

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avaliação do desempenho de diferentes materiais de tubulação para aplicação do Leak-Before-Break (LBB)

ISRAEL GLEYBSON FERREIRA DA SILVA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais

Orientador: Prof. Dr. Waldemar Alfredo Monteiro

São Paulo 2019

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES Autarquia associada à Universidade de São Paulo

Avaliação do desempenho de diferentes materiais de tubulação para aplicação do Leak-Before-Break (LBB)

ISRAEL GLEYBSON FERREIRA DA SILVA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais

Orientador: Prof. Dr. Waldemar Alfredo Monteiro

Versão Corrigida Versão Original disponível no IPEN

> São Paulo 2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Como citar:

SILVA, I. G. F. d. *Avaliação do desempenho de diferentes materiais de tubulação para aplicação do Leak-Before-Break (LBB)*. 2019. 65 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN/USP, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Israel Gleybson Ferreira da Avaliação do desempenho de diferentes materiais de tubulação para aplicação do Leak-Before-Break (LBB) / Israel Gleybson Ferreira da Silva; orientador Waldemar Alfredo Monteiro. -- São Paulo, 2019. 65 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Materiais) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019. 1. Leak-Before-Break. 2. Material de tubulação. 3. Reator PWR. I. Monteiro, Waldemar Alfredo, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por tudo.

Aos Professores Dr. Waldemar Alfredo Monteiro e Dr. Arnaldo Homobono Paes de Andrade, pela disponibilidade e apoio irrestrito.

À minha querida esposa, pela compreensão, estímulo e confiança.

Aos meus pais, por todos os esforços despendidos em minha formação.

Aos meus colegas do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, pelo apoio e amizade.

RESUMO

SILVA, I. G. F. Avaliação do desempenho de diferentes materiais de tubulação para aplicação do Leak-Before-Break (LBB). 2019. 65 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – CNEN/SP. São Paulo.

Fundamentado na mecânica da fratura, o conceito do Leak-Before-Break (LBB) "Vazamento Antes da Falha" considera que um vazamento proveniente de uma trinca pode ser detectado antes de alcançar um tamanho crítico que implique na falha da tubulação, ou seja, a análise do LBB demostra através de uma justificativa técnica que a probabilidade de ruptura da tubulação é extremamente baixa. Dentre os aspectos que envolvem a aplicação do LBB, os principais são: a definição das propriedades do material, que são extraídos através de ensaios à tração e à fratura; a análise do vazamento, que determina a taxa de vazamento devido à presença de uma trinca passante; e a análise que verifica se a trinca é estável considerando os modos de falha por rasgamento dúctil e por colapso plástico. Os materiais SA-508 Cl. 3, SA-106 Gr. B e SA-376-TP304 foram avaliados quanto aos seus desempenhos para o LBB. Utilizaram-se dados extraídos de casos da literatura para as propriedades dos materiais, e para a geometria e carregamentos da tubulação, todos correspondentes ao circuito primário de um reator PWR. Após aplicação do LBB, constatou-se que todos os três materiais atenderam os limites do estabelecidos na metodologia. Verificou-se que os materiais SA-508 Cl. 3 e SA-376-TP304 mostraram o melhor desempenho para falha por rasgamento dúctil e falha por colapso plástico, respectivamente, e o material SA-106 Gr. B teve o menor desempenho em ambos. Todos os três materiais apresentaram o colapso plástico como modo de falha mais provável. De uma forma generalizada, o material SA-376-TP304 obteve o melhor desempenho para o LBB dentre os três materiais avaliados neste trabalho.

Palavras-Chave: Leak-Before-Break; material de tubulação; reator PWR.

ABSTRACT

SILVA, I. G. F. **Performance evaluation of different piping materials for application of Leak-Before-Break (LBB)**. 2019. 65 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – CNEN/SP. São Paulo.

Based on the fracture mechanics, the Leak-Before-Break (LBB) concept considers that a leakage from a crack can be detected before reaching a critical size that implies the pipe failure, that is, the LBB analysis demonstrates through a technical justification that the probability of pipe rupture is extremely low. Among the aspects that involve the application of LBB, the main ones are: the definition of the material properties, which are obtained through tensile and fracture tests; the leakage analysis, which determines the rate of leakage due to the presence of a through-wall crack; and the analysis that verifies if the crack is stable considering the failure modes by ductile tearing and plastic collapse. The materials SA-508 Cl. 3, SA-106 Gr. B and SA-376-TP304 were evaluated in relation to their performances for LBB. Data obtained from literature cases were used for the materials properties, and for the geometry and loadings of the pipe, all corresponding to the primary circuit of a PWR reactor. After application of the LBB, it was verified that all three materials met the limits established in the methodology. The materials SA-508 Cl. 3 and SA-376-TP304 showed the best performance for ductile tearing failure and plastic collapse failure, respectively, and the material SA-106 Gr. B material had the lowest performance in both. All three materials presented plastic collapse as the most likely failure mode. In general, the material SA-376-TP304 obtained the best performance for the LBB among the three materials evaluated in this work.

Keywords: Leak-Before-Break; piping material; PWR reactor.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	11
3 REVISÃO DA LITERATURA	12
3.1 Conceito do LBB	12
3.2 Principais aspectos na aplicação do LBB	14
3.2.1 Definição das propriedades dos materiais	14
3.2.2 Análise do vazamento	17
3.2.3 Análise da estabilidade da trinca	18
3.3 Requisitos iniciais para aplicação do LBB	21
3.4 Materiais em tubulações dos circuitos primários PWR	22
4 MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1 Materiais avaliados	24
4.2 Metodologia aplicada	25
4.3 Recursos computacionais	28
4.4 Propriedades dos materiais	28
4.5 Geometria da tubulação e carregamentos aplicados	29
4.6 Características da trinca	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1 Análise do vazamento	33
5.2 Aplicação do método J/T da MFEP	34
5.3 Aplicação do método da carga limite	40
5.4 Avaliação do desempenho para o LBB	43
6 CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
APÊNDICE – DADOS DE ENTRADA E SAÍDA DO SOFTWARE PICEP	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos materiais utilizados como metal base em tubulações	
de circuitos primários de reatores PWR	23
Tabela 2 – Especificação da composição química dos materiais avaliados	24
Tabela 3 – Propriedades à tração e à fratura dos materiais avaliados	29
Tabela 4 – Geometria da tubulação	30
Tabela 5 – Carregamentos aplicados	31
Tabela 6 – Tamanho da trinca do vazamento para 10 gpm	34
Tabela 7 – Método J/T da MFEP - Caso 1	36
Tabela 8 – Método J/T da MFEP - Caso 2	37
Tabela 9 – Fator de correção Z	40
Tabela 10 – Tamanho crítico da trinca - Casos 3 e 4	41
Tabela 11 – Margens de segurança dos materiais	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama esquemático de uma usina nuclear tipo PWR	9
Figura 2 – Tubulação com uma trinca circunferencial passante	10
Figura 3 – Dispositivo utilizado para restringir o possível chicoteamento de	
uma tubulação causado pelo seu rompimento	13
Figura 4 – Gráfico Tensão x Deformação real esquemático e a relação com o	
expoente de encruamento	15
Figura 5 – Curva J-R típica	16
Figura 6 – Taxa de vazamento em função do tamanho de trinca	17
Figura 7 – Equilíbrio de tensões em um tubo com uma trinca passante	
circunferencial sob carregamento de membrana e de flexão	20
Figura 8 – Esquema para aplicação do LBB e cálculo das margens de	
segurança	27
Figura 9 – Taxa de vazamento x Tamanho da trinca	33
Figura 10 – Margem de segurança M1	38
Figura 11 – Margem de segurança M₂	39
Figura 12 – Margem de segurança M₃	42
Figura 13 – Margem de segurança M₄	43

LISTA DE ABREVIATURAS

- ASME American Society of Mechanical Engineers
- ASTM American Society for Testing and Materials
- DEGB Double-Ended Guilhotine Break
- EPRI Electronic Power Research Institute
- GDC General Design Criterion
- gpm galão por minuto
- IAEA International Atomic Energy Agency
- KTA Kerntechnischer Ausschuss
- LBB Leak-Before-Break
- LOCA Loss-of-coolant Accident
- MFEP Mecânica da Fratura Elasto-Plástica
- NUREG Nuclear Regulatory
- PWR Pressurized Water Reactor
- PICEP Pipe Crack Evaluation Program
- RCC-M Règles de conception et de construction des matériels mécaniques
- SDS Sismo de Desligamento Seguro
- SRP Standard Review Plan
- SRR Sistema de Resfriamento do Reator
- USNRC United States Nuclear Regulatory Commission

1 INTRODUÇÃO

As usinas nucleares são centrais de geração de energia elétrica que utilizam a reação nuclear de fissão como fonte de calor para produção de energia. Atualmente, 450 reatores nucleares de diversos tipos estão em operação no mundo, produzindo cerca de 400 GW de capacidade elétrica; dessas unidades, 298 são do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*). Adicionalmente, 55 reatores nucleares estão em construção, sendo 45 deles, do tipo PWR (IAEA, 2019).

O princípio de funcionamento de uma planta nuclear PWR se baseia na remoção do calor do núcleo do reator através de um circuito fechado de água à elevada pressão, denominado circuito primário. A água aquecida sob alta pressão no circuito primário passa por um trocador de calor (gerador de vapor) que aquece e transforma em vapor a água do circuito secundário. Esse vapor movimenta uma turbina que aciona um gerador elétrico. A energia elétrica gerada chega aos consumidores finais através de redes de distribuição. A Figura 1 apresenta o diagrama esquemático de uma usina nuclear tipo PWR.





Fonte: ELETRONUCLEAR, 2018.

As tubulações que fazem parte dos reatores PWR, são comumente fabricadas com aços inoxidáveis austeníticos ou aços ferríticos de baixa liga com alta tenacidade, ou seja, são resistentes ao crescimento instável de defeitos. Uma trinca na tubulação deve causar um vazamento em uma quantidade considerável, permitindo sua identificação e quantificação, antes que possa ocorrer um crescimento da mesma, que levaria a uma ruptura repentina da tubulação. Esta é a essência do conceito do *Leak-Before-Break* (LBB). Uma etapa fundamental na aplicação do conceito LBB consiste na avaliação da estabilidade de trincas passantes postuladas em determinado sistema de tubulação (JONG, 2004). Por se tratar de materiais dúcteis, esta avaliação é feita através dos conceitos da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP). Na Figura 2 é representado esquematicamente um segmento de tubulação com uma trinca circunferencial passante postulada na seção mais desfavorável ao carregamento aplicado.



Figura 2 – Tubulação com uma trinca circunferencial passante.

Fonte: Autor da dissertação.

Através de uma justificativa fundamentalmente técnica, o conceito LBB tem sido amplamente aplicado em projetos de instalações nucleares em vários países do mundo (BOURGA et al, 2015).

2 OBJETIVOS

Os objetivos propostos por este trabalho são:

- Analisar de forma crítica, o conceito do LBB e de seus limites de aplicabilidade.
- Aplicar a sua metodologia considerando três diferentes materiais de tubulações utilizados em circuitos primários de reatores PWR.
- Avaliar de forma quantitativa e comparativa, o desempenho desses materiais para o LBB.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Conceito do LBB

De acordo com norma da *Atomic Energy Commission* (1971), o GDC (*General Design Criterion*) 4 requer que as estruturas, sistemas e componentes importantes para a segurança devem ser projetados para acomodar os efeitos ambientais e dinâmicos associados com as condições de operação normais, anormais, e até com de acidentes postulados. Ele estipula que devem ser verificados nos projetos, os carregamentos dinâmicos provenientes dos efeitos destas condições, incluindo misseis, pressurização de compartimentos, chicoteamento de tubulações e descarga de fluidos (MATTAR NETO, 1994).

No caso das tubulações do circuito primário, os órgãos reguladores da atividade nuclear exigiam, no início dos anos 70, que os projetos de plantas nucleares levassem em consideração a hipótese de ocorrência de uma ruptura súbita da seção transversal completa de uma tubulação (DEGB - *Double-Ended Guilhotine Break*), causando a perda do fluido refrigerante (LOCA - *Loss-of-coolant Accident*). Tal exigência, quando aplicada a uma tubulação submetida à pressão e temperatura elevada, como a do circuito primário do reator, demandava a consideração de dois efeitos dinâmicos causados pela ruptura súbita da tubulação, o efeito de chicoteamento e o efeito do jato de água. Desta forma, para proteger os equipamentos essenciais para a segurança de uma planta nuclear, se fazia necessário prever a utilização de dispositivos para restringir o chicoteamento da tubulação (*pipe whip restraints*), conforme Figura 3, e barreiras contra jatos de fluido (*jet impingement shield*) (CUNTO, 2017).

