

São Paulo, 1992

Engenharia Mecânica da EPUSP.

Professor Doutor do Departamento de

Orientador: Prof. Dr. Hildo Pera

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da USP,
para obtenção do título
de Mestre em Engenharia.

INCIDENTES CRÍTICOS EM GERADORES DE VAPOR

Eng. Mecânico, Escola Politécnica da USP, 1975

RUI DE OLIVEIRA MAGRINI

FD-1313

BC

a todos aqueles que tem
contribuído para que o
homem seja o referencial
na engenharia moderna.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Hildo Pera, pela valiosa
e experiente orientação.

A Maria Fernanda, minha esposa,
pela dedicada colaboração.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
 - 1.1. Histórico 1
 - 1.2. Explosões: a magnitude de suas consequências 5
 - 1.3. Causas de Explosões 11
 - 1.4. Revisão Bibliográfica 13
2. CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS E DE PROJETOS DE GERADORES DE VAPOR 18
 - 2.1. Gradientes de Temperatura 18
 - 2.2. Materiais Empregados Na Construção de Geradores de Vapor 25
3. RUPTURAS E DEFORMAÇÕES POR FLUÊNCIA 29
4. RUPTURAS DE TUBOS DE GERADORES DE VAPOR 36
 - 4.1. Ruptura por falta de água 37
 - 4.2. Ruptura por deficiência de circulação ou por incrustação 39
 - 4.3. Estimativa da temperatura em que ocorrem rupturas 39

5. MAPAS DE FRATURAS	43
6. PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE GERADORES DE VAPOR	51
6.1. Porque prever vida útil	51
6.2. Planejamento Geral	54
6.3. Experiências Recentes	63
7. DISCUSSÃO	66
8. CONCLUSÃO	67
9. TEMAS PARA PESQUISAS FUTURAS	68
TABELAS	69
FIGURAS	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

INDICE DE TABELAS

Tabela 1. Seis casos elucidativos de explosões analisadas por Keith Gugan70

Tabela 2. Explosão de aquecedor de água e explosão de gerador de vapor71

Tabela 3. Explosão acidental de nitroglicerina e demolição por meio de implosão72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Causas fundamentais de BLEVES74

Figura 2. (a) Caldeira aquotubular compacta75

Figura 2. (b) Caldeira aquotubular montada em campo76

Figura 3. Gradientes de temperatura77

Figura 4. Condições hidrodinâmicas e comportamento térmico de fluxo de água que se vaporiza ao ascender tubo vertical uniformemente aquecido78

Figura 5. Curva de ebulição79

Figura 6. Temperatura de parede interna de tubo em função do

título e da densidade de fluxo de calor ...80

Figura 7. Velocidade mássica contra título de vapor saturado, à

pressão de 18,6 MPa, definindo regimes de segurança e

de riscos para dois valores de densidade de fluxo de

calor ...81

Figura 8. Faixas de temperatura para chapas de aço

Figura 9. Faixas de temperatura e tensões admissíveis propostas

pele ASME (American Society of Mechanical Engin-

ees) ...83

Figura 10. Curva típica de fluência ...84

Figura 11. Curvas de fluência, segundo Dyson e McLean ...85

Figura 12. Curva de fluência, segundo Dyson e McLean, mostrando

parâmetros operacionais que definem a forma da

curva ...86

Figura 13. Variação do parâmetro λ_1 com a tensão, segundo A.

Piumtree e G. Shen ...87

Figura 14. Curvas de fluência descritas e dados experimentais

para o 3º estágio, segundo Piumtree e Shen ...88

Figura 15. Correlação entre a tensão aplicada e o tempo neces-

sário para ocorrência da ruptura por fluência, consi-

derando o efeito da temperatura ...89

Figura 16. Fratura com acentuada estricção, ocorrida em tubo de caldeira, decorrente de ruptura por fluência, causada pela falta de água90

Figura 17. Mecanismo de fraturas do tipo "taça e cone"91

Figura 18. Curvas de fluência, em diferentes temperaturas, para um material submetido a uma determinada tensão92

Figura 19. Fratura ocorrida em tubo de caldeira, devido a presença de incrustação93

Figura 20. Diferentes aspectos, possíveis de serem encontrados para fraturas com pequena (ou sem estricção), em tubos expostos a superaquecimentos de menor severidade, causados por circulação de água deficiente94

