, o deslocamento aplicado e o comprimento resultante de trinca têm que ser simultaneamente conhecidos. A subjetividade intrínseca à avaliação do ponto intermediário entre a iniciação e o final do processo de rasgamento dúctil da trinca, assim como a problemática da detecção do ponto de iniciação da propagação dúctil da trinca (em virtude dos complexos fenômenos de arredondamento e estiramento da ponta da trinca original de fadiga, típicos dos materiais mais tenazes), associados à limitação da aplicação do método somente aos materiais metálicos que seguem o comportamento de fluxo ditado pela lei de Ramberg-Osgood (ou seja, com comportamento aproximando o elástico-perfeitamente plástico), parecem ter se transformado em obstáculos intransponíveis ao método de ajuste LMN. Mais recentemente, Reese & Schwalbe [16] propuseram um procedimento mais simples denominado normalização linear, onde, ao invés de correlacionarem a carga mecânica normalizada ao deslocamento plástico normalizado, tal como o fizeram Landes et alii [15], optaram pela correlação entre o gradiente de carga normalizada (ΔP_N), devida ao crescimento dúctil da trinca, e o nível de extensão dessa última (Δa_p). A vantagem desse método sobre o de Landes et alii está basicamente no fato dele necessitar somente de dois pontos de ajuste, o primeiro estando vinculado ao início do rasgamento dúctil (o qual é suposto se dar na carga máxima suportada pelo corpo de prova - uma hipótese razoável principalmente em se tratando de cps de porte laboratorial [17]) e o segundo à carga final do ensaio e portanto à máxima propagação dúctil gerada no mesmo. Reese & Schwalbe obtiveram excelentes correlações de dados de propagação dúctil de trincas em ligas metálicas e materiais compósitos com matriz polimérica, para diversas geometrias e tamanhos de corpo de prova e sob condições de grandes extensões de trinca (de até 20% do comprimento do ligamento original dos corpos de prova).

No presente trabalho é realizada uma avaliação da técnica de normalização linear, desenvolvida por Reese & Schwalbe [16], tendo-se como padrão a técnica de variação da flexibilidade elástica. Os ensaios são conduzidos dentro de intervalos bem

limitados de condições que incluem relativamente baixas temperaturas, taxa de carregamento, pequeno tamanho dos corpos de prova, poucos ciclos de descarregamento/recarregamento, baixos níveis de descarregamento parcial e relativamente pequeno deslocamento máximo de abertura da trinca, quando a técnica de flexibilidade elástica comprovadamente produz resultados confiáveis (tal como verificado pela comparação das predicções de propagação por meio da mesma e aquelas visualmente observadas na superfície de fratura do corpo de prova), de tal forma a permitir a validação do procedimento de comparação entre os resultados de ambos os métodos. O principal objetivo deste estudo é a comprovação definitiva da irrestrita aplicabilidade desta recente técnica de normalização, que pode ser de vital importância em avaliações de integridade estrutural de componentes metálicos de elevadas tenacidade e ductilidade, solicitados sob condições que incluam grandes deslocamentos de abertura de trinca e elevadas temperaturas, quando a utilização da variação da flexibilidade elástica e queda do potencial elétrico não têm se mostrado satisfatória.

2 - Material e Corpos de Prova

Foram utilizados neste estudo 3 corpos de prova compactos padrão-proporcionais (CT[S], W/B=2) com 1 polegada de espessura (1TCT) e entalhes laterais de 8 e 21%, extraídos segundo a orientação ST da região de centro de uma placa de aço ASTM A508-Classe 3A, forjada com espessura de 130mm e fabricada especificamente para a construção de vasos nucleares PWR de porte intermediário e pequena potência. O material foi ensaiado na condição de como-recebido, quando apresenta elevadíssimas ductilidade e tenacidade, tal como reveladas por sua excepcional energia do patamar superior de tenacidade Charpy, muito superior a 300J, e por sua baixíssima temperatura de transição de ductilidade nula, da ordem de -70°C , ambas obtidas em cps de orientação e posicionamento idênticos àqueles dos cps de tenacidade J. Os cps de tenacidade J foram pré-trincados em fadiga à temperatura ambiente, anteriormente à introdução dos entalhes laterais (caso contrário seria praticamente impossível o monitoramento visual de sua regularidade ao longo da espessura do cp), sob uma razão de carga $R=0,1$, com $K_{M\text{ÁX}}$ da ordem de $20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, à uma frequência de 50Hz, até um comprimento relativo de trinca (a_0/W , onde W é a largura do cp) próximo a 0,6. A composição química básica do aço denominado E6311, na região amostrada pelas trincas, e as suas propriedades mecânicas convencionais de tração monotônica (segundo a orientação S e nas temperaturas ambiente e 175°C), nessa mesma região, são dadas respectivamente nas Tabelas I e II.

