

OBTENÇÃO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÕES EM UM CILINDRO COM TRINCA SUBMETIDO A PRESSÃO INTERNA.

Marcelo Aparecido da Silva

ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – Cep. 12228-900 – São José dos Campos – S.P., marcelosilva@pqu.com.br

Maher Nasr Bismarck-Nasr

ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – Cep. 12228-900 – São José dos Campos – S.P., bismarck@aer.ita.cta.br

Resumo. *Durante os processos de inspeções e avaliações de integridade, cabe ao engenheiro decidir sobre a rejeição ou aprovação de defeitos encontrados em uma estrutura.*

Nestas circunstâncias, a padronização de procedimentos vinculados a mecânica da fratura, tende a aumentar a disponibilidade operacional, reduzir o número de intervenções e garantir auto grau de segurança.

Desta forma, apresentamos neste texto, dois procedimentos para determinação do fator de intensidade de tensões. Primeiramente será utilizado a Norma Britânica (BS-7910, 1999), posteriormente o fator de intensidade de tensões será obtido através do método de elementos finitos. Os resultados são comparados e discutidos possibilitando assim, razoável contribuição nas avaliações pela mecânica da fratura.

Palavras Chave. *Mecânica da fratura, método direto e indireto, elementos finitos, procedimento de análise, trinca superficial interna.*

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de se prever falhas em componentes mecânicos é de fundamental importância na concepção de projetos e avaliações de integridade no dia-a-dia do engenheiro.

Em muitos casos, a garantia da integridade estrutural está diretamente voltada não somente a continuidade operacional, mas sim à saúde, segurança e preservação do meio ambiente.

A grande variedade de materiais associada a elevados níveis de continuidade operacional, complicadas geometrias, defeitos estruturais com origens nos processos de fabricação e defeitos nucleados durante a operação da estrutura, tendem a dificultar ainda mais a árdua tarefa de se prever falhas em estruturas.

No tocante aos custos envolvidos, a previsão de falhas ou monitoramento de defeitos permite elaborações em elevados níveis de precisão de trabalhos voltados a planejamentos estratégicos, considerando necessidades técnicas, operacionais e de mercado.

Desta forma, a necessidade de se estabelecer um processo de dimensionamento e de análise com ênfase à precisão de resultados e roteiros de cálculos práticos para uso industrial torna-se fundamental.

Assim, normas de projeto como (ASME VIII Div.1, 1989), (BS-5500, 1976) e de avaliação de integridade (API-579, 2000), (BS-7910, 1999), foram elaboradas não só com a finalidade de padronizar e simplificar os cálculos de projetos e avaliações de componentes estruturais, mas principalmente, para garantir condições mínimas de segurança para operação. No caso de vasos de pressão, modelo objeto de estudo do presente trabalho, elevados coeficientes de segurança eram

inicialmente aplicados, resultando em pequenas tensões admissíveis para os materiais e elevadas espessuras de paredes, aumentado assim, significativamente o peso e o custo do equipamento.

A melhoria dos materiais empregados, avançadas técnicas de fabricações e inspeções, possibilitaram reduções de coeficientes de segurança, peso e custo porém, por mais que estas técnicas tenham evoluído, defeitos continuam sendo inerentes de qualquer processo de fabricação e suas detecções variam em função dos níveis de sensibilidade dos ensaios utilizados durante as avaliações conforme (Hull e John, 1988).

Muitos defeitos passam a ser detectados somente depois de um determinado tempo de operação, nestas condições níveis de aceitação tornam-se necessário durante a análise destes defeitos.

Em alguns casos, quando evidenciado defeitos reprovados pelo código de projeto durante a fabricação de uma estrutura, a rejeição não necessariamente deve ser automatizada. Decisões sobre reparo ou rejeição devem ser efetuadas baseadas em conhecimentos das propriedades dos materiais, dimensões dos defeitos, tipo de defeitos, estado de tensões na região do defeito, dimensões da estrutura e principalmente em uma forma adequada para relacionar estas variáveis.

Atualmente, em segmentos variados da indústria o documento (BS-7910, 1999) tem sido ferramenta de grande utilidade para avaliações de integridade estrutural.