Figura 3 – Dispositivo utilizado para restringir o possível chicoteamento de uma tubulação causado pelo seu rompimento.



Fonte: CUNTO, 2017

Por cerca de uma década, a indústria nuclear procurou soluções para desconsiderar os efeitos dinâmicos de uma DEGB. Então, a metodologia denominada *Leak-Before-Break* (LBB) ou Vazamento Antes da Falha, surgiu como uma abordagem tecnicamente justificável para retirar tal análise das bases de projeto de plantas nucleares, levando à realização de diversos estudos entre os anos 70 e 80 para comprovação deste método e sua aceitação pelos órgãos reguladores (IAEA, 1993).

A USNRC (*United States Nuclear Regulatory Commission*) estabeleceu no início dos anos 80, o grupo *Pipe Break Task Group* cujos trabalhos culminaram na publicação do NUREG-1061 (1984), na qual se delineava a viabilidade da aplicação do conceito LBB. Com base neste documento, foi elaborado o documento NUREG-0800-SRP 3.6.3 (1987), em que fica caracterizado o procedimento de avaliação determinístico para aplicação do conceito LBB proposto pela USNRC. Esses documentos se tornaram uma referência básica para implementação dos critérios associados ao conceito LBB nas centrais norte-americanas e, por extensão, nas instalações brasileiras (JONG, 2004).

Uma vez que o LBB é demostrado, essas rupturas podem ser excluídas das bases de projeto, e os esforços dinâmicos resultantes do LOCA não são

considerados na análise estrutural dos sistemas mecânicos da planta. Em consequência, não é mais necessário projetar os componentes, suportes de equipamentos do circuito primário ou das tubulações para fazer frente a essas cargas dinâmicas (MANESCHY; MIRANDA, 2014).

Outra vantagem da aplicação do LBB é que as restrições para chicoteamento de tubulações e as barreiras antijato, ambas requeridas para proteger os equipamentos importantes dos efeitos dinâmicos da ruptura postulada, podem ser removidas. Como os custos desses elementos de proteção são elevados, e em alguns casos a sua existência dificulta ou mesmo impossibilita a inspeção em serviço de componentes. A retirada dos dispositivos é desejável, não só por aspectos econômicos, mas também pela segurança, por reduzir a dose de radiação recebida pelo pessoal da manutenção (MANESCHY; MIRANDA, 2014).

3.2 Principais aspectos na aplicação do LBB

Dentre os vários pontos que envolve a aplicação do LBB, considera-se que seus principais aspectos são a definição das propriedades dos materiais, análise do vazamento, e análise da estabilidade da trinca.

3.2.1 Definição das propriedades dos materiais

Os ensaios de tração e ensaios de tenacidade à fratura caracterizam os materiais das tubulações (metal base e solda) que serão aplicados na planta nuclear. Esses ensaios definem as propriedades reais que serão utilizadas nos cálculos para determinação do tamanho crítico da trinca.

Conforme apresentado na Figura 4, o ensaio de tração é usado para a caracterização da curva tensão-deformação real do material, essencial para a análise de carga limite de um sistema e, também, para o levantamento dos parâmetros da equação constitutiva de Ramberg-Osgood. Um desses parâmetros, o expoente de encruamento n, é um fator essencial para as análises de Mecânica da Fratura e definição da taxa de vazamento do sistema, já que o

expoente de encruamento irá definir como será a abertura da trinca (CUNTO, 2017).



Figura 4 – Gráfico Tensão x Deformação real esquemático e a relação com o expoente de encruamento.

Deformação Nominal (%)

Fonte: CUNTO, 2017.

Os parâmetros de Ramberg-Osgood são dados conforme a seguir (ANDERSON, 2005):

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n$$
(Equação 1)

Onde:

 σ = Tensão;

 ϵ = Deformação;

 σ_0 = Tensão de Referência, normalmente igual à tensão de escoamento;

 ε_0 = Deformação de Referência (σ_0/E);

 α = Constante Adimensional;

n = Expoente de encruamento.

Para avaliação de uma tubulação trincada, a propriedade de tenacidade à fratura do material J_{IC} deve ser considerada. O J_{IC} define o instante em que tem início o crescimento (estável ou instável) da trinca. Esta propriedade é extraída por meio do ensaio de tenacidade à fratura conforme norma ASTM E1820 (2013), cujo resultado é obtido na forma de curva de resistência J-R (Figura 5). Nesta curva, a Integral J, que representa a resistência do material ao crescimento da trinca, é plotada em função de Δa , que é a variação do tamanho da trinca. A curva J-R pode ser representada por meio de uma lei de potência, conforme:

$$J_{mat} = C(\Delta a)^m$$
 (Equação 2)

Onde:

J_{mat} = Resistencia do material ao crescimento da trinca;

Δa = Variação do tamanho da trinca;

C = Constante da curva J-R do material;

m = Expoente da curva J-R do material.



Figura 5 – Curva J-R típica.

Fonte: Adaptado de ASTM E1820, 2013.

3.2.2 Análise do vazamento

Determinar a taxa de vazamento que ocorre devido à presença de uma trinca passante em uma tubulação é um problema complexo, já que a taxa de vazamento irá depender não só do tamanho da trinca, mas também da pressão interna e temperatura do fluido, das cargas atuantes na tubulação, do tipo de fluido, da transferência de massa na transformação da fase líquida em vapor, do atrito entre o líquido e a superfície rugosa da trinca, da morfologia da trinca, e das propriedades do material da tubulação (CUNTO, 2017).

Assim, como auxílio, existem modelos matemáticos que consideram todos esses fatores. Um desses modelos, talvez o mais validado e aceito pelos órgãos reguladores de energia nuclear, é o denominado PICEP (*Pipe Crack Evaluation Program*). O EPRI (*Electronic Power Research Institute*) publicou esse modelo na forma de *software* em que, ao se adicionar os dados de entrada (*input*), conforme as variáveis descritas acima, o software retornará os dados (*output*) de taxa de vazamento em função do tamanho de trinca, conforme apresentado na Figura 6. Desta forma, conhecendo-se a capacidade do sistema de detecção de vazamento da planta nuclear, é possível determinar qual o tamanho da trinca que irá causar um vazamento detectável (NORRIS; CHEXAL, 1987).



Figura 6 – Taxa de vazamento em função do tamanho de trinca.

Fonte: Adaptado de NORRIS; CHEXAL, 1987.

3.2.3 Análise da estabilidade da trinca

Dependendo da tenacidade do material, a abordagem J/T é a metodologia mais usada para verificação da estabilidade do defeito. J e T são quantidades que representam o potencial para extensão da trinca. A integral J indica a força motriz que estende a trinca, e seu valor total é a soma das componentes elástica (J_e) e plástica (J_p) . Quando J aplicado é menor do que J_{IC} o crescimento da trinca não ocorre. Por outro lado, quando J é igual ou maior do que J_{IC} o rasgamento estável é iniciado. Nessa situação, o método J/T é adotado para verificar quando o defeito se torna instável, isto é, o instante associado à ruptura do tubo (MANESCHY; MIRANDA, 2014).

A equação para integral J proposta por Zahoor (1989), para uma trinca circunferencial passante em uma tubulação, considerando cargas de flexão, é dada pela seguinte equação:

$$J = J_e + J_p$$
 (Equação 3)

$$J = \frac{f_b M^2}{\underset{J_e}{\mathbb{R}^3 t^2 E}} + \underbrace{\alpha \sigma_0 \epsilon_0 \pi R \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right)^2 H_1 \left(\frac{M}{M_0}\right)^{n+1}}_{J_p}$$
(Equação 4)

Onde:

M = Momento fletor aplicado;

E = Módulo de elasticidade do material;

f_b e M₀ = São parâmetros que dependem da dimensão da tubulação, condições de carregamento, orientação e tamanho da trinca, e propriedades do material;

 H_1 = Função de influência, variável que depende do θ , n e R/t;

R, t e θ = Raio médio do tubo, espessura de parede e metade do ângulo da trinca, respectivamente;

 α , σ_0 , ϵ_0 e n = São constantes do material obtidas pela relação de Ramberg-Osgood para curva tensão - deformação.

A instabilidade da trinca ocorre quando o valor do módulo de rasgamento aplicado (T) é maior do que o módulo de rasgamento do material (T_{mat}), que é uma propriedade do material. Como pode ser visto abaixo, para determinar o T, são calculadas duas soluções para J. Uma, com metade do tamanho de trinca a, e outra com a + Δ a, onde Δ a = R Δ θ e Δ θ comumente assumido como 0,01θ (MANESCHY; MIRANDA, 2014).

$$T = \frac{E}{\sigma_{f}^{2}} \cdot \frac{[J(a + \Delta a) - J(a)]}{\Delta a}$$
(Equação 5)

Onde:

a = Metade do tamanho da trinca;

 Δa = Tamanho arbitrário escolhido para o crescimento da trinca (usualmente 0,01 θ);

E = Módulo de elasticidade do material;

 $\sigma_{\rm f}$ = Tensão de escoamento generalizada do material, que é a média entre a tensão de escoamento (σ_0) e o limite de resistência do material (σ_R);

J(a) = Solução para J com tamanho de trinca a;

 $J(a + \Delta a) = Solução para J com tamanho de trinca a + \Delta a.$

O módulo de rasgamento do material (T_{mat}) é definido por:

$$T_{mat} = \frac{E}{\sigma_{f}^{2}} \cdot \left(C. m. (\Delta a)^{(m-1)}\right)$$
 (Equação 6)

Onde:

C = Constante da curva J-R do material;

m = Expoente da curva J-R do material.

Conforme Maneschy e Miranda (2014), outro aspecto do LBB que deve ser discutido é que quando as tenacidades dos metais de base e solda são muito elevadas é mandatório verificar se a falha pode ocorrer por mecanismo diferente do rasgamento dúctil. Uma possibilidade é investigar o colapso plástico, situação na qual a seção reta do tubo se torna completamente plástica antes da fratura. A teoria apropriada para essa análise é a da carga limite, que considera que a falha ocorre quando a tensão devido às cargas externas na seção é igual ao limite de escoamento efetivo. Isso indica que a tenacidade do material é alta o suficiente para garantir que o modo de falha é controlado pelas propriedades à tração.

Figura 7 – Equilíbrio de tensões em um tubo com uma trinca passante circunferencial sob carregamento de membrana e de flexão.



Fonte: Adaptado de NORRIS; CHEXAL, 1987.

Conforme Norris e Chexal (1987), observando a Figura 7 e utilizando a relação de equilíbrio de força, o ângulo β que define o eixo neutro de uma seção com trinca é dado por:

$$\beta = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\theta}{\pi} - \frac{P_{m}}{\sigma_{f}} \right)$$
(Equação 7)

Onde:

 θ = Metade do ângulo da trinca circunferencial passante postulada, em radianos;

 P_m = Tensão de membrana, incluindo a pressão, o peso morto e os carregamentos sísmicos;

 $\sigma_{\rm f}$ = Tensão de escoamento generalizada do material.

Para o equilíbrio, considerando tensão de flexão, tem-se:

$$\pi. P_{b} = 2. \sigma_{f}(2. \operatorname{sen}\beta - \operatorname{sen}\theta)$$
 (Equação 8)

Onde:

P_b = Tensão de flexão, incluindo o peso morto, expansão térmica e os carregamentos sísmicos.

Para introduzir um fator de segurança e um fator para considerar materiais que possam falhar por fratura com tensões abaixo do colapso plástico, as tensões aplicadas, P_m e P_b, possuem a seguinte relação com suas respectivas tensões de falha P_m' e P_b':

$$P'_{m} + P'_{b} = (SF)Z(P_{m} + P_{b})$$
 (Equação 9)

Substituindo a Equação 9 na Equação 8 e considerando que na falha P_m ' = P_m , temos que o tamanho crítico da trinca, para uma tensão aplicada P_m e P_b , poderá ser encontrado por:

$$(SF)Z(P_m + P_b) - P_m = \frac{2.\sigma_f}{\pi}(2. \operatorname{sen}\beta - \operatorname{sen}\theta) \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

SF = Fator de segurança sobre $P_m + P_b$;

Z = Fator de correção calculado utilizando a mecânica da fratura elastoplástica.