Os corpos de prova de tenacidade J, identificados como JRT4, 5 (ambos com entalhes laterais de profundidade da ordem de 21% da espessura bruta, B, dos cps) e 6 (com 8%), são mostrados na Figura 1, onde observa-se o posicionamento das lâminas de fixação do extensômetro (tipo "clip-gage") exatamente na linha de carga dos corpos de prova 5 e 6, de tal forma a aproveitar-se o potencial máximo de abertura do mesmo. O dispositivo acoplado ao corpo de prova JRT4 foi desenvolvido especialmente para permitir rezeragens do extensômetro, porém não foi utilizado nesse estudo pois o "software" MTS 759.50 não permite tais ajustes.

3 - Procedimentos Experimental e Analítico

Os ensaios de tenacidade J segundo a técnica de variação da flexibilidade elástica dos cps foram conduzidos (sob controle de deslocamento de abertura da trinca) de acordo com a norma ASTM-E813/87 [18] em um sistema universal de ensaios mecânicos MTS modelo 810 totalmente computadorizado, nas temperaturas ambiente (corpos de prova JRT5 e 6) e a 175°C (cp JRT4), que é a máxima temperatura de operação dos extensômetros tipo "clip-gage" comercialmente disponíveis, sob uma taxa de carregamento de 0,5mm/min. Foi aplicada uma sequência idêntica de aproximadamente 50 ciclos de descarregamentos/recarregamentos parciais, regularmente distribuídos ao longo dos 12mm de abertura máxima dos extensômetros MTS modelo 632.03F classes 30 e 31, em todos os cps, com os descarregamentos limitados a 15% da carga instantânea de modo a se evitarem efeitos de fadiga e influências no valor de J.

Na Figura 2 são mostrados os cps JTR4, 5 e 6 imediatamente após os ensaios de J, onde observam-se idênticos deslocamentos finais de abertura de trinca.

A conversão dos valores J segundo a norma E813/87, fornecidos pelo "software" 759.50 versão 2.0A desenvolvido pela MTS, em valores J segundo a norma ASTM de curvas J-R, E1152/87 [19], foi realizada ponto a ponto por meio de processo manual de correção para o crescimento dúctil da trinca.

Utilizando-se ainda os diagramas de carga versus deslocamento resultantes da técnica de flexibilidade elástica, ou seja, contendo todos os ciclos de descarregamentos/recarregamentos parciais, e seguindo-se a norma E1152 em associação ao procedimento analítico didaticamente descrito por Reese & Schwalbe [16], obtiveram-se os pontos de dados para o levantamento das curvas J-R para os 3 corpos de prova segundo a técnica da normalização linear. Todas as curvas J-R foram então ajustadas por lei de potência [18], tal como convencionalmente adotado pela unanimidade dos trabalhos publicados nessa área.

Finalmente, por meio da definição de módulo de rasgamento, T [20], foram literalmente derivadas as respectivas curvas J versus T, as quais são reconhecidamente mais sensíveis que as curvas J-R originais, detectando de modo muito mais eficiente as influências de variáveis de ensaio, de obtenção e de ajuste de dados de tenacidade J [6,21]

4 - Resultados e Interpretação

Na Figura 3 são mostradas as superfícies de fratura dos cps JRT4, 5 e 6, onde observa-se o efeito da introdução dos entalhes laterais de grande profundidade (21% da espessura bruta para os cps JRT4 e 5) na geração de frentes retas ("straight fronts") de propagação dúctil de trinca e baixos níveis de mudança dimensional ao longo da espessura dos cps, tal como se espera ocorrer durante o crescimento de uma trinca em um componente estrutural robusto [23]. Na verdade, para tais níveis de entalhamento lateral obtém-se uma leve inversão do tunelamento para relativamente grandes extensões dúcteis de trinca [1,22], o que conduz a curvas J-R mais conservativas, indicando que o tunelamento é anulado para um valor abaixo porém bem próximo aos

21% da espessura bruta do cp. Sabendo-se que os três cps foram carregados identicamente até um dado nível de deslocamento de abertura da trinca, e que as trincas iniciais de fadiga tinham comprimentos muito próximos entre si, a simples comparação entre os perfis e níveis de propagação dúctil apresentados na Figura 3 permite prever com antecedência que a curva J-R relativa ao cp JRT4 é a mais conservativa dentre todas as três e, inversamente, a do cp JRT6 é a mais liberal.