Sua primeira publicação ocorreu na forma de guia em 1980 sob o título de PD-6493. Em 1991 o documento teve revisão coordenada pelo comitê inglês "Welding Standards Policy Committee" permanecendo ainda na forma de guia com o mesmo título (PD-6493, 1991). Esta revisão incorporou novas metodologias e comentários de técnicas voltadas para análise de estruturas na presença de defeitos.

Em 1999 o (PD-6493, 1991) sofreu nova revisão e foi substituído pela (BS-7910, 1999). Esta decisão ocorreu em função da larga experiência obtida desde sua publicação inicial em 1980.

A grande vantagem deste documento é que são apresentados métodos para análise de falhas em vários tipos de estruturas e componentes. Embora seja dada ênfase à estruturas soldadas e fabricadas em aços ferríticos, austeníticos e ligas de alumínio o procedimento pode ser usado para análise de estruturas feitas de outros materiais metálicos e estruturas não soldadas. O método pode ser aplicado no projeto, fabricação e durante a vida operacional da estrutura.

O anexo M do (BS-7910, 1999) contém soluções de fator de intensidade de tensões em modo I K_I para vários tipos de geometrias: cascas cilíndricas, barras circulares, parafusos, placas planas, e juntas soldadas.

Este trabalho se restringe a análise de um modelo cilíndrico com uma trinca superficial interna orientada axialmente conforme Fig. (1).

A teoria apresentada no anexo M da BS-7910 para determinação do fator de intensidade de tensões em modo I de abertura K_I está embasada nos trabalhos publicados por (Newman e Raju, 1981; 1983) onde são apresentados soluções empíricas de K_I entre outros para o modelo em questão.

Para soluções de fator de intensidade de tensões em modo I de abertura K_I não previstas neste documento, é permitido utilização de manuais ou técnicas numéricas, porém os conceitos devem ser esclarecidos e toda sistemática deve ser documentada. (Alliabadi, 1991) sintetiza várias técnicas numéricas aplicadas à mecânica da fratura linear elástica e, enfatiza o método dos elementos de contorno como uma alternativa ao método dos elementos finitos.

Assim como qualquer norma de engenharia, para a geometria apresentada na Fig. (1), a (BS-7910, 1999) possui suas limitações, dentre elas, valores limites de raios interno, espessuras de parede e dimensões de trincas. Nestas condições, valores resultantes de K_I foram gerados para 12 modelos com base na (BS-7910, 1999) e através de análise estática linear pelo método de elementos finitos.

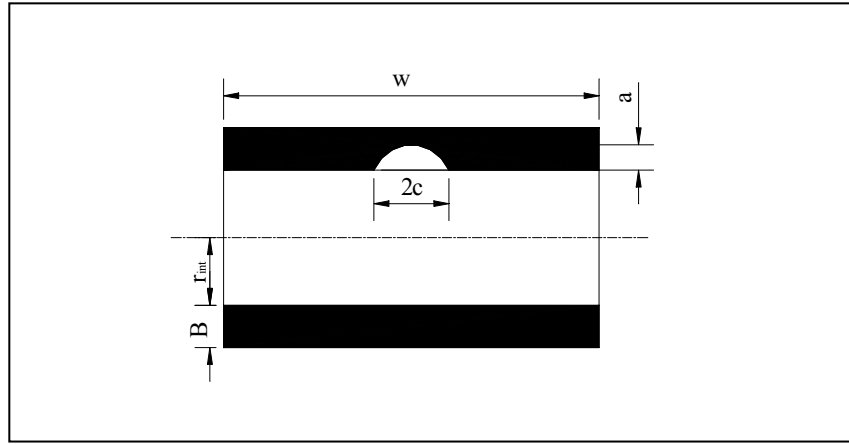


Figura 1: Cilindro com trinca superficial interna orientada axialmente

2. DETERMINAÇÃO DO FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÕES

2.1 Determinação de K_I Através do Método de Elementos Finitos

Para obtenção do fator de intensidade de tensões, o método de elementos finitos pode ser utilizado de duas maneiras, conforme (Broeck, 1988) através do método direto e indireto.