3.3 Requisitos iniciais para aplicação do LBB

Para a aplicação do conceito LBB no projeto e fabricação das tubulações, com vistas ao licenciamento da instalação, deve ser demonstrado que os seguintes aspectos são atendidos e que não são potenciais geradores de ruptura da tubulação, considerando a vida útil da instalação (BOURGA et al, 2015; JONG, 2004):

- a) Não existência da degradação da tubulação devido a erosão e/ou cavitação provocadas por condições desfavoráveis do fluxo e das características químicas dos fluidos;
- b) Atendimento das espessuras mínimas estabelecidas pelo código de projeto para as tubulações, cotovelos, penetrações e acessórios, tanto no projeto quanto na fabricação;
- c) Não existência do efeito de golpe de aríete;
- d) A fadiga induzida por fenômenos mecânicos e térmicos é extremamente baixa para ser considerada uma potencial geradora de ruptura da tubulação;
- e) Não deve haver tensões térmicas cíclicas decorrentes de diferenças significativas de temperatura de fluidos em tubulações de um determinado sistema;
- f) A fadiga induzida por fenômenos vibratórios não é significativa para ser considerada uma potencial geradora de trincamento ou falha da tubulação;
- g) A tubulação não deve estar sujeita ao fenômeno de fluência (creep);
- h) A tubulação não deve ser susceptível a corrosão sob tensão com corrosão intergranular;
- i) O material da tubulação não deve ser suscetível a falhas devidas a fragilização, considerando toda a gama de temperaturas de operação do sistema;
- j) Não deve ser aplicado em juntas soldadas individuais ou outros pontos discretos, e sim ser aplicado para um conjunto de tubulações de um determinado sistema ou para trechos de tubulação de um determinado sistema entre dois pontos de ancoragem.

3.4 Materiais em tubulações dos circuitos primários PWR

Os materiais utilizados em tubulações dos circuitos primários PWR são fabricados com aços inoxidáveis austeníticos ou aços ferríticos de baixa liga com alta tenacidade. Conforme observado por Roberts (1981) e Féron (2012), os aços inoxidáveis são muito utilizados em tubulações de circuitos primários com diâmetros menores. No caso das tubulações com diâmetros maiores, normalmente são utilizados tubos de aço fundido centrifugado e tubos de aço forjado. Comumente, as plantas que utilizam tubos de aços ferríticos possuem um revestimento com um aço inoxidável austenítico para proteger contra a corrosão.

A Tabela 1 apresenta alguns exemplos dos materiais utilizados como metal base em tubulações de circuitos primários de reatores PWR.

Tabela 1 – Exemplos materiais	utilizados	como	metal	base	em	tubulações	de	circuitos
primários de reatores PWR.								

País	Materiais	Especificação	Referência	
A 1	DIN 20MnMoNi55 ª	KTA	GOETSCH et al, 1995	
Alemanna	DIN 20MnMoNi55 ª	KTA	HECKMANN; SIEVERS, 2018	
	SA-312-TP316LN	ASME	CUNTO; ANDRADE; MONTEIRO, 2017	
Brasil	SA-376-TP304N SA-351-CF8A	ASME	ELETROBRAS TERMONUCLEAR, 2011	
	DIN 20MnMoNi55 ^a	KTA	ELETROBRAS TERMONUCLEAR, 2003	
China	M 3406 grade Z3CN20.09M ^b	RCC-M	LI CHENGLIANG, 2009	
Coreia	SA-508 CI.1	ASME	LEE et al., 2000	
EUA	SA-376-TP316 SA-376-TP304N SA-351-CF8M SA-351-CF8A SA-516 Gr. 70 SA-106 Gr. C	ASME	WICHMAN; TSAO; MAYFIELD, 1995	
	SA-376-TP304 SA-376-TP316 SA-312-TP304 SA-312-TP316 SA-106 Gr. B	ASME	BEAUDOIN; QUINONES; HARDIN, 1990	
França	M 3301 Z2CN19.10 °	RCC-M	GOETSCH et al., 1995	
SA-351-CF8M		ASME	TANAKA; SHIMIZU; OGATA, 1995	
υαραυ	SA-508 CI. 3	ASME	TANAKA et al., 1995	
^a Material equivalente ao SA-508 Cl. 3 (ASME) ^b Material equivalente ao SA-351-CF3 (ASME) ^c Material equivalente ao SA-182-F304L (ASME)				

Fonte: Conforme indicado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais avaliados

Dentre os materiais que têm sido utilizados como metal base em tubulações de circuitos primários de reatores PWR, foram escolhidos para serem avaliados: SA-508 Cl. 3, SA-106 Gr. B e SA-376-TP304, por apresentarem características e composições químicas distintas de acordo com a norma ASME (2013).

Elomonto	Composição Química, %				
Químico	SA-508 CI. 3 (Aço de Baixa Liga)	SA-106 Gr. B (Aço Carbono)	SA-376-TP304 (Aço Inoxidável)		
С	0,25 máx.	0,30 máx.	0,08 máx.		
Mn	1,20-1,50	0,29-1,06	2,00 máx.		
Р	0,025 máx.	0,035 máx.	0,045 máx.		
S	0,025 máx.	0,035 máx.	0,030 máx.		
Si	0,40 máx.	0,10 min.	0,75 máx.		
Ni	0,40-1,00	0,40 máx.	8,0-11,0		
Cr	0,25 máx.	0,40 máx.	18,0-20,0		
Мо	Mo 0,45-0,60		-		
V	V 0,05 máx.		-		
Nb	0,01 máx.	-	-		
Cu	0,20 máx.	0,40 máx.	-		
Са	0,015 máx.	-	-		
В	0,003 máx.	-	-		
Ti	0,015 máx.	-	-		
AI	0,025 máx.	-	-		

Fonte: ASME, 2013.

4.2 Metodologia aplicada

Conforme estabelecido no NUREG-1061 (1984) e NUREG-0800-SRP 3.6.3 (1987), a metodologia de aplicação do LBB para cada um dos materiais avaliados, consistiu-se basicamente das seguintes etapas:

- Foram obtidas as propriedades à tração e à fratura do material, dadas pelas curvas tensão versus deformação e integral J versus extensão da trinca (curva J-R), ambas conforme os resultados de casos da literatura que realizaram experimentos com esses materiais.
- 2) Foram obtidos os carregamentos aplicados à tubulação na seção do tubo onde são mais desfavoráveis as combinações de tensões e propriedades à tração e à fratura. Este carregamento e a geometria da tubulação foram extraídos do circuito primário de um reator PWR descrito em um caso da literatura.
- 3) Foi postulado uma trinca circunferencial passante nesta seção.
- 4) Foi multiplicado por 10 o vazamento detectado pelo sistema de monitoramento da usina. Neste trabalho, foi considerado que a planta possui um sistema capaz de detectar vazamento de 1,0 gpm (galão por minuto), sendo 1,0 gpm = 3,8 litros/minuto.
- 5) Foi feito a análise do vazamento para a trinca sujeita ao carregamento de operação normal, para determinar o tamanho da trinca (L_Q) que cause o vazamento de 10 gpm (38 litros/minuto). Esta análise foi feita com o auxílio do *software* PICEP.
- 6) Caso 1: Foi aplicado o método J/T da MFEP para verificar a estabilidade de 2 vezes o tamanho da trinca do vazamento (2L_Q) sob o carregamento de operação normal mais SDS (Sismo de Desligamento Seguro). Então foi possível calcular sua margem de segurança (M₁ = J_{IC} / J₁), devendo M₁ ≥ 1,0.

- 7) Caso 2: Foi aplicado o método J/T da MFEP para verificar a estabilidade do tamanho da trinca do vazamento (L_Q) sob o carregamento excessivo, que é 1,414 vezes o carregamento de operação normal mais SDS. Então foi possível calcular sua margem de segurança (M₂ = J_{IC} / J₂), devendo M₂ ≥ 1,0.
- 8) Caso 3: Foi aplicado o método da carga limite para obter o tamanho crítico da trinca (L_{cr3}) sob o carregamento de operação normal mais SDS. Isto foi feito com o auxílio do *software* PICEP. Então foi possível calcular sua margem de segurança (M₃ = L_{cr3} / L_Q), devendo M₃ ≥ 2,0.
- 9) Caso 4: Foi aplicado o método da carga limite para obter o tamanho crítico da trinca (L_{cr4}) sob o carregamento excessivo. Isto foi feito com o auxílio do software PICEP. Então foi possível calcular sua margem de segurança (M₄ = L_{cr4} / L_Q), devendo M₄ ≥ 1,0.

Após esta aplicação com cada um dos três materiais, foi possível avaliá-los quanto aos seus desempenhos para o LBB. Isso foi feito com base na menor margem de segurança (dentre as quatro calculadas) apresentada por esses materiais, considerando tanto à falha por rasgamento dúctil (método J/T da MFEP) quanto à falha por colapso plástico (método da carga limite). Assim, esta margem corresponde ao caso mais crítico, e ao modo de falha mais provável.

Para facilitar o entendimento, a Figura 8 apresenta o esquema que foi utilizado para aplicar o LBB, e consequentemente, calcular as margens de segurança de cada um dos três materiais avaliados.



Figura 8 – Esquema para aplicação do LBB e cálculo das margens de segurança.

Fonte: Autor da dissertação.

4.3 Recursos computacionais

Para obter os resultados e atingir os objetivos propostos, além das informações encontradas na literatura e normas referentes ao assunto, foram utilizados os seguintes *softwares*:

- Software PICEP, do EPRI, para análise do vazamento (etapa 5) e cálculo do tamanho crítico da trinca (etapas 8 e 9).
- Software Excel, da Microsoft, para auxiliar nos cálculos, e elaborar os gráficos e tabelas que foram feitos.

4.4 Propriedades dos materiais

Neste trabalho, as propriedades à tração e à fratura dos materiais avaliados estão apresentadas na Tabela 3. Como existe uma quantidade relativamente grande de experimentos que contemplam ensaios à tração e à fratura nesses materiais, os seguintes critérios de escolha foram adotados para cada um destes:

- O mesmo experimento deveria contemplar tanto o ensaio à tração, quanto o ensaio à fratura, para que as propriedades extraídas nesses ensaios correspondam ao mesmo lote de material.
- As propriedades extraídas nesses ensaios deveriam ser para temperatura a 300°C (±25°C), por ser esta a temperatura de operação considerada neste trabalho para aplicação da metodologia LBB. A tolerância deve-se ao fato de não haver uma diferença significativa nas propriedades, considerando esta faixa de temperatura.
- O ensaio à fratura deveria considerar uma tubulação submetida ao carregamento de momento fletor, por ser este o tipo de carregamento considerado neste trabalho para aplicação da metodologia LBB.
- A geometria da trinca do ensaio à fratura deveria ser uma trinca circunferencial passante (*circumferential through-wall crack*), por ser esta a geometria que é postulada e utilizada na metodologia do LBB.

	SA-508 CI. 3	SA-106 Gr. B	SA-376-TP304	
№ do Experimento	SFB2	IPIRG-2 1.8	DP3-II 4131-1	
E [GPa]	188	193	183	
σ₀ [Mpa]	410	216	131	
σ _R [Mpa]	579	506	459	
σ _f [Mpa]	495	361	295	
α	1,26	1,38	9,58	
n	8,98	5,05	3,21	
J _{IC} [kJ/m²]	652	305	745	
C [kJ/m²]	724	88	255	
m	0,51	1,00	0,86	
Referência	KOYAMA et al., 1999	MIURA, 1999	MIURA, 1999	
^a Lei de Ramberg-Osgood: $\epsilon/\epsilon_0 = \sigma/\sigma_0 + \alpha(\sigma/\sigma_0)^n$ ^b J = J _{IC} + C($\Delta a/r$) ^m , onde r = 1mm. ^c Propriedades a 300°C (±25°C)				

Tabela 3 – Propriedades à tração e à fratura dos materiais avaliados.

Fonte: Conforme indicado.