Na Figura 4 são então apresentadas as curvas J-R para todos os cps e segundo ambas as técnicas de variação da flexibilidade elástica e normalização linear. Para qualquer dos 3 cps a técnica de normalização linear sempre produz um resultado de curva J-R mais conservativo quando comparada àqueles obtidos via flexibilidade elástica. A razão para a geração de curvas mais conservativas através da técnica de normalização linear, quando comparadas às obtidos via flexibilidade elástica, parece estar vinculada não somente ao fato de esta última técnica tender a produzir valores subestimados de propagação dúctil de trinca (da ordem de 10,2% para o cp JRT5 e de 15,8% para o JRT6, em virtude do maior efeito de fechamento de trinca na ausência de entalhes laterais e à temperatura ambiente, enquanto que para o cp JRT4 verificou-se uma leve superestimativa de apenas 1,5%), mas também e principalmente ao fator de correção para o crescimento dúctil de trinca tal como expresso na norma E1152/87 [19]. Assim, devido ao fato dessa técnica de normalização detectar na carga máxima já uma quantidade acumulada de crescimento dúctil de trinca, algo próximo de 1,5mm para todos os cps aqui considerados (o que vai em oposição a hipótese básica da iniciação do rasgamento se estabelecer na carga máxima - ítem 1-, mas que porém parece não se constituir em um problema quando se trabalha com relativamente grandes níveis de propagação de trinca, de 20 a 40% do ligamento original do cp nos casos aqui estudados), o termo de correção (na verdade de redução) exerce forte influência já sobre o primeiro ponto da curva J-R obtida pela técnica de normalização (exatamente na carga máxima suportada pelo cp), a qual, influência, se faz sentir por toda a curva restante visto que o processo de cálculo dos pontos de dados (Δa_p , J) é essencialmente iterativo. Por sua vez, a técnica de flexibilidade elástica já inicia a detecção de crescimento de trinca anteriormente ao estabelecimento da carga máxima, permitindo assim que as correções sejam efetuadas parcimoniosamente ao longo de toda curva J-R.

Na Figura 4 está plotada em adição uma curva J-R obtida segundo a técnica de normalização linear, para um corpo de prova idêntico ao JRT4, denominado JRT3, e ensaiado à mesma temperatura e taxa de carregamento, a menos de que o carregamento foi realizado de modo contínuo, ou seja, sem a aplicação dos sucessivos ciclos de descarregamento/recarregamento parciais impostos a JRT4. A boa identidade entre as respectivas curvas J-R possibilita o entendimento de que, em princípio, e nas condições em que se realizaram tais experimentos, não ocorreu uma influência detectável em termos macroscópicos dos ciclos de carga e deslocamento tanto no valor de J quanto no de Δa_p .

A comparação entre as curvas dos cps JRT4 e 5, para qualquer das técnicas utilizadas no seu levantamento, mostra o efeito negativo da temperatura, no intervalo de temperaturas analisado, no sentido de reduzir a capacidade do aço E6311 em resistir à propagação dúctil de trincas, em decorrência certamente dos efeitos de

envelhecimentos estático e dinâmico, fenômenos típicos dos aços ferríticos de grau nuclear a partir dos 150°C [1,24].

Os pontos de dados experimentalmente obtidos para o cp JRT4 (via flexibilidade elástica e normalização linear), e mesmo para o cp JRT3 (normalização linear), mostram uma tendência à revelação de um efeito que convencionou-se denominar "saturação de J", quando, ultrapassado o limite de aplicabilidade da correção do valor de J para o crescimento dúctil da trinca [23], o que ocorre invariavelmente para níveis de propagação da ordem dos 50% do ligamento original do corpo de prova [1,25], existe uma irreversibilidade no sentido da estabilização do valor de J, ou mesmo no da sua redução [26], que por sua vez conduzem respectivamente a módulos de rasgamento, T, nulos e negativos. A partir dessa observação fica nítida a incapacidade do ajuste de dados via lei de potência em correlacionar de maneira adequada os dados sob influencia da saturação de J; de fato, parece que ajustes logarítmicos forneceriam indubitavelmente muito melhores coeficientes de correlação que os obtidos por lei de potência [1], e provavelmente seriam de vital importância nos procedimentos de extrapolação de dados para além daqueles experimentalmente determinados. A utilização de ajuste logarítmico de dados, especificamente ao caso do cp JRT4, onde produziu-se a maior propagação relativa e, obviamente, absoluta de trinca, poderia inclusive, em princípio, levando-se em consideração a disposição dos respectivos pontos de dados (Δa_p , J) produzir resultados mais semelhantes de curvas J-R segundo as técnicas de flexibilidade e de normalização, e mesmo uma curva mais conservativa para a primeira delas.

Finalmente na Figura 5 são apresentados os respectivos diagramas J-T, utilizados na avaliação do grau de estabilidade de trincas em componentes estruturais de elevada responsabilidade (em especial vasos PWR [1,23,27]). Observa-se de modo geral a mesma tendência apresentada nas análises das curvas J-R, a menos de que, para maiores valores de J que o exibido naquela ocasião (na obtenção das curvas J-T foram efetuadas extrapolações de dados de propagação para além dos experimentalmente determinados), existe a inversão de comportamento com a geração de uma curva mais conservativa para o cp JRT5 segundo a técnica de flexibilidade elástica frente aquela obtida por normalização linear. No entanto, o efeito é de baixa intensidade para os valores J tipicamente utilizados nas avaliações de integridade estrutural de componentes nucleares de tamanho intermediário e para os comprimentos de trinca de interesse, os quais, valores J, se situam invariavelmente abaixo dos 5000kJ/m² [1,27].