No método indireto, a solução através do método de elementos finitos é obtida através da análise da região interessada na ausência da trinca. A distribuição de tensões encontrada é utilizada para calcular o fator de intensidade de tensões como se estas tensões atuassem numa trinca imaginária.

No método direto o fator de intensidade de tensões é obtido analisando o campo de tensões ou deslocamentos da estrutura na presença da trinca.

A obtenção do K_I a partir do campo de tensões encontrado no método de elementos finito é gerado a partir da extrapolação dos K_{II} para $r = 0$ ou seja:

$$K_{II} = \sigma_{yi} \sqrt{2\pi r_i} \quad (1)$$

onde:

K_{II} é o fator de intensidade de tensões em modo I.

σ_{yi} tensões nodais na ponta da trinca na direção y.

r_i distância dos nós a ponta da trinca.

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} K_{II} \quad (2)$$

O K_I a partir do campo de deslocamentos encontrado no método de elementos finitos é gerado assim como para o campo de tensões, a partir da extrapolação dos K_{II} para $r = 0$. Assim, K_{II} em função do campo de deslocamentos nodais da face da trinca fica:

$$K_{II} = 2\sqrt{2\pi} \frac{\mu}{(\kappa + 1)} \frac{u_{yi}}{\sqrt{r_i}} \quad (3)$$

onde:

μ módulo de cisalhamento.

κ parâmetro para deformação plana ou tensão plana.

u_{yi} deslocamentos nodais na ponta da trinca na direção y.

2.2 Determinação de K_I Através da British Standards BS -7910

São apresentados três níveis para análise de fratura, 1, 2 e 3. A escolha do nível depende do material envolvido, dos dados de entrada disponíveis e do conservadorismo requerido.

As análises podem ser feitas através dos diagramas “failure analysis diagram” FAD baseados nos conceitos da mecânica da fratura.

No diagrama FAD, Fig. (2), uma linha de análise limite é plotada. O cálculo da falha requer conhecimento de ambas coordenadas neste diagrama. A posição destes é comparada com a linha limite para determinação da aceitabilidade da falha.

O eixo vertical do diagrama FAD representa a razão de fratura K_r , ou seja a razão entre o fator de intensidade de tensões aplicado K_I e a tenacidade do material K_{mat} .

O eixo horizontal representa a razão de carregamento S_r , ou seja, a razão entre a carga aplicada σ_{ref} e a carga necessária para o colapso na região da trinca σ_f .

A obtenção de um ponto de trabalho além dos limites do diagrama FAD indica que o defeito poderá ser crítico para condição analisada, devendo proceder o reparo ou uma nova avaliação segundo critérios menos conservativos.

A abrangência deste trabalho é de avaliação exclusiva do cálculo do fator de intensidade de tensões K_I a ser incluído no eixo vertical do diagrama FAD.

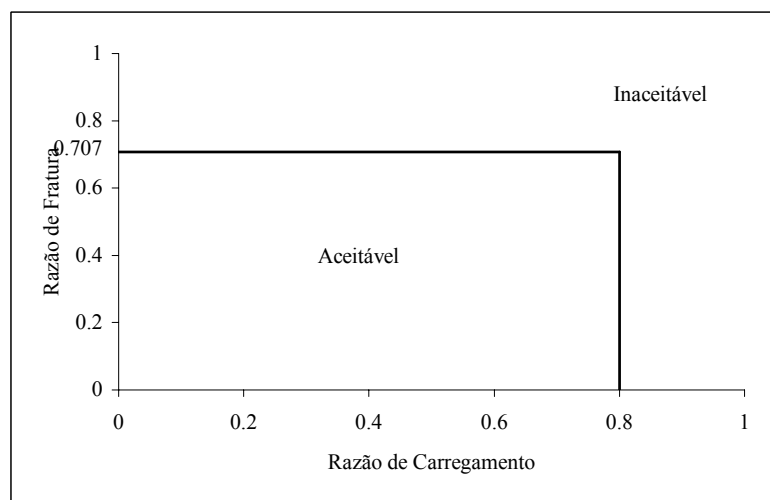


Figura 2 : Diagrama de análise de falha nível 1A

Para o modelo estudado neste trabalho, cilindro com trinca superficial interna orientada axialmente, as principais equações necessárias para obtenção do fator de intensidade de tensões constantes na (BS-7910, 1999) são as seguintes:

$$K_I = (Y\sigma)\sqrt{\pi a} \quad (4)$$

onde:

$(Y\sigma)$ parâmetro de contribuição de tensões dado pela Eq. (5) ou Eq. (6).

a é a altura da trinca.