4.5 Geometria da tubulação e carregamentos aplicados

A geometria da tubulação e o carregamento aplicado utilizados para aplicação do LBB neste trabalho, correspondem ao de uma tubulação de circuito primário de um reator PWR. Estas informações foram extraídas de Jong (2004), que faz referência ao Sistema de Resfriamento do Reator (SRR) de uma instalação nuclear PWR construída em terra, mas que se destina a qualificar um reator a ser empregado para propulsão de um submarino. Conforme Jong (2004), as cargas mecânicas de projeto utilizadas para análises das tubulações do SRR foram:

- Peso próprio do tubo, fluido, válvulas, acessórios e outras cargas permanentes impostas à linha, durante a operação do sistema;
- Pressão de operação normal no interior da tubulação (13 MPa);
- Expansões térmicas que ocorrem nos pontos de ancoragem da tubulação considerando a temperatura de operação normal (300 °C);
- Sismo SDS atuante sobre as tubulações.

Utilizando o *software* de análise de tensões *PIPESTRESS*, Jong (2004) aplicou essas cargas ao trecho da perna quente do circuito primário entre os pontos de ancoragem referentes ao bocal de saída do reator e ao bocal de um dos geradores de vapor. As máximas tensões ocorreram em um ponto "A", que representava a união entre um trecho reto e uma curva (tubulação de 10" SCH 160S). Assim, a seção do tubo deste ponto reflete a seção onde são mais desfavoráveis as combinações de tensões.

Com base neste caso da literatura, a geometria da tubulação e os carregamentos calculados para o ponto "A" também foram considerados para aplicação do LBB deste trabalho, e estão apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Geometria da Tubulação						
Diâmetro Externo	Diâmetro Interno	Espessura	Módulo da Seção Transversal	Área da Seção transversal		
D₀ [mm]	D _i [mm]	t [mm]	Zt [m ³]	A [m ²]		
273.05	215.91	28.57	0.00122	0.0219		
Onde:	Onde:					
A área da seção	o transversal é dad	a por:				
$A = \frac{\pi (D_0^2 - D_i^2)}{4}$						
O módulo da seção transversal é dado por:						
$Z_{t} = \frac{\pi (D_{0}^{4} - D_{i}^{4})}{32D_{0}}$						

Tabela 4 – Geometria da tubulação.

Fonte: JONG, 2004.

Carregamentos Aplicados							
Condição do	Força Axial - sem pressão	Momento	Pressão Interna	Tensão axial devida à pressão	Momento Equivalente Total		
Carregamento	Fa	М	Р	σ Ρa	Мε=Мга+Мм+Мσра		
	[N]	[N.m]	[MPa]	[MPa]	[N.m]		
Op. Normal	15.146	23.769	13,0	21,69	51.012		
Op. Normal + SDS	22.455	28.293	13,0	21,69	55.942		
Excessivo (Op. Normal + SDS)x1,414	31.751	40.006	18,4	30,67	79.102		

Onde:

A tensão axial devida à pressão interna é dada por:

$$\sigma_{Pa} = \frac{PD_i^2}{D_o^2 - D_i^2}$$

O momento da força axial - sem pressão é dado por:

$$M_{Fa} = \frac{F_a Z_t}{A}$$

O momento da tensão axial devida à pressão é dado por:

$$M_{Pa} = \sigma_{Pa} Z_t$$

O momento equivalente total (M_E) foi calculado por meio da soma dos momentos equivalentes relativos à força axial, tensão axial devida à pressão e momento aplicado.

Fonte: JONG, 2004.

4.6 Características da trinca

Atendendo a metodologia do LBB, foi postulado uma trinca circunferencial passante (*circumferential through-wall crack*) na seção do tubo onde são mais desfavoráveis as combinações de tensões, que corresponde à seção do ponto "A", descrito anteriormente.

Nos cálculos realizados com o auxílio do PICEP, foi necessário fazer algumas considerações referentes às características desta trinca, conforme descrito abaixo:

- A trinca foi originada por fadiga;
- A trinca apresenta uma forma elíptica;
- A trinca tem uma área de entrada do fluxo igual à área de saída;
- A rugosidade da superfície da trinca é 0,025 mm, conforme recomendado pelo PICEP para o crescimento de trinca por fadiga;
- O coeficiente de perda de entrada do fluido "sharp-edged entrance" é 0,61 (padrão PICEP);
- O fator de atrito foi definido conforme o cálculo de fator de atrito do PICEP que considera a equação de von Karman e a rugosidade da superfície da trinca.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise do vazamento

A análise do vazamento foi realizada com o auxílio do *software* PICEP (APÊNDICE), que determinou a variação da taxa de vazamento em função do tamanho da trinca. A curva correspondente para cada material está apresentada na Figura 9. Conforme a metodologia do LBB, nesta etapa foi considerada o carregamento de operação normal. Os dados de entrada referente às propriedades de cada um dos três materiais avaliados, a geometria da tubulação e carregamento aplicado, e as características da trinca, estão de acordo com os itens 4.4, 4.5, e 4.6, respectivamente.





Fonte: Autor da dissertação.

Observa-se que os materiais SA-508 Cl. 3 e SA-106 Gr. B apresentam valores muito próximos para taxa de vazamento *versus* tamanho da trinca. Vale ressaltar que a diferença entre os resultados está relacionada apenas aos dados

das propriedades à tração do material, tendo em vista que os demais dados de entrada são os mesmos para os três materiais.

Considerou-se neste trabalho que a planta possui um sistema capaz de detectar vazamento de 1,0 gpm (3,8 litros/minuto). De acordo com a metodologia do LBB, este vazamento deve ser multiplicado por 10 para determinar o tamanho da trinca do vazamento (L_Q). Então, para cada material avaliado, foi feito uma interpolação linear com os dados de saída do *software* PICEP, e assim definir o tamanho e ângulo da trinca do vazamento para 10 gpm (38 litros/minuto). Os resultados referentes aos materiais avaliados estão apresentados na Tabela 6.

Material	Tamanho da trinca do vazamento L _Q [mm]	Ângulo da trinca do vazamento [°]
SA-508 CI. 3	206,23	96,7
SA-106 Gr. B	207,17	97,1
SA-376-TP304	149,82	70,2

Tabela 6 – Tamanho e ângulo da trinca do vazamento para 10 gpm.

Fonte: Autor da dissertação.

Como pode ser observado, o Lo do material SA-376-TP304 é consideravelmente menor que os demais materiais (quase 30%), isto ocorre devido à sua maior tenacidade, que causa plastificação no entorno da ponta da trinca, fazendo com que esta cresça de forma mais arredondada.

5.2 Aplicação do método J/T da MFEP

Conforme a metodologia do LBB, após definido o tamanho da trinca do vazamento (L_Q), foi aplicado o método J/T da MFEP para verificar a estabilidade da trinca. Inicialmente, esta verificação consistiu no cálculo do J aplicado conforme a Equação 4. Quando este é menor do que J_{IC}, o crescimento da trinca não ocorre, mas se for igual ou maior do que J_{IC}, o rasgamento é iniciado.

Para cada um dos materiais avaliados foram feitas duas aplicações do método J/T da MFEP, denominadas Caso 1 e Caso 2, definidos conforme metodologia de aplicação do LBB.

No Caso 1, a verificação considerou o tamanho de trinca de 2L_Q e carregamento de operação normal + SDS. A Tabela 7 apresenta os valores dos parâmetros e as propriedades que foram calculados e utilizados para verificação deste caso.

No Caso 2, a verificação considerou o tamanho de trinca de L_Q e carregamento excessivo, que é 1,414 vezes o carregamento de operação normal mais SDS. A Tabela 8 apresenta os valores dos parâmetros e as propriedades que foram calculados e utilizados para verificação deste caso.

Como pode ser observado, tanto no Caso 1 quanto no Caso 2, em todos os materiais avaliados não ocorre o crescimento da trinca, por apresentarem um J aplicado menor que J_{IC} . Como não ocorre o rasgamento, não há necessidade de calcular o módulo de rasgamento aplicado e do material (T e T_{mat}) para verificar sua estabilidade. Portanto, a margem de segurança foi definida como a razão entre o J_{IC} e o J aplicado, sendo M₁ a margem de segurança correspondente ao Caso 1, e M₂ a margem de segurança correspondente ao Caso 2. A avaliação do desempenho dos materiais para o método J/T foi baseada nos valores dessas margens de segurança.

Tabela 7 – Método J/T da MFEP - Caso 1.

Propriedade/ Parâmetro	SA-508 Cl. 3	SA-106 Gr. B	SA-376- TP304	Descrição
α	1,26	1,38	9,58	Constante adimensional (parâmetro de Ramberg-Osgood) do material obtido a partir dos ensaios de tração.
n	8,98	5,05	3,21	Expoente de encruamento (parâmetro de Ramberg-Osgood) do material obtido a partir dos ensaios de tração.
σ_0	410	216	131	[MPa] Tensão de escoamento do material obtido a partir dos ensaios de tração.
Е	188	193	183	[GPa] Módulo de elasticidade do material obtido a partir dos ensaios de tração.
ε ₀	0,0022	0,0011	0,0007	Propriedade calculada do material. $\rightarrow \epsilon_0 = \sigma_0 / E.$
JIC	652.000	305.000	745.000	[J/m ²] – Integral J associada ao início do crescimento da trinca, obtido a partir dos ensaios à fratura.
а	0,20623	0,20717	0,14982	[m] Metade do tamanho da trinca. $\rightarrow a = (2L_Q) / 2 = L_Q.$
θ	1,6871	1,6948	1,2256	[Radianos] Metade do ângulo da trinca.
t	0,02857	0,02857	0,02857	[m] Espessura da parede do tubo.
R	0,12224	0,12224	0,12224	[m] Raio Médio do tubo.
М	55.942	55.942	55.942	[N.m] Momento equivalente total na condição de carregamento de operação normal + SDS.
Mo	117.760	61.148	77.742	[N.m] – Calculado conforme equações do manual do EPRI (ZAHOOR, 1989).
fb	3,4603	3,7450	1,5553	Calculado conforme equações do manual do EPRI (ZAHOOR, 1989).
\mathbf{H}_{1}	0,6792	1,0480	1,4880	Valor obtido a partir das tabelas do manual do EPRI (ZAHOOR, 1989), fazendo interpolação linear dos dados.
J1	38.672	57.352	65.616	[J/m ²] Integral J aplicado para o Caso 1, conforme Equação 4.
M 1	16,86	5,32	11,35	Margem de segurança correspondente a aplicação do Método J/T considerando tamanho de trinca de $2L_Q$ e carregamento de operação normal + SDS. $\rightarrow M_1 = J_{IC} / J_1$

Fonte: Autor da dissertação.

Tabela 8 – Método J/T da MFEP - Caso 2.

Propriedade/ Parâmetro	SA-508 Cl. 3	SA-106 Gr. B	SA-376- TP304	Descrição
α	1,26	1,38	9,58	Constante adimensional (parâmetro de Ramberg-Osgood) do material obtido a partir dos ensaios de tração.
n	8,98	5,05	3,21	Expoente de encruamento (parâmetro de Ramberg-Osgood) do material obtido a partir dos ensaios de tração.
σ_0	410	216	131	[MPa] Tensão de escoamento do material obtido a partir dos ensaios de tração.
E	188	193	183	[GPa] Módulo de elasticidade do material obtido a partir dos ensaios de tração.
ε ₀	0,0022	0,0011	0,0007	Propriedade calculada do material. $\rightarrow \epsilon_0 = \sigma_0 / E.$
Jic	652.000	305.000	745.000	[J/m ²] – Integral J associada ao início do crescimento da trinca, obtido a partir dos ensaios à fratura.
а	0,103115	0,103585	0,07491	[m] Metade do tamanho da trinca. $\rightarrow a = L_Q / 2.$
θ	0,8435	0,8474	0,6128	[Radianos] Metade do ângulo da trinca.
t	0,02857	0,02857	0,02857	[m] Espessura da parede do tubo.
R	0,12224	0,12224	0,12224	[m] Raio Médio do tubo.
М	79.102	79.102	79.102	[N.m] Momento equivalente total na condição de carregamento excessivo.
Mo	377.275	197.998	148.949	[N.m] – Calculado conforme equações do manual do EPRI (ZAHOOR, 1989).
fb	0,6041	0,6465	0,3647	Calculado conforme equações do manual do EPRI (ZAHOOR, 1989).
H1	0,6500	0,9410	1,0560	Valor obtido a partir das tabelas do manual do EPRI (ZAHOOR, 1989), fazendo interpolação linear dos dados.
J_2	13.486	14.308	24.803	[J/m ²] Integral J aplicado para o Caso 2, conforme Equação 4.
M 2	48,35	21,32	30,04	Margem de segurança correspondente a aplicação do Método J/T considerando tamanho de trinca de L_Q e carregamento excessivo. $\rightarrow M_2 = J_{IC} / J_2$

Fonte: Autor da dissertação.