A definição básica do módulo de rasgamento, T, de derivada da curva J-R, permite que as análises efetuadas no espaço J-T sejam muito mais sensíveis para os estágios iniciais de propagação de trincas (ou seja, baixos valores de J e elevados valores de T), quando comparadas àquelas realizadas no espaço J- Δa_p , indicando, nas curvas aqui consideradas, a maior influência, de modo geral, tanto da temperatura, quanto da introdução de entalhes laterais mais profundos, ou mesmo de ambos, na resistência inicial à propagação da trinca, sendo que esses efeitos vão se amenizando à medida em que a trinca dúctil avança. Também, agora mais especificamente, a técnica de variação da flexibilidade elástica parece ser mais susceptível a variações de temperatura durante a iniciação do rasgamento da trinca, diminuindo essa sensibilidade à medida em que a trinca se estende; por sua vez, a técnica de normalização linear

mantem a mesma capacidade de detecção do efeito da temperatura ao longo de todo o processo de crescimento da trinca. Por fim, a técnica de flexibilidade é notada ser muito mais sensível à presença de entalhes laterais que a de normalização linear.

5 - Conclusões

1 - A técnica de normalização linear sempre produz, para ajustes de curvas J-R por lei de potência, resultados mais conservativos que aqueles obtidos via flexibilidade elástica. Os motivos para tal fato são a tendência da técnica de flexibilidade elástica subavaliar o crescimento de trinca, bem como o mais intenso efeito de correção de J para o crescimento dúctil de trinca na técnica de normalização linear; pois o primeiro ponto de dados por ela detectado já inclui uma quantidade acumulada razoável de crescimento dúctil de trinca;

2 - A técnica de variação da flexibilidade elástica tende a produzir curvas J-R mais liberais (íngremes) na presença de efeitos de fechamento de trinca; a subestimativa do nível de crescimento de trinca por meio dessa técnica se intensifica à medida em que se reduz a profundidade dos entalhes laterais e em que se caminha a partir dos 175°C (quando são observadas perdas de ductilidade e tenacidade do aço E6311 devidas a efeitos de envelhecimentos estático e dinâmico por deformação) até a temperatura ambiente. Desse modo, os efeitos de fechamento são creditados tanto à rugosidade da superfície de propagação dúctil quanto às bordas laterais remanescentes do corpo de prova;

3 - A eliminação do tunelamento da frente de propagação monotônica da trinca dúctil se dá para um grau de entalhamento lateral da ordem de, mas menor que, 21% da espessura bruta de corpos de prova CT[S] com uma polegada de espessura (1TCT);

4 - Não foram observadas influências macroscopicamente mensuráveis do número e nível dos ciclos de descarregamento/recarregamento parciais no valor de J e mesmo em Δa_p ;

5 - O desenvolvimento de envelhecimento por deformação no aço E6311 na temperatura de 175°C, invariavelmente acompanhado por redução de ductilidade e tenacidade à fratura, indica que um pico de máximo de tenacidade J existe no intervalo definido pela temperatura ambiente e 175°C. Assim, para temperaturas inferiores à ambiente, clivagem deve ser o mecanismo limitante da tenacidade J, enquanto que a temperaturas próximas e acima de 175°C o fator limitante de J é o envelhecimento (estático e/ou dinâmico) por deformação;

6 - O fenômeno da saturação de J, que se desenvolve tipicamente quando se trabalha com verdadeiras curvas J-R corrigidas para o crescimento dúctil de trincas e se impõem grandes propagações relativas de trincas (geralmente da ordem dos 50%), faz crer que, especificamente nesses casos, um ajuste logarítmico, ao invés dos convencionalmente adotados utilizando-se lei de potência, produziria resultados mais confiáveis e maiores correlações de dados de propagação. A adoção de ajuste logarítmico em tais circunstâncias tende, em princípio, à geração de curvas J-R mais semelhantes entre as duas técnicas aqui utilizadas, e pode até mesmo inverter a tendência da técnica de flexibilidade elástica produzir resultados mais liberais;

7 - Os diagramas J-T realmente permitem análises mais apuradas (particularmente para os estágios iniciais de crescimento de trinca) dos efeitos das técnicas de obtenção e de ajuste de dados de propagação de trincas, assim como são muito mais sensíveis que as curvas J-R originais a variáveis de ensaio tais como temperatura e grau de entalhamento dos corpos de prova;

8 - A técnica de variação de flexibilidade elástica mostrou-se mais susceptível a variações de temperatura e de profundidade dos entalhes laterais, quando comparada à técnica de normalização linear.

Agradecimentos - Os autores são gratos à FAPESP pela bolsa de estudo de doutorado de José Ricardo Tarpani (Processo 91/3925-4), e à Eletrometal S/A Metais Especiais pelo fornecimento do aço E6311.

Tabela I - Composição química básica do aço E6311 na porção central da espessura da placa forjada (% em massa).

C	Si	Mn	Ni	Mo	Cu	Al _(sol)	Al _(insol)	P	S
0,18	0,24	1,28	0,73	0,50	0,03	0,019	0,005	0,006	0,008

Tabela II - Propriedades mecânicas de tração monotônica do aço E6311 segundo a orientação S na região de centro da espessura da placa., às temperaturas ambiente e de 175°C.