Para análise em nível 1:

$$Y\sigma = Mf_w M_m \sigma_{\max} \quad (5)$$

Onde:

M fator de correção para curvatura.

f_w fator de correção para comprimento finito.

M_m fator geométrico para tensões de membrana.

σ_{\max} tensão máxima na ausência da trinca.

Para análise em nível 2 e 3:

$$Y\sigma = (Y\sigma)_p + (Y\sigma)_s \quad (6)$$

Onde:

$(Y\sigma)_p$ e $(Y\sigma)_s$ representam as contribuições de tensões primárias e secundárias respectivamente.

3. RESULTADOS:

Todos os modelos conforme Fig. (1) foram submetidos a pressão interna de 5 MPa com trincas superficiais internas orientadas axialmente. Para todos os modelos foram utilizados como materiais o aço de classificação (ASTM-A36, 1989). As escolhas dos modelos foram elaboradas considerando as razões limites entre as espessuras de paredes B e os raios internos r_{int} conforme (BS-7910, 1999), ou seja, $B/r_{\text{int}}=0.1$ e $B/r_{\text{int}}=0.25$.

Na Tab. (1) são apresentados as diferenças entre os K_I calculados pela (BS-7910, 1999). Verifica-se, a medida que o raio interno diminui e para mesma espessura de parede, aumento das diferenças entre os níveis 1 e 2.

Tabela 1 : Diferença entre os K_I pela BS-7910

	B/ r_{int}	a/c	a/B	Mm	Mb	$K_I \text{ MPa}\sqrt{m}$ Nível 1	$K_I \text{ MPa}\sqrt{m}$ Nível 2 e 3	Diferença %
modelo 1	0.1	0.4	0.2	0.932	0.698	9.10	8.98	1.2
modelo 5	0.1	0.2	0.2	1.062	0.806	10.36	10.24	1.2
modelo 9	0.1	0.1	0.2	1.172	0.897	11.44	11.30	1.2
modelo 3	0.1	0.4	0.4	1.016	0.519	14.02	13.68	2.4
modelo 7	0.1	0.2	0.4	1.26	0.677	17.39	16.99	2.3
modelo 11	0.1	0.1	0.4	1.494	0.834	20.62	20.17	2.2
modelo 2	0.25	0.4	0.2	0.919	0.688	4.05	3.94	2.7
modelo 6	0.25	0.2	0.2	1.045	0.791	4.60	4.48	2.6
modelo 10	0.25	0.1	0.2	1.153	0.881	5.08	4.95	2.6
modelo 4	0.25	0.4	0.4	0.998	0.506	6.22	5.88	5.3
modelo 8	0.25	0.2	0.4	1.24	0.663	7.72	7.33	5.0
modelo 12	0.25	0.1	0.4	1.47	0.816	9.16	8.72	4.8

Com relação ao método de elementos finitos, foram geradas 2 malhas para cada modelo: uma com 20000 elementos hexaedros de 8 nós e outra com 20000 elementos hexaedros de 20 nós.

Para os modelos com elementos de 8 nós o tempo médio de processamento foi de 17 minutos, enquanto que para os modelos com elementos de 20 nós, o tempo médio de processamento foi de 380 minutos.

Foram efetuadas análises estáticas lineares com recurso de um computador pessoal com 900 Mhz de velocidade de processamento e 640 MB de memória RAM, além do programa Algor versão 12.1 nas etapas de processamento.

Os deslocamentos nodais perpendicular a face da trinca foram aplicados na Eq. (3) para geração dos fatores de intensidade de tensões K_{II} . O fator de intensidade de tensões K_I , foi obtido por extrapolação para $a = 0$ das curvas ajustadas pelo método dos mínimos quadrados.