A Figura 10 apresenta a margem de segurança M_1 para cada um dos materiais avaliados. O material SA-508 Cl. 3, sendo um aço de baixa liga, mostrou-se com um desempenho acima dos demais para falha devido rasgamento dúctil. Já o material SA-106 Gr. B, um aço carbono, apresentou menor desempenho em relação aos demais materiais, pois seu M_1 corresponde a apenas 32% e 47% do M_1 dos materiais SA-508 Cl. 3 e SA-376-TP304, respectivamente.





Os valores apresentados de M₁ também revela a relevância das propriedades à tração e à fratura do material para estes resultados. Os desempenhos dos materiais SA-508 Cl. 3 e SA-106 Gr. B, que possuem o L_Q próximo, são diferentes por basicamente dois motivos: primeiro por causa do J aplicado (J₁), que deram resultados muito distintos devido as propriedades à tração; e segundo por causa da diferença entre os J_{IC}, que é uma propriedade à fratura.

Considerando o Caso 2, a Figura 11 apresenta a margem de segurança M₂ para cada um dos materiais avaliados. Mesmo com o aumento do carregamento e redução à metade do tamanho da trinca do Caso 1, o desempenho do material

Fonte: Autor da dissertação.

SA-508 Cl. 3 manteve-se acima dos demais. O material SA-106 Gr. B continuou tendo o menor desempenho, porém ao comparar com os resultados do Caso 1, ocorreu uma melhora em relação aos demais materiais, pois seu M₂ agora corresponde a 44% e 71% do M₂ dos materiais SA-508 Cl. 3 e SA-376-TP304, respectivamente.



Figura 11 – Margem de segurança M₂.

No Caso 2 a diferença entre os desempenhos dos materiais SA-508 Cl. 3 e SA-106 Gr. B, que possuem o L_Q próximo, foi causada basicamente pela diferença entre os seus J_{IC} , e não pelo J aplicado (J_2), que deram valores relativamente próximos. Este fato revela que quanto menor for o tamanho da trinca verificada, menor será a sua relevância no resultado do J aplicado.

O material SA-376-TP304, mesmo sendo um aço inoxidável tenaz e com boas propriedades à fratura, obteve um desempenho intermediário entre os demais materiais nos dois casos. Isso mostra que na aplicação do método J/T da MFEP, o material ter melhores propriedades à fratura, não significa que ele terá o maior desempenho, pois as propriedades à tração e o tamanho da trinca verificada também exercem grande influência nos resultados.

Fonte: Autor da dissertação.

5.3 Aplicação do método da carga limite

De acordo com a metodologia do LBB, também deve ser aplicado o método da carga limite para verificar se ocorre a falha por colapso plástico. Esta aplicação foi feita com o auxílio do *software* PICEP (APÊNCICE), que utiliza basicamente as Equações 7 e 10 para calcular o tamanho crítico da trinca (L_{cr}) para este modo de falha.

Conforme recomendado por Norris e Chexal (1987) para aplicação do LBB, o fator de segurança (SF) considerado foi 1,0. Para o fator de correção (Z), que depende do tipo e das propriedades do material, seguiram-se as equações do ASME (2010). Os valores calculados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela	9 –	Fator	de	correção	Ζ.
--------	-----	-------	----	----------	----

Material	Fator de correção Z
SA-508 CI. 3	1,2749
SA-106 Gr. B	1,2486
SA-376-TP304	1,0000

Fonte: Autor da dissertação.

Para cada um dos materiais avaliados foram feitas duas aplicações do método da carga limite, denominadas Caso 3 e Caso 4, definidos conforme metodologia de aplicação do LBB.

O Caso 3 considera o carregamento de operação normal + SDS para calcular o tamanho crítico da trinca (L_{cr}). Já o Caso 4 considera o carregamento excessivo. Os valores calculados pelo PICEP para os Casos 3 e 4, já considerando o fator de correção (Z) de cada material, estão apresentados na Tabela 10.

	Tamanho crítico da trinca				
Matorial	Caso 3	Caso 4 Carregamento excessivo			
Material	Carregamento de operação normal + SDS				
	L _{cr3} [mm]	L _{cr4} [mm]			
SA-508 Cl. 3	452,29	415,62			
SA-106 Gr. B	421,73	378,94			
SA-376-TP304	415,62	378,94			

Tabela 10 – Tamanho crítico da trinca - Casos 3 e 4.

Fonte: Autor da dissertação.

Como pode ser observado, tanto no Caso 3 quanto no Caso 4, não ocorre o colapso plástico nos materiais avaliados, pois todos apresentam o tamanho da trinca do vazamento (L_Q) menor que o tamanho crítico da trinca (L_{cr}). Portanto, a margem de segurança foi definida como a razão entre o L_{cr} e o L_Q , sendo M₃ a margem de segurança correspondente ao Caso 3, e M₄ a margem de segurança correspondente ao Caso 4. A avaliação do desempenho dos materiais para o método da carga limite foi baseada nos valores dessas margens de segurança.

A Figura 12 apresenta a margem de segurança M₃ para cada um dos materiais avaliados. De acordo com a metodologia do LBB, para o carregamento correspondente ao Caso 3, esta margem deveria ser maior ou igual a 2,0, e isso foi atendido por todos os materiais. O material SA-376-TP304, sendo um aço de inoxidável, mostrou-se com um desempenho acima dos demais para falha devido colapso plástico. O material SA-106 Gr. B, assim como ocorreu no método J/T da MFEP, apresentou o menor desempenho em relação aos demais materiais, pois seu M₃ corresponde a 93% e 74% do M₃ dos materiais SA-508 Cl. 3 e SA-376-TP304, respectivamente.

Interessante verificar que o material SA-376-TP304 apresentou um melhor desempenho mesmo tendo o menor tamanho crítico da trinca (L_{cr3}), consequência da sua baixa tensão de escoamento generalizada (σ_f). Na verdade, como os valores de L_{cr} estão relativamente próximos, seu bom desempenho deve-se, principalmente, ao seu menor tamanho da trinca do vazamento (L_Q), ou seja, a sua detecção de vazamento ocorreria antes dos outros materiais avaliados.



Figura 12 – Margem de segurança M₃.

Considerando o Caso 4, a Figura 13 apresenta a margem de segurança M₄ para cada um dos materiais avaliados. Proporcionalmente, estes resultados são muito parecidos aos que ocorreram no Caso 3, pois as únicas diferenças estão no tamanho crítico da trinca (L_{cr4}) que são menores devido o aumento do carregamento.

Pode-se afirmar que o fator de correção (Z) não influenciou significativamente nos resultados das margens de segurança M_3 e M_4 , pois mesmo que este não fosse considerado, os resultados seriam muito semelhantes, tendo uma variação de no máximo 6%.

Fonte: Autor da dissertação.



Figura 13 – Margem de segurança M₄.

5.4 Avaliação do desempenho para o LBB

A Tabela 11 apresenta as margens de segurança M_1 , M_2 , M_3 , e M_4 , dos materiais avaliados. M_1 e M_2 consideram a falha por rasgamento dúctil (método J/T da MFEP). M_3 e M_4 consideram a falha por colapso plástico (método da carga limite).

Material	M 1	M2	Мз	M4
SA-508 CI. 3	16,86	48,35	2,19	2,02
SA-106 Gr. B	5,32	21,32	2,04	1,83
SA-376-TP304	11,35	30,04	2,77	2,53

Tabela 11 – Margens de segurança dos materiais.

Fonte: Autor da dissertação

Diante dos resultados apresentados, nos três materiais avaliados foi demostrado o LBB por atenderem os limites estabelecidos na metodologia. Isto

Fonte: Autor da dissertação.

significa que se pode usufruir das vantagens da sua aplicação, tais como, a exclusão das rupturas postuladas da base de projeto, e a retirada das restrições para chicoteamento de tubulações e barreiras antijato.

Apesar dos três materiais terem atendido o LBB, ainda é possível avaliar os seus desempenhos de uma forma generalizada. Para isso, foi definido que a margem de segurança de cada material corresponderia à menor margem dentre as quatro que foram calculadas (ou seja, o M₄), por ser este, o caso mais crítico, e com o modo de falha mais provável.

Sendo assim, o material SA-376-TP304 obteve o melhor desempenho para o LBB por possuir a maior margem de segurança dentre os três materiais avaliados. Por outro lado, o material SA-106 Gr. B a menor margem, e consequentemente, o menor desempenho.

6 CONCLUSÕES

As principais conclusões decorrentes deste trabalho são:

- A metodologia do LBB é bem conservadora em várias etapas, e isso, certamente, eleva o seu nível de segurança e confiabilidade. Vale salientar que a sua aplicação foi feita de forma consistente e de acordo com o estabelecido no NUREG-1061 (1984) e NUREG-0800-SRP 3.6.3 (1987).
- As utilizações de dados extraídos de casos da literatura deram veracidade aos resultados obtidos. Isto ocorreu no caso das propriedades dos materiais, da geometria da tubulação, e dos carregamentos aplicados. Inclusive, foi necessário estabelecer alguns requisitos para estas extrações, e assim, possibilitar a aplicação desses dados. Para tanto, foram verificados: se os ensaios a tração e à fratura dos três materiais correspondiam ao mesmo lote de material e se ocorreram dentro das mesmas condições; e se geometria da tubulação e os carregamentos aplicados correspondiam ao circuito primário de um reator PWR.
- Na etapa de análise do vazamento, o *software* PICEP foi uma importante ferramenta para aplicação do LBB. Através deste, foi possível determinar as curvas de taxa de vazamento *versus* tamanho de trinca para os três materiais avaliados. Verificou-se a influência das propriedades à tração, como ocorreu no caso do material SA-376-TP304, que apresentou um tamanho de trinca consideravelmente menor que os demais materiais, por causa da sua maior tenacidade. Além disso, já na aplicação do método da carga limite, este *software* também auxiliou nos cálculos do tamanho crítico da trinca.
- Nos quatro casos avaliados, as margens de segurança dos materiais avaliados atenderam aos limites estabelecidos na metodologia, ou seja, qualquer um dos três atende o mínimo necessário e pode usufruir das vantagens que a aplicação do LBB pode proporcionar.
- Dentre os materiais avaliados, e considerando os dois modos de falha abordados na metodologia do LBB, os materiais SA-508 Cl. 3 e SA-376-TP304 mostraram o melhor desempenho para falha por rasgamento dúctil

e falha por colapso plástico, respectivamente. Nesses dois modos de falha, o material SA-106 Gr. B apresentou o menor desempenho dos três materiais.

 Em todos os três materiais, o caso mais crítico e com o modo de falha mais provável foi o Caso 4. Este caso considera o carregamento excessivo, e avalia a falha por colapso plástico. Como o material SA-376-TP304 teve a maior margem de segurança para este caso, considerou-se então, que este obteve o melhor desempenho para o LBB dentre os três materiais avaliados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, T.L. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications.** 3rd Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005.

ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section II, Part A, Ferrous Materials Specifications. 2013.

ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components. 2010.

ASTM E1820. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. ASTM Volume 03.01. 2013.

ATOMIC ENERGY COMMISSION. **10 CFR Part 50 – Appendix A – General Design Criteria for Nuclear Power Plants.** 1971.

BEAUDOIN, B.; QUINONES, D.; HARDIN, T. Leak-before-break Application in US Light Water Reactor Balance-of-Plant Piping. International Journal of Pressure Vessels and Piping 43 (1990) 67-83.

BOURGA, R.; MOORE, P.; JANIN, Y. J.; WANG, B.; SHARPLES, J. Leak-beforebreak: Global Perspectives and Procedures. International Journal of Pressure Vessels and Piping 129-130 (2015) 43-49.

CUNTO, G. G.; Aplicação Do Conceito "Vazamento Antes Da Falha" (LEAK BEFORE BREAK) em Tubulações de Aço 316LN Soldado com Metal de Adição 316L. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2017.

CUNTO, G. G.; ANDRADE, A. H. P.; MONTEIRO, W. A.; **Application of Leak-Before-Break Concept in 316LN Austenitic Steel Pipes Welded Using 316L.** Frattura ed Integrità Strutturale. 41 (2017) 332-338. ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A. Final Safety Analysis Report - FSAR Angra 1. Eletronuclear. Rev. 36. 2011.

ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A. Final Safety Analysis Report - FSAR Angra 2. Eletronuclear. Rev. 7. 2003.

ELETRONUCLEAR. **RIMA – Relatório de Impacto Ambiental da Unidade 3 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto**. Disponível em:<http://www.eletronuclear.gov.br/Portals/0/RIMAdeAngra3/03_caracterizacao. html> Acesso em 22 de Abril de 2018.

FÉRON, D. Nuclear Corrosion Science and Engineering. Woodhead Publishing Limited. 2012.

GOETSCH, D.; BIENIUSSA, K.; SCHULZ, H.; JALOUNEIX, J. Integrity of The Reactor Coolant Boundary of the European Pressurized Water Reactor (EPR). Requirements for the Application of the Break Precluding Concept for the Main Coolant Lines. In: Proceedings of the seminar on leak before break in reactor piping and vessels. NUREG/CP-0155. 1995. p. 17-29.

HECKMANN, K.; SIEVERS, J. Leak-before-break Analyses of PWR and BWR Piping Concerning size Effects. Nuclear Engineering and Design 326 (2018) 383-391.

IAEA. **PRIS Database, Reactor Status Report**, Disponível em: https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx> Acesso em 30 de Abril de 2019.

IAEA. Applicability of the Leak Before Break Concept, IAEA, VIENNA, ISSN 1011-4289, 1993.

KOYAMA, K.; MUROYA, I.; TANAKA, T.; NAKAMURA, T. Low Alloy Steel Piping Test for Fracture Criteria of Leak before Break. Nuclear Engineering and Design 191 (1999) 147-156. JONG, R. P. Avaliação de Tubulações Trincadas em Sistemas Primários de **Reatores Nucleares PWR**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2004.

LEE, B. S.; OH, Y. J.; YOON, J. H.; KUK, I. H.; HONG, J. H. J-R Fracture Properties of SA508-1a Ferritic Steels and SA312-TP347 Austenitic Steels for Pressurized Water Reactor's (PWR) Primary Coolant Piping. Nuclear Engineering and Design 199 (2000) 113-123.

LI CHENGLIANG, YANG MENGJIA. Applicability of Leak-Before-Break (LBB) Technology for the Primary Coolant Piping System to CPR1000 Nuclear Power Plants in China. 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. 2009. SMiRT 20-Division 2, Paper 1884.

MANESCHY, J. E.; MIRANDA, C. A. J.; **Mecânica da Fratura na Indústria Nuclear**. Rio de Janeiro, Lithos Edições de Arte, 2014.

MATTAR NETO, M. Uma Abordagem para a Definição de Critérios, Códigos e Normas para o Projeto Mecânico e Estrutural de Componentes de Centrais Nucleares. 5º Congresso Geral de Energia Nuclear. 1994.

MIURA, N. Approximate Evaluation Method for Ductile Fracture Analysis of a Circumferentially Through-Wall-Cracked Pipe Subjected to Combined Bending and Tension. Nuclear Engineering and Design 191 (1999) 177-194.

NORRIS, D. M.; CHEXAL, B. **PICEP: Pipe Crack Evaluation Program**. EPRI NP-3596-SR, Revision 1, 1987.

NUREG-1061. Report of the U.S Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee, Evaluation of Potential for Pipe Breaks. Volume 3. USNRC. 1984.

NUREG-0800-SRP 3.6.3. Leak-Before-Break Evaluation Procedures. USNRC. 1987.

ROBERTS, J. T. A. Structural Materials in Nuclear Power Systems. Plenum Press, 1981.

TANAKA, T.; SHIMIZU, S.; OGATA, Y. Fracture Mechanics Evaluation for a **Typical PWR Primary Coolant Pipe**. In: Proceedings of the seminar on leak before break in reactor piping and vessels. NUREG/CP-0155. 1995. p. 65-71.

TANAKA, T. et al. **Crack Stability Analysis of Low Alloy Steel Primary Coolant Pipe**. In: Leak Before Break in Reactor Piping and Vessels. Volume 1. 1995. p. 75-82.

WICHMAN, K.; TSAO, J.; MAYFIELD, M. LBB Application in the U.S. Operating and Advanced Reactor. In: Leak Before Break in Reactor Piping and Vessels. Volume 1. 1995. p. 13-20.

ZAHOOR, A. **Ductile Fracture Handbook**. NP-6301-D Research Project, Electronic Power Research Institute, 1989.

APÊNDICE – DADOS DE ENTRADA E SAÍDA DO SOFTWARE PICEP

RESEARCH PROGRAMS

THE SUBJECT COMPUTER PROGRAM HAS BEEN CLASSIFIED BY EPRI AS A RESEARCH PROGRAM. AS SUCH, IT HAS NOT BEEN DEVELOPED AND TESTED TO THE EXTENT THAT A PRODUCTION PROGRAM WOULD BE, AND UNFORSEEN RESULTS MAY OCCUR WHEN RUNNING THE PROGRAM. EPRI DOES NOT MAKE ANY WARRANTY OR REPRESENTATION WHATSOEVER, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS OF ANY PURPOSE WITH RESPECT TO THE PROGRAM; NOR DOES EPRI ASSUME ANY LIABILITY WHATSOEVER WITH RESPECT TO ANY USE OF THE PROGRAM OR ANY PORTION THEREOF OR WITH RESPECT TO ANY DAMAGES WHICH MAY RESULT FROM SUCH USE.

PICEP VERSION 06/15/92

PIPE CRACK EVALUATION PROGRAM EPRI REPORT NP-3569-SR REV.2 BY CHEXAL,QUINONES & HOROWITZ

PICEP INPUT AS PER EPRI REPORT NP-3569-REV.2

ECHO PRINT OF INPUT DATA

SA-508 Cl.3 - Análise do Vazamento

MODE 0	IPLAS 2	ISOL 2	NSI 1						
	DO 273	1	THICK .0286						
IF	DIR 0	IFAREA 1	NDIV 20	. 00	COD 000E+00	ر 000 ـ	4F)0e+00		
YC	UNG	S	0	E0	ALPHA	FÆ	ACN	FSR	Z
18 18. 100D+	8D+12 01	.410D	+09	.000D+00	.126D+01	. 898	3D+01	.495D+09	.127D+01
IN	PRE	S	т0	РВ	TR	АСТ	BI	MOM	PMSTR
3	0.	08 3	00.00	.1E+06	1514	6.	233	769.	0.
.25	EK 000D-04	4 1	AR 000	N90 0	N45 0		CD .000	FFRED .0000	
END OF	ECHO I	PRINT							

CRITICAL CRACK LENGTH (NO CORRECTION FACTORS) 18.77 in. 476.74 mm CRITICAL CRACK LENGTH WITH Z CORRECTION FACTOR 18.05 in. 458.40 mm

UNITS:SI CONVERTED TO IN., LBF., DEGF, IN-LBF, PSI

PIPE DATA

PIPE	OUTSIDE DIAMETER	=	.1075D+02
PIPE	THICKNESS	=	.1125D+01

CRACK	DATA

CRACK SHAPE CRACK ORIENTATION CRACK SURFACE ROUGHNESS HALF CRACK LENGTH INCREMENT NUMBER OF INCREMENTS NUMBER OF 45 DEG TURNS NUMBER OF 90 DEG TURNS EXIT TO INLET AREA RATIO		ELLIPTICAL CIRCUMFERENTIAL .9843D-03 .4692D+00 20 0 0 1.00
MATERIAL DATA		
YOUNG'S MODULUS YIELD STRESS RAMBERG-OSGOOD EXPONENT RAMBERG-OSGOOD CONSTANT FLOW STRESS YIELD STRAIN REFERENCE STRESS REFERENCE STRAIN		.273D+08 .595D+05 .898D+01 .126D+01 .718D+05 .218D-02 .595D+05 .218D-02
LOAD DATA		
AXIAL (NON-PRESSURE) LOAD TOTAL BENDING MOMENT TOTAL AXIAL STRESS TOTAL BENDING STRESS	= = =	.341D+04 .210D+06 .322D+04 .254D+04
FLUID DATA		
PRESSURE TEMPERATURE ENTRANCE LOSS COEFFICENT FRICTION FACTOR BACK PRESSURE		.189D+04 .572D+03 .610D+00 .376D-01 .145D+02

OUTPUT DATA

SA-508 Cl.3 - Análise do Vazamento

CRITICAL CRACK LENGTH (Z=1) 18.7691 in. 476.7360 mm SUBCOOLING = 56.3 DEG F 31.3 DEG C

	CRACK LENGTH INCHES	COD INCHES	FL/D	LEAK FLOW RATE GPM @ 200 F	CHOKED
1	.9385	.000392	746.5	.0102	YES
2	1.8769	.000830	352.5	.0627	YES
3	2.8154	.001318	210.6	.1933	YES
4	3.7538	.001872	106.5	.5128	YES
5	4.6923	.002520	62.0	1.1205	YES
6	5.6307	.003297	38.9	2.1915	YES
7	6.5692	.004254	25.4	3.9984	YES
8	7.5077	.005452	17.0	6.9501	YES
9	8.4461	.006961	11.6	11.6295	YES
10	9.3846	.008868	8.0	18.3930	YES
11	10.3230	.011272	5.6	28.3832	YES
12	11.2615	.014284	3.9	42.8788	YES
13	12.1999	.018035	2.8	63.1319	YES
14	13.1384	.022673	2.0	90.7944	YES
15	14.0769	.028367	1.5	127.7361	YES

	16 17 18 19 20	15.0153 15.9538 16.8922 17.8307 18.7691 CRACK LENGTH MM	.035307 .043711 .053801 .065422 .071188 COD MM	1.1 .8 .5 .4 FL/D	176.1376 238.5568 317.8823 414.7455 477.9768 LEAK FLOW RATE Kg/sec	YES YES YES YES NO CHOKED
1	$1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \\ 9 \\ 20 \\$	23.8368 47.6736 71.5104 95.3472 119.1840 143.0208 166.8576 190.6944 214.5312 238.3680 262.2048 286.0416 309.8784 333.7152 357.5520 381.3888 405.2256 429.0624 452.8992 476.7360	.009955 .021080 .033481 .047556 .064001 .083752 .108062 .138468 .176812 .225255 .286297 .362812 .458092 .575895 .720510 .896804 1.110255 1.366534 1.661708 1.808174	746.5352.5210.6106.562.038.925.417.011.68.05.63.92.82.01.51.1.8.6.5.4	$\begin{array}{c} .0006\\ .0038\\ .0117\\ .0311\\ .0681\\ .1331\\ .2429\\ .4222\\ .7064\\ 1.1173\\ 1.7241\\ 2.6046\\ 3.8349\\ 5.5152\\ 7.7591\\ 10.6992\\ 14.4908\\ 19.3093\\ 25.1931\\ 29.0340 \end{array}$	YES YES YES YES YES YES YES YES YES YES

THE SUBJECT COMPUTER PROGRAM HAS BEEN CLASSIFIED BY EPRI AS A RESEARCH PROGRAM. AS SUCH, IT HAS NOT BEEN DEVELOPED AND TESTED TO THE EXTENT THAT A PRODUCTION PROGRAM WOULD BE, AND UNFORSEEN RESULTS MAY OCCUR WHEN RUNNING THE PROGRAM. EPRI DOES NOT MAKE ANY WARRANTY OR REPRESENTATION WHATSOEVER, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS OF ANY PURPOSE WITH RESPECT TO THE PROGRAM; NOR DOES EPRI ASSUME ANY LIABILITY WHATSOEVER WITH RESPECT TO ANY USE OF THE PROGRAM OR ANY PORTION THEREOF OR WITH RESPECT TO ANY DAMAGES WHICH MAY RESULT FROM SUCH USE.