TEMPERATURA	E (GPa)	S _E (MPa)	S _R (MPa)	A _F ¹ (%)	Φ _F (%)	ε _u (%)	ε _F (%)
AMBIENTE	197	423	564	28	75	11	139
175°C	207	384	519	23	73	9	130

¹Lo=4Do=35mm

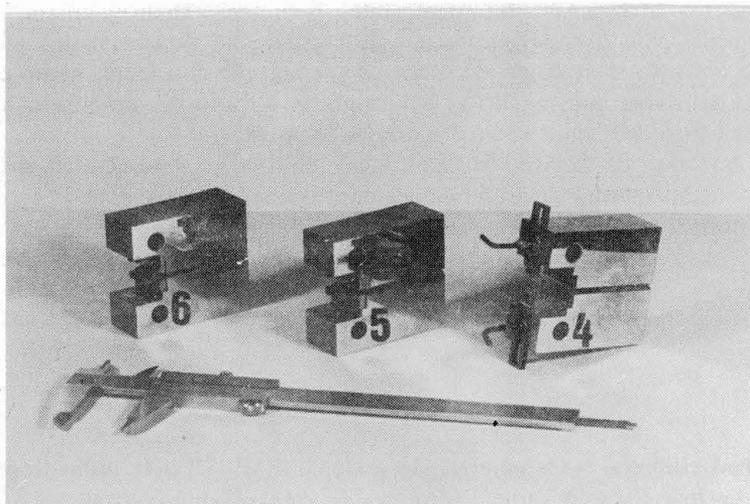


Figura 1 - Corpos de prova compactos CT[S], padrões-proporcionais ($W/B=2$), com 1 polegada de espessura (1TCT), com entalhes laterais de profundidade da ordem de 21% (JRT4 e 5) e 8% (JRT6) da espessura bruta dos cps, ensaiados em tenacidade J (JRT4 a 175°C e JRT5 e 6 à temperatura ambiente).

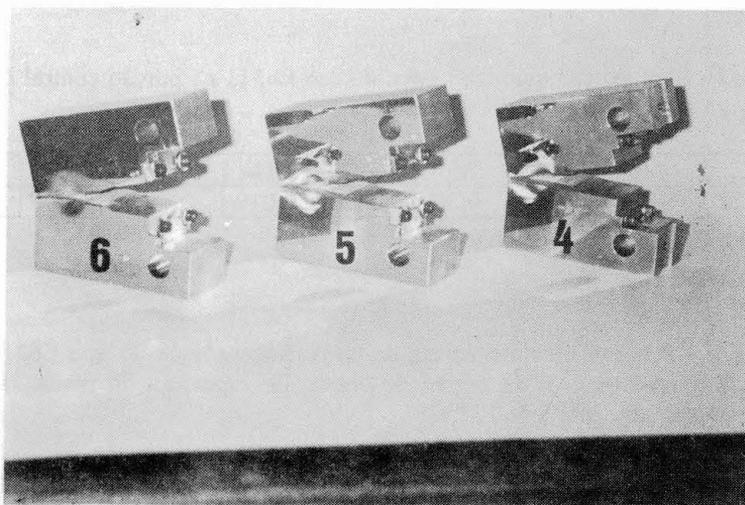


Figura 2 - Corpos de prova JRT4, 5 e 6, imediatamente após os ensaios de tenacidade J, quando sofreram idêntico deslocamento máximo de abertura da trinca.