A diferença entre os elementos lineares e parabólicos para determinação de K_I é verificada na Tab.(2). Constata-se que a medida que o raio interno diminui com a espessura de parede fixa, a diferença entre os resultados de K_I para elementos lineares e parabólicos também diminuem.

Tabela 2 : Diferença entre os K_I pelo método de elementos finitos

	B/r_i	a/c	a/B	$K_I MPa\sqrt{m}$ 8 nós	$K_I MPa\sqrt{m}$ 20 nós	Diferença %
modelo 1	0.1	0.4	0.2	7.99	8.66	8.4
modelo 5	0.1	0.2	0.2	9.31	10.09	8.4
modelo 9	0.1	0.1	0.2	10.25	11.11	8.4
modelo 3	0.1	0.4	0.4	12.16	12.88	5.9
modelo 7	0.1	0.2	0.4	15.03	15.92	5.9
modelo 11	0.1	0.1	0.4	17.99	19.10	6.2
modelo 2	0.25	0.4	0.2	3.36	3.50	4.2
modelo 6	0.25	0.2	0.2	3.92	4.08	4.1
modelo 10	0.25	0.1	0.2	4.31	4.49	4.2
modelo 4	0.25	0.4	0.4	4.96	5.09	2.6
modelo 8	0.25	0.2	0.4	6.14	6.30	2.6
modelo 12	0.25	0.1	0.4	7.40	7.62	3.0

A avaliação pela (BS-7910, 1999) foi efetuada somente para parcela de fratura no diagrama FAD. Verifica-se na Tab. (3) que em todos os níveis de análise, estes resultados são maiores que os do método de elementos finitos. Nestas condições, a obtenção do fator de intensidade de tensões através do procedimento (BS-7910, 1999) é precisa e garante razoável conservadorismo quando comparada com o método de elementos finitos, uma vez que quanto maior o K_I mais próximo fica do limite de tenacidade à fratura do material K_{Ic} .

Tabela 3: Diferença entre os K_I pelo método de elementos finitos e BS-7910

	B/r _i	a/c	a/B	Diferença máxima: (%) Linear e Nível 1	Diferença mínima: (%) Parabólico e Nível 2
modelo 1	0.1	0.4	0.2	12.2	3.6
modelo 5	0.1	0.2	0.2	10.2	1.5
modelo 9	0.1	0.1	0.2	10.4	1.7
modelo 3	0.1	0.4	0.4	13.3	5.9
modelo 7	0.1	0.2	0.4	13.6	6.3
modelo 11	0.1	0.1	0.4	12.8	5.3
modelo 2	0.25	0.4	0.2	17.0	11.1
modelo 6	0.25	0.2	0.2	14.8	9.0
modelo 10	0.25	0.1	0.2	15.1	9.3
modelo 4	0.25	0.4	0.4	20.2	13.5
modelo 8	0.25	0.2	0.4	20.5	14.1
modelo 12	0.25	0.1	0.4	19.2	12.6

No tocante as tensões atuantes nos modelos, faz-se necessário a obtenção na região de possível existência de uma trinca ou qualquer outro fator que resulte em tensões elevadas. As equações apresentadas na (BS-7910, 1999) além de serem estabelecidas de forma sistemática e de fácil implementação, possuem fatores multiplicadores para inclusão de informações como desalinhamento e tensões residuais que contribuem de forma a aumentar o fator de intensidade de tensões K_I .

Com relação aos níveis de análise apresentados na (BS-7910, 1999), verifica-se tendência a utilização do nível 2 ao invés do nível 1, no que tange a redução de conservadorismo, conforme Tab.(1), quando para uma mesma espessura de parede B o raio interno do modelo diminui.

Uma grande vantagem com relação ao método de análise pela (BS-7910, 1999), se dá em relação ao tempo de processamento para obtenção do fator de intensidade de tensões K_I . Após implementação das equações, o processamento das informações se dá em caráter imediato, o que não se verifica na análise pelo método de elementos finitos que consumiu em média 17 minutos para malha com elementos lineares e 380 minutos para elementos parabólicos, desconsiderando ainda, as etapas de pré e pós processamento.