PICEP VERSION 06/15/92

PIPE CRACK EVALUATION PROGRAM EPRI REPORT NP-3569-SR REV.2 BY CHEXAL,QUINONES & HOROWITZ

PICEP INPUT AS PER EPRI REPORT NP-3569-REV.2

ECHO PRINT OF INPUT DATA

SA-106 Gr. B - Análise do Vazamento

MODE 0	IPLAS 2	ISOL 2	NSI 1						
	DO .273	1	THICK .0286						
IF	DIR 0	IFAREA 1	NDIV 20	0 00.	COD)00e+00	AF .0000E	+00		
YC	OUNG	S	60	EO	ALPHA	FACN		FSR	Z
19 19. 100D+)3D+12 -01	.2160	0+09	.000D+00	.138D+01	.505D+	01.3	61D+09	.125D+01
IN		S	т0	PB	TRA	АСТ	BMOM		PMSTR
3	0.	08 3	800.00	.1E+06	15146	5.	23769		0.
.25	EK 5000d-0	4 1	AR 000	N90 0	N45 0	CI	D 000	FFRED	
END OF	ECHO	PRINT							
CRIT 17. CRIT 16.	ICAL C 57 in. ICAL C 84 in.	RACK LE RACK LE	NGTH (446.1 NGTH W 427.8	NO CORRECT 8 mm ITH Z CORF 4 mm	ION FACTORS	5) For			

UNITS:SI CONVERTED TO IN., LBF., DEGF, IN-LBF, PSI

PIPE DATA

PIPE	OUTSIDE DIAMETER	=	.1075D+02
PIPE	THICKNESS	=	.1125D+01

CRACK	DATA

CRACK SHAPE CRACK ORIENTATION CRACK SURFACE ROUGHNESS HALF CRACK LENGTH INCREMENT NUMBER OF INCREMENTS NUMBER OF 45 DEG TURNS NUMBER OF 90 DEG TURNS EXIT TO INLET AREA RATIO	= ELLIPTICAL = CIRCUMFERENTIAL = .9843D-03 = .4391D+00 = 20 = 0 = 0 = 0 = 1.00			
MATERIAL DATA				
YOUNG'S MODULUS YIELD STRESS RAMBERG-OSGOOD EXPONENT RAMBERG-OSGOOD CONSTANT FLOW STRESS YIELD STRAIN REFERENCE STRESS REFERENCE STRAIN	= .280D+08 = .313D+05 = .505D+01 = .138D+01 = .524D+05 = .112D-02 = .313D+05 = .112D-02			
LOAD DATA				
AXIAL (NON-PRESSURE) LOAD TOTAL BENDING MOMENT TOTAL AXIAL STRESS TOTAL BENDING STRESS	= .341D+04 = .210D+06 = .322D+04 = .254D+04			
FLUID DATA PRESSURE TEMPERATURE ENTRANCE LOSS COEFFICENT FRICTION FACTOR BACK PRESSURE	= .189D+04 = .572D+03 = .610D+00 = .569D-01 = .145D+02			

OUTPUT DATA

SA-106 Gr. B - Análise do Vazamento

CRITICAL CRACK LENGTH (Z=1) 17.5660 in. 446.1760 mm SUBCOOLING = 56.3 DEG F 31.3 DEG C

(CRACK LENGTH INCHES	COD INCHES	FL/D	LEAK FLOW RATE GPM @ 200 F	CHOKED
1	.8783	.000357	819.4	.0083	YES
2	1.7566	.000754	388.2	.0508	YES
3	2.6349	.001193	245.2	.1518	YES
4	3.5132	.001686	129.7	.3923	YES
5	4.3915	.002254	75.7	.8525	YES
6	5.2698	.002925	47.8	1.6530	YES
7	6.1481	.003736	31.5	2.9855	YES
8	7.0264	.004737	21.4	5.1389	YES
9	7.9047	.005985	14.7	8.5332	YES
10	8.7830	.007553	10.2	13.6479	YES
11	9.6613	.009526	7.2	20.9686	YES
12	10.5396	.012011	5.1	31.6493	YES
13	11.4179	.015139	3.6	46.9858	YES
14	12.2962	.019073	2.6	68.3662	YES
15	13.1745	.024009	1.9	97.7037	YES

	16 17 18 19 20	14.0528 14.9311 15.8094 16.6877 17.5660 CRACK LENGTH MM	.030151 .037537 .045288 .048348 .023449 COD MM	1.4 1.0 .8 .7 1.9 FL/D	137.0954 187.9161 245.9581 279.1960 126.5452 LEAK FLOW RATE Kg/sec	YES YES YES YES CHOKED
1	$ \begin{array}{c} 1\\ 2\\ 3\\ 4\\ 5\\ 6\\ 7\\ 8\\ 9\\ 10\\ 11\\ 12\\ 13\\ 14\\ 15\\ 16\\ 17\\ 18\\ 19\\ 20\\ \end{array} $	22.3088 44.6176 66.9264 89.2352 111.5440 133.8528 156.1616 178.4704 200.7792 223.0880 245.3968 267.7056 290.0144 312.3232 334.6320 356.9408 379.2496 401.5584 423.8672 446.1760	.009069 .019144 .030303 .042837 .057255 .074288 .094904 .120317 .152023 .191836 .241960 .305085 .384539 .484455 .609833 .765823 .953451 1.150317 1.228050 .595605	$\begin{array}{c} 819.4\\ 388.2\\ 245.2\\ 129.7\\ 75.7\\ 47.8\\ 31.5\\ 21.4\\ 14.7\\ 10.2\\ 7.2\\ 5.1\\ 3.6\\ 2.6\\ 1.9\\ 1.4\\ 1.0\\ .8\\ .7\\ 1.9\end{array}$.0005 .0031 .0092 .0238 .0518 .1004 .1814 .3122 .5183 .8290 1.2737 1.9225 2.8541 4.1528 5.9349 8.3277 11.4147 14.9404 16.9594 7.6868	YES YES YES YES YES YES YES YES YES YES

THE SUBJECT COMPUTER PROGRAM HAS BEEN CLASSIFIED BY EPRI AS A RESEARCH PROGRAM. AS SUCH, IT HAS NOT BEEN DEVELOPED AND TESTED TO THE EXTENT THAT A PRODUCTION PROGRAM WOULD BE, AND UNFORSEEN RESULTS MAY OCCUR WHEN RUNNING THE PROGRAM. EPRI DOES NOT MAKE ANY WARRANTY OR REPRESENTATION WHATSOEVER, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS OF ANY PURPOSE WITH RESPECT TO THE PROGRAM; NOR DOES EPRI ASSUME ANY LIABILITY WHATSOEVER WITH RESPECT TO ANY USE OF THE PROGRAM OR ANY PORTION THEREOF OR WITH RESPECT TO ANY DAMAGES WHICH MAY RESULT FROM SUCH USE.

PICEP VERSION 06/15/92

PIPE CRACK EVALUATION PROGRAM EPRI REPORT NP-3569-SR REV.2 BY CHEXAL,QUINONES & HOROWITZ

PICEP INPUT AS PER EPRI REPORT NP-3569-REV.2

ECHO PRINT OF INPUT DATA

SA-376-TP304 - Análise do Vazamento

MODE 0	IPLAS 2	ISOL 2	NSI 1					
	DO .2731	-	THICK .0286					
IF	DIR I O	FAREA 1	NDIV 20	. 00	COD 000e+00	AF .0000e+00		
YO	UNG	:	s0	E0	ALPHA	FACN	FSR	z
.18 100D+	3D+12 01	.131	D+09	.000D+00	.958D+01	.321D+01	.295D+09	.100D+01
IN	PRES	5	т0	РВ	TRA	ACT E	3MOM	PMSTR
РВ 3	.1E+0 0.	8	300.00	.1E+06	15146	5. 23	3769.	0.
.25	ek 000d-04	ļ i	AR 1.000	N90 0	N45 0	CD .000	FFRED .0000	
END OF	ECHO P	RINT						
CRIT 16.	ICAL CR 84 in.	ACK L	ENGTH (427.8	NO CORREC ⁻ 4 mm	TION FACTORS	5)		
U	NITS:SI	CONV	ERTED T	O IN., LB	F.,DEGF,IN-L	_BF,PSI		
P -	IPE DAT	A -						
Р		STDE	DTAMETE	R	= 1075	50+02		

	OUTSIDE DIAMETER	_	.10/50+02
PIPE	THICKNESS	=	.1125D+01

CRACK DATA

CRACK SHAPE CRACK ORIENTATION CRACK SURFACE ROUGHNESS HALF CRACK LENGTH INCREMENT NUMBER OF INCREMENTS NUMBER OF 45 DEG TURNS NUMBER OF 90 DEG TURNS EXIT TO INLET AREA RATIO	= ELLIPTICAL = CIRCUMFERENTIAL = .9843D-03 = .4211D+00 = 20 = 0 = 0 = 0 = 1.00			
MATERIAL DATA YOUNG'S MODULUS YIELD STRESS RAMBERG-OSGOOD EXPONENT RAMBERG-OSGOOD CONSTANT FLOW STRESS YIELD STRAIN REFERENCE STRESS REFERENCE STRAIN	= = = = =	.265D+08 .190D+05 .321D+01 .958D+01 .428D+05 .716D-03 .190D+05 .716D-03		
LOAD DATA AXIAL (NON-PRESSURE) LOAD TOTAL BENDING MOMENT TOTAL AXIAL STRESS TOTAL BENDING STRESS	= = =	.341D+04 .210D+06 .322D+04 .254D+04		
PRESSURE PRESSURE TEMPERATURE ENTRANCE LOSS COEFFICENT FRICTION FACTOR BACK PRESSURE	= = = =	.189D+04 .572D+03 .610D+00 .193D-01 .145D+02		

OUTPUT DATA

SA-376-TP304 - Análise do Vazamento

CRITICAL CRACK LENGTH (Z=1) 16.8441 in. 427.8400 mm SUBCOOLING = 56.3 DEG F 31.3 DEG C

	CRACK LENGTH INCHES	COD INCHES	FL/D	LEAK FLOW RATE GPM @ 200 F	CHOKED
1	.8422	.000584	500.9	.0166	YES
2	1.6844	.001275	225.3	.1082	YES
3	2.5266	.002100	86.1	.4293	YES
4	3.3688	.003103	43.2	1.1761	YES
5	4.2110	.004351	24.5	2.6645	YES
6	5.0532	.005940	14.9	5.3881	YES
7	5.8954	.008004	9.4	9.9683	YES
8	6.7376	.010735	6.0	17.3063	YES
9	7.5798	.014405	3.9	29.1903	YES
10	8.4220	.019410	2.5	47.8831	YES
11	9.2643	.026329	1.6	76.8677	YES
12	10.1065	.036032	1.1	121.3609	YES
13	10.9487	.049845	.7	189.4577	YES
14	11.7909	.069833	.4	294.1562	NO
15	12.6331	.099252	.3	457.0457	NO
16	13.4753	.143341	.2	713.5928	NO
17	14.3175	.210622	.1	1123.8727	NO

18 19 20	15.1597 16.0019 16.8441 CRACK LENGTH MM	.315104 .479872 .742346 COD MM	.1 .0 .0 FL/D	1790.2618 2887.9423 4712.6649 LEAK FLOW RATE Kg/sec	NO NO CHOKED
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	$\begin{array}{c} 21.3920\\ 42.7840\\ 64.1760\\ 85.5680\\ 106.9600\\ 128.3520\\ 149.7440\\ 171.1360\\ 192.5280\\ 213.9200\\ 235.3120\\ 256.7040\\ 278.0960\\ 299.4880\\ 320.8800\\ 342.2720\\ 363.6640\\ 385.0560\\ 406.4480\\ 427.8400\\ \end{array}$.014837 .032388 .053340 .078823 .110527 .150878 .203307 .272672 .365898 .493012 .668748 .915205 1.266075 1.773751 2.521001 3.640858 5.349807 8.003649 12.188756 18.855578	$\begin{array}{c} 500.9\\ 225.3\\ 86.1\\ 43.2\\ 24.5\\ 14.9\\ 9.4\\ 6.0\\ 3.9\\ 2.5\\ 1.6\\ 1.1\\ .7\\ .4\\ .3\\ .2\\ .1\\ .0\\ .0\end{array}$	$\begin{array}{c} .0010\\ .0066\\ .0261\\ .0714\\ .1619\\ .3273\\ .6055\\ 1.0512\\ 1.7731\\ 2.9086\\ 4.6692\\ 7.3719\\ 11.5083\\ 17.8681\\ 27.7626\\ 43.3462\\ 68.2681\\ 108.7469\\ 175.4240\\ 286.2642\end{array}$	YES YES YES YES YES YES YES YES YES YES

THE SUBJECT COMPUTER PROGRAM HAS BEEN CLASSIFIED BY EPRI AS A RESEARCH PROGRAM. AS SUCH, IT HAS NOT BEEN DEVELOPED AND TESTED TO THE EXTENT THAT A PRODUCTION PROGRAM WOULD BE, AND UNFORSEEN RESULTS MAY OCCUR WHEN RUNNING THE PROGRAM. EPRI DOES NOT MAKE ANY WARRANTY OR REPRESENTATION WHATSOEVER, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS OF ANY PURPOSE WITH RESPECT TO THE PROGRAM; NOR DOES EPRI ASSUME ANY LIABILITY WHATSOEVER WITH RESPECT TO ANY USE OF THE PROGRAM OR ANY PORTION THEREOF OR WITH RESPECT TO ANY DAMAGES WHICH MAY RESULT FROM SUCH USE.