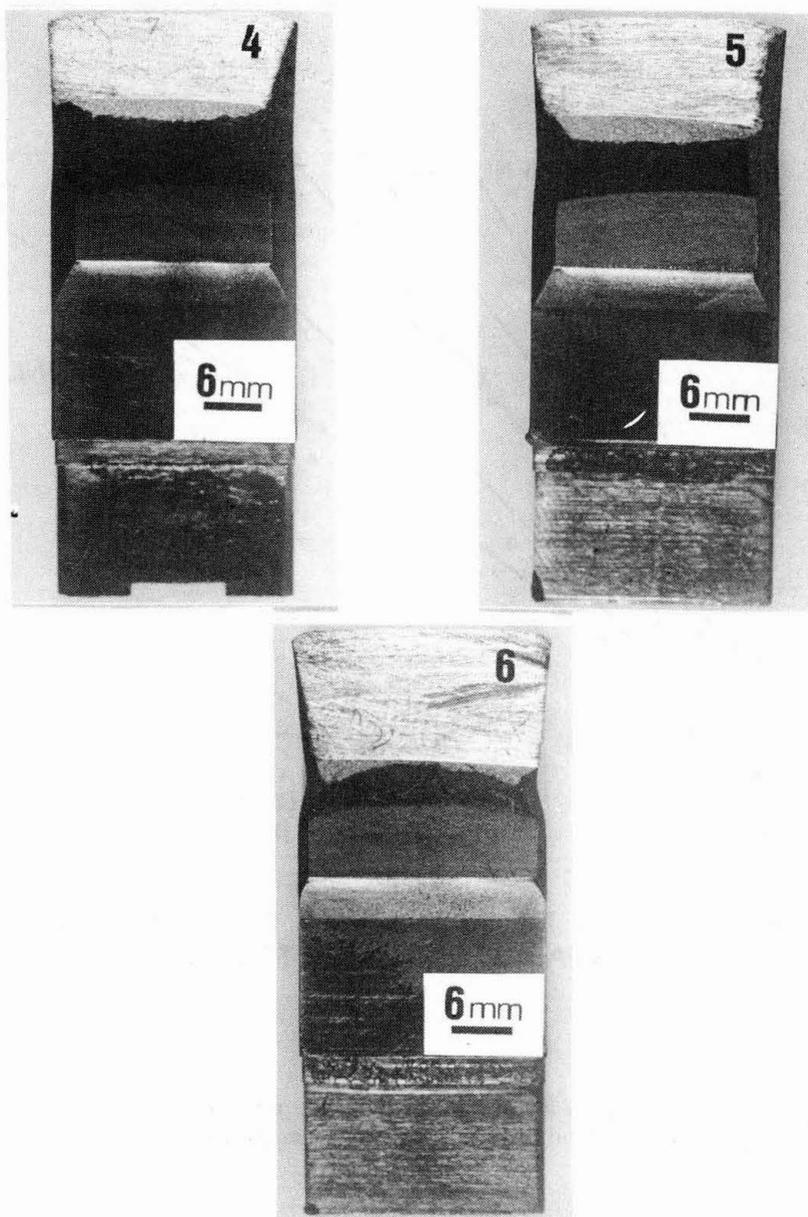


Figura 3- Superfícies de fratura dos cps JRT4, 5 e 6 após o procedimento de oxidação seletiva ("heat tinting") para demarcação das superfícies de fratura dúctil.

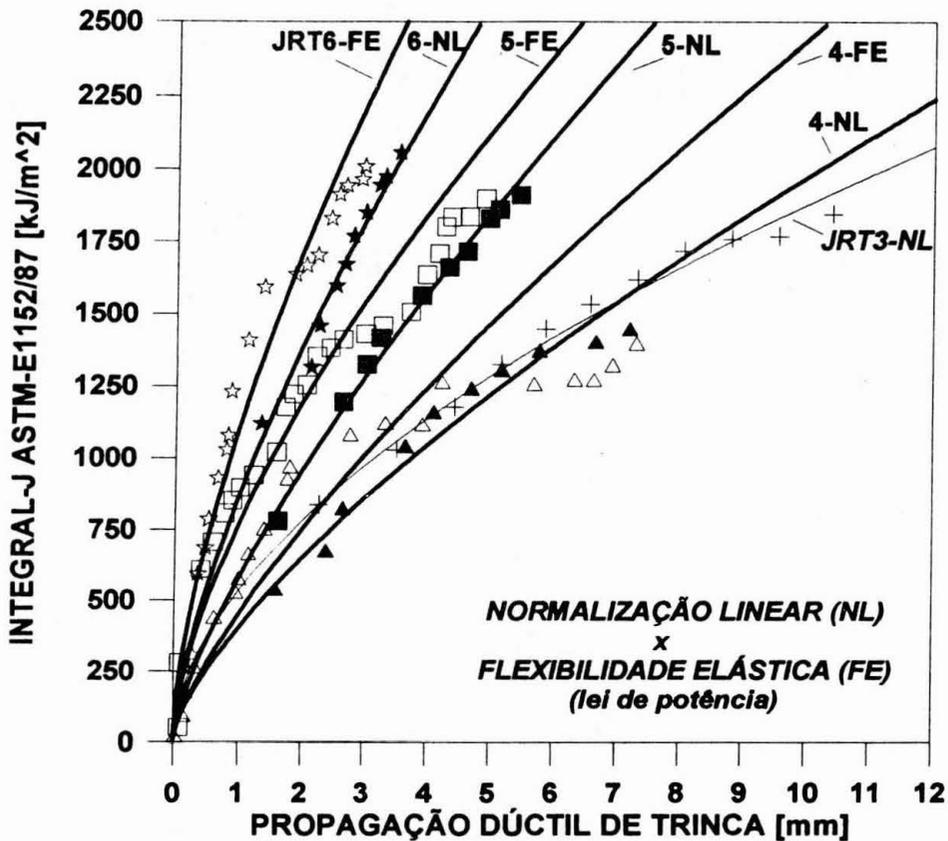


Figura 4 - Curvas J-R ajustadas por lei de potência, obtidas segundo as técnicas de variação da flexibilidade elástica e de normalização linear.