A diferença entre os elementos lineares e parabólicos para determinação de K_I é verificada na Tab. (2). Constata-se que a medida que o raio interno diminui com a espessura de parede fixa, a diferença entre os resultados de K_I para elementos lineares e parabólicos também diminuem. Neste contexto, assumindo as diferenças previstas na Tab.(2), para relação de $B/r_i = 0.25$, pode-se substituir os elementos parabólicos pelos lineares, obtendo ganho expressivo no tempo de processamento.

4. CONCLUSÕES

A versatilidade do método de elementos finitos vem a caracterizar seu benefício para aplicação em geometrias e dimensões não previstas na (BS-7910, 1999) porém, o risco inerente ao processo deve ser considerado, pois as imprecisões finais dos K_I tendem a reduzir seus valores em relação ao K_I real, causando assim diminuição na relação K_I / K_{Ic} .

Como desvantagem, o método de elementos finitos necessita de grande refinamento na zona singular. O processo de geração de malhas exige apreciável recurso de interface gráfica para geração de malhas, dificultando consideravelmente as etapas de pré-processamento.

Com relação aos dois métodos utilizados, a grande vantagem está na aplicação dos métodos associados. Ao utilizar o método de elementos finitos para estudo do campo de tensões na região de uma possível trinca, não se faz necessário grande refinamento, viabilizando assim a utilização desta ferramenta. Neste caso, com as condições de contorno totalmente definidas, a aplicação do procedimento (BS-7910, 1999) torna-se vantajosa.

5. REFERÊNCIAS

- Aliabadi, M. H. and Rooke, D. P., 1991, Numerical Fracture Mechanics. Solid Mechanics and its Applications, vol.8., Kluwer Academic Publishers.
- API (American Petroleum Institute), 2000, Recommended Practice API-579., Fitness for Service - First Edition.
- ASME (The American Society of Mechanical Engineers), 1989 Edition , ASME Sec. VIII, Div. 1, Rules for Construction of Pressure Vessels
- ASTM-A36 – Standard Specification for Carbon Structural Steel, 1989 Edition.
- Broek, D., 1988, The Practical Use of Fracture Mechanics, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- BSI (British Standards Institution), 1976 Edition, BS-5500, Specification for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels
- BSI (British Standards Institution) PD-6493, 1991, Publish Document.
- BSI (British Standards Institution) BS-7910, 1999, Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures - Incorporating Amendment n. 1
- Hull, J. B. and John, V. B., 1988, Non Destructive Testing , Macmillan.
- Newman, J. C. Jr. and Raju, I. S., 1981, An Empirical Stress Intensity Factor Equation for The Surface Crack - Engineering Fracture Mechanics , Vol. 15, N°. 1-2, pp 185-192.
- Newman, J. C. Jr. and Raju, I. S., 1983, Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies - Fracture Mechanics: Fourteenth Symposium, Vol. 1, Theory and Analysis, ASTM STP 791, J. C. Lewis and G. Sines, Eds., American Society for Testing and Materials, pp. I-238-I-265.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DETERMINATION OF THE STRESS INTENSITY FACTOR IN A CRACKED CYLINDER SUBMITTED TO INTERNAL PRESSURE.

Marcelo Aparecido da Silva

ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – Cep. 12228-900 – São José dos Campos – S.P., marcelosilva@pqu.com.br

Maher Nasr Bismarck-Nasr

ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias – Cep. 12228-900 – São José dos Campos – S.P., bismarck@aer.ita.cta.br

Abstract. *During the integrity and inspections evaluation processes, the engineer must decide upon the approval or rejection of a structural element.*

The standardization of entailed procedures to the fracture mechanics, tends to increase the operational availability, reduce the number of interventions and to guarantee high safety.

In the present work, two procedures for determination of the stress intensity factor are presented. The first uses the British procedure (BS-7910, 1999), and in the second the stress intensity factor is obtained using the finite element method . The results are compared and are discussed offering alternatives for design evaluations.

Keywords. *Fracture mechanic, direct and indirect method, finite element methods, analysis procedure, internal surface crack.*