PICEP VERSION 06/15/92

PIPE CRACK EVALUATION PROGRAM EPRI REPORT NP-3569-SR REV.2 BY CHEXAL,QUINONES & HOROWITZ

PICEP INPUT AS PER EPRI REPORT NP-3569-REV.2

ECHO PRINT OF INPUT DATA

SA-508 Cl.3 - Caso 3

MODE 2	IPLAS 2	ISOL 2	NSI 1						
	DO .2731		THICK .0286						
IF	DIR I O	FAREA 1	NDIV 20	0 . 00	COD)00e+00	A 000.	F 0e+00		
Y0	UNG	9	50	EO	ALPHA	FA	CN	FSR	Z
.18 100D+	8D+12 01	.410	0+09	.000D+00	.126D+01	. 898	D+01	.495D+09	.127D+01
IN	PRES		т0	РВ	TR	ACT	BM	10M	PMSTR
рв 3	.1E+0 0.	8 3	300.00	.1E+06	2245	5.	282	293.	0.
.25	ek 000d-04		AR L.000	N90 0	N45 0		CD .000	FFRED	
END OF	ECHO P	RINT							
						-			

CRITICAL CRACK LENGTH (NO CORRECTION FACTORS) 18.53 in. 470.62 mm CRITICAL CRACK LENGTH WITH Z CORRECTION FACTOR 17.81 in. 452.29 mm

THE SUBJECT COMPUTER PROGRAM HAS BEEN CLASSIFIED BY EPRI AS A RESEARCH PROGRAM. AS SUCH, IT HAS NOT BEEN DEVELOPED AND TESTED TO THE EXTENT THAT A PRODUCTION PROGRAM WOULD BE, AND UNFORSEEN RESULTS MAY OCCUR WHEN RUNNING THE PROGRAM. EPRI DOES NOT MAKE ANY WARRANTY OR REPRESENTATION WHATSOEVER, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS OF ANY PURPOSE WITH RESPECT TO THE PROGRAM; NOR DOES EPRI ASSUME ANY LIABILITY WHATSOEVER WITH RESPECT TO ANY USE OF THE PROGRAM OR ANY PORTION THEREOF OR WITH RESPECT TO ANY DAMAGES WHICH MAY RESULT FROM SUCH USE.

PICEP VERSION 06/15/92

PIPE CRACK EVALUATION PROGRAM EPRI REPORT NP-3569-SR REV.2 BY CHEXAL, QUINONES & HOROWITZ

PICEP INPUT AS PER EPRI REPORT NP-3569-REV.2

ECHO PRINT OF INPUT DATA

. _ _ _ _ _ .

SA-106 Gr. B - Caso 3

MODE IPLAS ISOL NSI 2 2 2 1 THICK DO .2731 .0286

> IFAREA NDIV IFDIR COD 0 1 20

AF .0000E+00 .0000E+00

YOUNG S0 Е0 ALPHA FACN FSR Ζ SF .193D+12 .216D+09 .000D+00 .138D+01 .505D+01 .361D+09 .125D+01 .100D+01

IN PRES	т0	РВ	TRACT	BMOM	PMSTR
3 .1E+08 0.	300.00	.1E+06	22455.	28293.	0.
EK .25000D-04	AR 1.000	N90 0	N45 0	CD .000	FFRED .0000

END OF ECHO PRINT

CRITICAL CRACK LENGTH (NO CORRECTION FACTORS) 440.Ò6 mm 17.33 in. CRITICAL CRACK LENGTH WITH Z CORRECTION FACTOR 16.60 in. 421.73 mm

THE SUBJECT COMPUTER PROGRAM HAS BEEN CLASSIFIED BY EPRI AS A RESEARCH PROGRAM. AS SUCH, IT HAS NOT BEEN DEVELOPED AND TESTED TO THE EXTENT THAT A PRODUCTION PROGRAM WOULD BE, AND UNFORSEEN RESULTS MAY OCCUR WHEN RUNNING THE PROGRAM. EPRI DOES NOT MAKE ANY WARRANTY OR REPRESENTATION WHATSOEVER, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS OF ANY PURPOSE WITH RESPECT TO THE PROGRAM; NOR DOES EPRI ASSUME ANY LIABILITY WHATSOEVER WITH RESPECT TO ANY USE OF THE PROGRAM OR ANY PORTION THEREOF OR WITH RESPECT TO ANY DAMAGES WHICH MAY RESULT FROM SUCH USE.

PICEP VERSION 06/15/92

PIPE CRACK EVALUATION PROGRAM EPRI REPORT NP-3569-SR REV.2 BY CHEXAL, QUINONES & HOROWITZ

PICEP INPUT AS PER EPRI REPORT NP-3569-REV.2

ECHO PRINT OF INPUT DATA -----

SA-376-TP304 - Caso 3

MODE IPLAS ISOL NSI 2 2 2 1 THICK DO .2731 .0286 IFAREA NDIV COD IFDIR AF .0000E+00 .0000E+00 0 1 20 YOUNG S0 Е0 ALPHA FACN FSR SF .183D+12 .131D+09 .000D+00 .958D+01 .321D+01 .295D+09 .100D+01 .100D+01 IN PRES т0 PB TRACT BMOM PBSTR 3.1E+08 0. 300.00 .1E+06 22455. 28293.

EK	AR	N90	N45	CD	FFRED
.25000D-04	1.000	0	0	.000	.0000

END OF ECHO PRINT

CRITICAL CRACK LENGTH (NO CORRECTION FACTORS) 415.Ô2 mm 16.36 in.

Ζ

PMSTR

0.

THE SUBJECT COMPUTER PROGRAM HAS BEEN CLASSIFIED BY EPRI AS A RESEARCH PROGRAM. AS SUCH, IT HAS NOT BEEN DEVELOPED AND TESTED TO THE EXTENT THAT A PRODUCTION PROGRAM WOULD BE, AND UNFORSEEN RESULTS MAY OCCUR WHEN RUNNING THE PROGRAM. EPRI DOES NOT MAKE ANY WARRANTY OR REPRESENTATION WHATSOEVER, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS OF ANY PURPOSE WITH RESPECT TO THE PROGRAM; NOR DOES EPRI ASSUME ANY LIABILITY WHATSOEVER WITH RESPECT TO ANY USE OF THE PROGRAM OR ANY PORTION THEREOF OR WITH RESPECT TO ANY DAMAGES WHICH MAY RESULT FROM SUCH USE.

PICEP VERSION 06/15/92

PIPE CRACK EVALUATION PROGRAM EPRI REPORT NP-3569-SR REV.2 BY CHEXAL,QUINONES & HOROWITZ

PICEP INPUT AS PER EPRI REPORT NP-3569-REV.2

ECHO PRINT OF INPUT DATA

SA-508 Cl.3 - Caso 4

MODE IPLAS ISOL NSI 2 2 2 1 THICK DO .2731 .0286 IFAREA NDIV COD IFDIR AF .0000E+00 .0000E+00 0 1 20 YOUNG S0 E0 ALPHA FACN FSR Ζ SF .188D+12 .410D+09 .000D+00 .126D+01 .898D+01 .495D+09 .127D+01 .100D+01 IN PRES т0 PB TRACT BMOM PMSTR PBSTR 3.2E+08 0. 300.00 .1E+06 31751. 40006. 0. AR N90 N45 CD FFRED FK .25000D-04 1.000 0 0 .000 .0000 END OF ECHO PRINT _____ _____

CRITICAL CRACK LENGTH (NO CORRECTION FACTORS) 17.08 in. 433.95 mm CRITICAL CRACK LENGTH WITH Z CORRECTION FACTOR 16.36 in. 415.62 mm

THE SUBJECT COMPUTER PROGRAM HAS BEEN CLASSIFIED BY EPRI AS A RESEARCH PROGRAM. AS SUCH, IT HAS NOT BEEN DEVELOPED AND TESTED TO THE EXTENT THAT A PRODUCTION PROGRAM WOULD BE, AND UNFORSEEN RESULTS MAY OCCUR WHEN RUNNING THE PROGRAM. EPRI DOES NOT MAKE ANY WARRANTY OR REPRESENTATION WHATSOEVER, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS OF ANY PURPOSE WITH RESPECT TO THE PROGRAM; NOR DOES EPRI ASSUME ANY LIABILITY WHATSOEVER WITH RESPECT TO ANY USE OF THE PROGRAM OR ANY PORTION THEREOF OR WITH RESPECT TO ANY DAMAGES WHICH MAY RESULT FROM SUCH USE.

PICEP VERSION 06/15/92

PIPE CRACK EVALUATION PROGRAM EPRI REPORT NP-3569-SR REV.2 BY CHEXAL, QUINONES & HOROWITZ

PICEP INPUT AS PER EPRI REPORT NP-3569-REV.2

20

ECHO PRINT OF INPUT DATA

. _ _ _ _ _ _ _ .

SA-106 Gr. B - Caso 4

0

MODE	IPLAS	ISOL	NSI	
2	2	2	1	
	DO .2731		THICK	

.0286 IFAREA NDIV IFDIR

1

COD

AF .0000E+00 .0000E+00

YOUNG S0 Е0 ALPHA FACN FSR Ζ SF .193D+12 .216D+09 .000D+00 .138D+01 .505D+01 .361D+09 .125D+01 .100D+01

IN PRES	т0	PB	TRACT	BMOM		PMSTR
3 .2E+08 0.	300.00	.1E+06	31751.	40006		0.
EK .25000D-04	AR 1.000	N90 0	N45 0	CD .000	FFRED	

END OF ECHO PRINT

CRITICAL CRACK LENGTH (NO CORRECTION FACTORS) 15.88 in. 403.39 mm CRITICAL CRACK LENGTH WITH Z CORRECTION FACTOR 14.92 in. 378.94 mm

THE SUBJECT COMPUTER PROGRAM HAS BEEN CLASSIFIED BY EPRI AS A RESEARCH PROGRAM. AS SUCH, IT HAS NOT BEEN DEVELOPED AND TESTED TO THE EXTENT THAT A PRODUCTION PROGRAM WOULD BE, AND UNFORSEEN RESULTS MAY OCCUR WHEN RUNNING THE PROGRAM. EPRI DOES NOT MAKE ANY WARRANTY OR REPRESENTATION WHATSOEVER, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS OF ANY PURPOSE WITH RESPECT TO THE PROGRAM; NOR DOES EPRI ASSUME ANY LIABILITY WHATSOEVER WITH RESPECT TO ANY USE OF THE PROGRAM OR ANY PORTION THEREOF OR WITH RESPECT TO ANY DAMAGES WHICH MAY RESULT FROM SUCH USE.

PICEP VERSION 06/15/92

PIPE CRACK EVALUATION PROGRAM EPRI REPORT NP-3569-SR REV.2 BY CHEXAL,QUINONES & HOROWITZ

PICEP INPUT AS PER EPRI REPORT NP-3569-REV.2

ECHO PRINT OF INPUT DATA

SA-376-TP304 - Caso 4

MODE 2	IPLAS 2	ISOL 2	NSI 1						
	DO .2731	L	ТНІСК .0286						
IF	DIR 1 0	IFAREA	NDIV 20	00	COD 000e+00	.00	AF 000e+00		
YO	UNG	S	0	E0	ALPHA	A F	FACN	FSR	Z
5F .18 .100D+	3D+12 01	.1310	+09	.000D+00	.958D+0)1 .32	21D+01	.295D+09	.100D+01
IN	PRES	5	т0	РВ		TRACT	В	MOM	PMSTR
рв 3	.2E+(0.)8 3	00.00	.1E+06	31	L751.	40	006.	0.
.25	EK 000D-04	4 1	AR 000	N90 0	N45 0		CD .000	FFRED .0000	

END OF ECHO PRINT

CRITICAL CRACK LENGTH (NO CORRECTION FACTORS) 14.92 in. 378.94 mm



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000 Fone/Fax(0XX11) 3133-8908 SÃO PAULO – São Paulo – Brasil http://www.ipen.br

O IPEN é uma Autaquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universiade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.