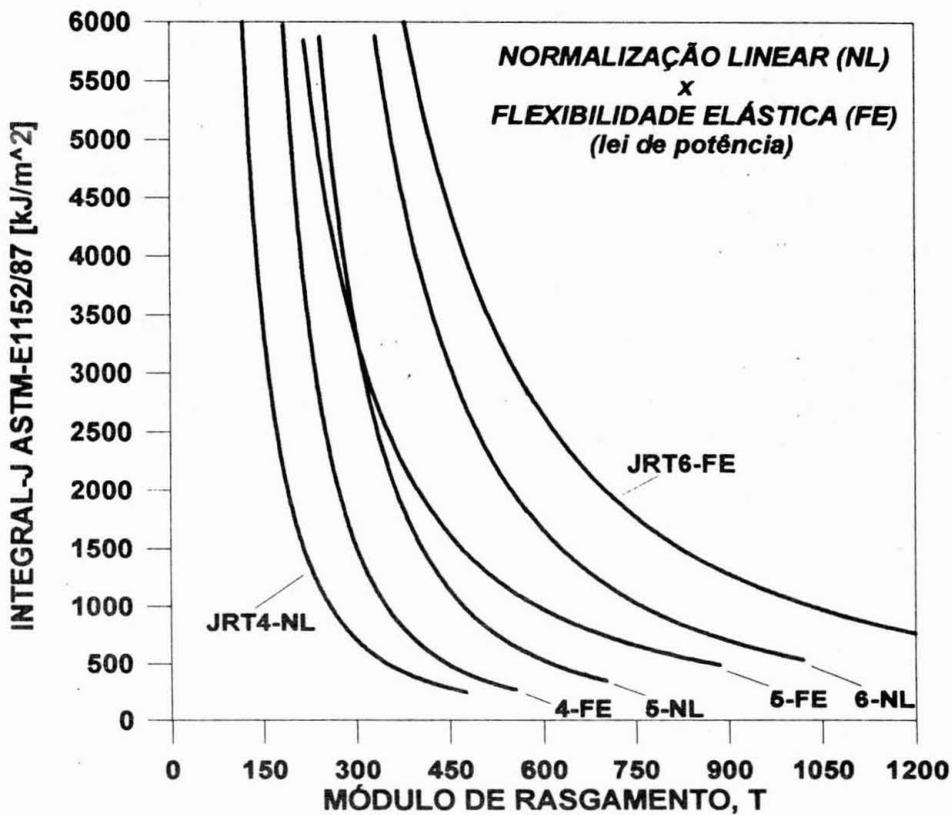


Figura 5 - Curvas J-R da figura 4 replotadas em diagramas no espaço J-T.

Referências Bibliográficas

- [1] TARPANI, J.R., Avaliação da estabilidade de trincas em componentes estruturais através do parâmetro de tenacidade elasto-plástica integral-J e comparação com resultados obtidos via mecânica da fratura elástica linear, *Tese de Doutorado*, Jan.1992, Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, tese em andamento.
- [2] WILKOWSKI, G. M., MARSCHALL, C. W., and LANDOW, M. P., Extrapolation of C[T] specimen J-R curves, *Fracture Mechanics: Twenty First Symposium, ASTM STP (Special Technical Publication) 1074*, J.P. Gudas, J.A. Joyce and E.M. Hackett, Eds., American Society of Testing and Materials, Philadelphia, p.56-84, 1990.
- [3] LANDES, J. D. and BEGLEY, J. A., Test results from J- integral studies: an attempt to establish a J_{Ic} testing procedure. *Fracture Analysis, ASTM STP 560*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.170-186, 1974.
- [4] OKUMURA, N., VENKATASUBRAMANIAN, T. V., UNVALA, B. A., and BAKER, T. J., Application of the AC potential drop technique to the determination of R-curves of tough ferritic steels, *Engineering Fracture Mechanics*, v.14, p.617-625, 1983.
- [5] CLARKE, G. A., ANDREWS, W. R., PARIS, P. C., and SCHIMIDT, D. W., Single specimen tests for J_{Ic} determination, *Mechanics of Crack Growth, ASTM STP 590*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.27-42, 1976.
- [6] TARPANI, J. R., Curvas de resistência à propagação estável de trincas sob condições de tensão plana tendo como parâmetro de tenacidade a integral-J, *Dissertação de Mestrado*, Departamento Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 125pg, setemb.1991.
- [7] CLARKE, G. A. and LANDES J. D., Toughness testing of materials by J-integral techniques, *Toughness Characterization and Specification for HSLA Steels, Conference Proceedings of AIME*, G. A. Clarke and J. D. Landes, Eds, p.79-111, 1977.
- [8] WILLOUGHBY, A. A. and GARWOOD, S. J, On the unloading compliance method of deriving single-specimen R-curves in three point bending, *Elastic- Plastic Fracture: Second Symposium, v. II - Fracture Resistance Curves and Engineering Applications, ASTM STP 803*, C.F. Shih and J.P. Gudas. Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.372-397, 1983.
- [9] MARSCHALL, C.W., HELD, P. R., LANDOW, M. P., and MINLER, P. N., Use of the direct-current electric potential method to monitor large amounts of crack growth in highly ductile metals, *Fracture Mechanics: Twenty-First symposium, ASTM STP 1074*, J. P. Gudas, J. A. Joyce and

- E. M. Hackett, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.581-593, 1990.
- [10] NEALE, B. K. and PRIEST, R. H., The unloading compliance method for crack length measurement using compact tension and precracked charpy specimens, *Elastic-Plastic Fracture Test Methods: The User's Experience*, ASTM STP 856, E.T. Wessel and F. J. Loss, Eds., American Society for Testing, p.375-393, 1985.
- [11] KAISER, S., On the relation between stable crack growth and fatigue, *Fatigue of Engineering Materials*, v.6, n.1, p.32-38, 1983.
- [12] KROMPHOLZ, K. and ULLRICH, G., Determination of J-integral R-curves for the pressure vessel material A533 B1 using the potential-drop technique and the multispecimen method, *Engineering Fracture Mechanics*, v. 23, n.5, p.803-820, 1986.
- [13] SAXENA, A. and HUDAK, S. J. Jr., Review and extension of compliance information for common crack growth specimens, *International Journal of Fracture*, v.14, n.5, p.453-468, Oct.1978.
- [14] ERNST, H. A., PARIS, P. C., and LANDES, J. D., Estimations on J-integral and tearing modulus T from a single-specimen test record, *Fracture Mechanics: Thirteenth Conference*, ASTM STP 743, Richard Roberts, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.476-502, 1981
- [15] LANDES, J. D., ZHOU, Z., LEE, K., and HERRERA, R., Normalization method for developing J-R curves with the LMN function, *Journal of Testing and Evaluation*, v.19, n.4, p.305-311, 1991.
- [16] REESE, E. D. and SCHWALBE, K. -H., The linear normalization technique - an alternative procedure for determining J-R curves from single specimen test record based on Landes' normalization method, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, v. 16, n.3, p.271-280, 1993.
- [17] HERRERA, R. and LANDES, J. D. A direct J-R curve analysis of fracture toughness test, *Journal of Testing and Evaluation*, v.16, n.5, p.427-449, 1988.
- [18] Standard test method for "J_{IC}, a measure of fracture toughness", *Annual Book of American Society for Testing and Materials*, Section 3, v. 03.01, Designation E813-89, p.713-727, 1991.
- [19] Standard test method for "determining J-R curves", *Annual Book of American Society Testing and Materials Standards*, Section 3, v. 03.01, Designation E1152-87, p.825-835, 1991
- [20] PARIS, P.C., TADA, H., ZAHOR, A. and ERNST, H. A., The theory of instability of tearing mode of elastic-plastic crack growth, *Elastic-Plastic Fracture*, ASTM STP 668, J. D. Landes, J.A. Beley, and G. A. Clarke, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.5-36, 1979
- [21] ERNST, H. A., SCHWALBE, K. -H., HELLMAN, D., and McCABE, D. E., Modified J, J_m, resistance Curves under plane stress conditions, *International Journal of Fracture*, v.37, p.83-100, 1988.

- [22] VASSILAROS, M. G., JOYCE, J. A. and GUDAS, J. P., Effects of specimen geometry on the J-R curve for ASTM A533B steel, *Fracture Mechanics: Twelfth Conference, ASTM STP 700*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.251-270, 1980.
- [23] LOSS, F. J. MENKE, B. H., HISER, A. L., and WATSON, H. E., J-R curves characterization of irradiated low-shelf nuclear vessel steels, *Elastic-Plastic Fracture: Second Symposium, v.II - Fracture Resistance Curves and Engineering Applications, ASTM STP 803*, C. F. Shih and J. P. Gudas, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.777-795, 1983
- [24] KUHNLE, V. and RIEDEL, H. , Time-dependent deformation and fracture of steel between 20C and 400C, *International Journal of Fracture*, v.34, p.179-194, 1987.
- [25] CAYARD, M. S. and BRADLEY, W. L., A comparison of several analytical techniques for calculating J-R curves from load-displacement data and their relation to specimen geometry, *Engineering Fracture Mechanics*, v.33, n.2, p.121-132, 1989.
- [26] KRAMER, G. S. and PAPASPYROPOULOS, V., A study of the initiation and growth of complex cracks in nuclear piping under pure bending, *Nonlinear Fracture Mechanics: Volume II - Elastic-Plastic Fracture, ASTM STP 995*, J. D. Landes, A. Saxena, and J. G. Merkle, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.433-453, 1989.
- [27] TANG, S. S., RICCARDELLA, P. C., and HUET, R., Verification of tearing modulus methodology for application to reactor pressure vessel with low-shelf toughness, *Elastic-Plastic Fracture: Second Symposium, v.II - Fracture Resistance and Engineering Applications, ASTM STP 803*, Shih and J. P. Gudas, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.156-178, 1983.

ON THE ASSESSMENT OF THE LINEAR NORMALIZATION TECHNIQUE FOR DERIVING J-R CURVES

Abstract: In this work, the most recent analytical technique of normalization used to determine J-R curves was evaluated using as a reference the results obtained according to the well known elastic compliance technique. Side-grooved compact proportional-standard specimens, one inch thick, taken from an ASTM A508-Class 3A nuclear grade steel forged plate in ST orientation were used. Testing were conducted at room temperature and at 175°C under strain-rate of 0,5mm/min in a MTS universal testing system fully automated. The results showed the healthy conservatism of J-R curves produced following the linear normalization technique and through power law data fit as well as the tendency to the generation of more liberal curves by means of the elastic compliance technique under conditions where crack closure effects are present. More accurate analysis was carried out using correspondent J-T diagrams, where the effects of temperature (strain-aging) and of the amount of side-grooving on the specimens are best verified for both approaches. The use of logarithmic fit on crack growth data for the cases in which the traditional power-law does not produce satisfactory results is suggested; which includes the development of the J-saturation phenomenon.

Key-Words: J-R curve, linear normalization, elastic compliance