Figura 21. Tubos de caldeiras deformados devido ao calor excessivo95

Figura 22. Mecanismo de nucleação, por escorregamento dos contornos de grão, de uma trinca intergranular, no encontro de três grãos96

Figura 23. Representação da formação de cavidades no resalto (fog) de discordância no contorno de grão97

Figura 24. Micrografia de tubos de caldeira acidentada98

Figura 25. Deformação angular em cristal unitário submetido a tensão de cisalhamento99

- Figura 26. Representação, em uma estrutura cristalina de NaCl, das discordâncias e do vetor de Burgers ...100
- Figura 27. Mapas de fraturas, segundo Ashby ...101
- Figura 28. Mapas de fraturas, mostrando a semelhança entre materiais de mesma estrutura (cúbica de face centrada): alumínio, níquel e chumbo e a diferença de comportamento do tungstênio, de estrutura cúbica de corpo centrado ...102
- Figura 29. Mapa de fratura para o ferro ...103
- Figura 30. Mapa com a representação dos mecanismos de fratura ...104
- Figura 31. Fratura transgranular, por fluência ...105
- Figura 32. Tensões admissíveis definidas pelo Código ASME para o Coroloy 1 1/4, com a versão antiga (1951-1965) e a versão atual (representada conforme edição de 1980) ...106
- Figura 33. Acumulação de vazios observada em réplica e o estágio de fluência correspondente ...107
- Figura 34. Exames físicos e químicos não-destrutivos aplicáveis, conforme diferentes tipos de falhas ...108
- Figura 35. Tubulações dotadas de pinos para medição de diâmetros e detalhe dos pinos de medição ...109

Figura 36. Curvas de fluência obtidas com medições de diâmetros em 5 tubos e método de mínimos quadrados ...110

Figura 37. Comparação entre espécimes miniatura e espécimes convencionais empregados para correlacionar tensão de tração e tempo de ruptura por fluência ...111

Figura 38. "Máquina de teste de fluência", empregando espécimes miniaturizados em atmosfera de argônio e resultados comparativos entre 2 tipos de miniatura e espécimes convencionais empregados para correlacionar taxa de deformação e tempo de ruptura por fluência ...112

Figura 39. Mapa de fraturas desenvolvido para liga de engenharia, com a indicação do campo típico de operação de turbinas ...113

Vapor generators operate in ranges of pressures higher than the atmosphere, in such a way that explosion risks become present when the critical components useful life finishes. This issue analyzes causing mechanisms of these risks and the correspondent assessment technologies strategies. One proposition is set with the objective of to developing instruments to increase the power of the current creep and creep-fracture control methods.

ABSTRACT

Geradores de vapor operam em pressões superiores à atmosférica, de modo tal que, caracterizam-se riscos de explosões quando se encerra a vida útil de componentes críticos. No presente trabalho são analisados mecanismos causadores desses riscos e estratégias tecnológicas para sua avaliação. Uma proposta final é formulada, objetivando desenvolverem-se instrumentos que tornem mais poderosos os atuais métodos de controle de deformações e fraturas por fluência.

RESUMO

Os tres modos classicos definidos para a transferencia de calor - conveccao, conduccao e radiacao - compreendendo muitos dos campos da fisica, incluindo a mecanica, o calor, a acustica, a optica e a eletricidade, constituem mais do que marcos desses seculos: fornecem a ideia de um fluxo, envolvido por outra ciencia - a Historia - conferindo nitidez e precisao ao evidenciar a evolucao do conhecimento e da tecnologia.

A Transferencia de Calor que, sem duvida, so-
bressai como a mais importante das ciencias empregadas no profe-
to de geradores de vapor e de reatores nucleares, desenvolveu-se
mais por engenheiros ocupados com o estabelecimento de dados em-
piricos, do que por analistas scientificos⁽¹⁾.

A Transferencia de Calor que, sem duvida, so-
bressai como a mais importante das ciencias empregadas no profe-
to de geradores de vapor e de reatores nucleares, desenvolveu-se
mais por engenheiros ocupados com o estabelecimento de dados em-
piricos, do que por analistas scientificos⁽¹⁾.

A Transferencia de Calor que, sem duvida, so-
bressai como a mais importante das ciencias empregadas no profe-
to de geradores de vapor e de reatores nucleares, desenvolveu-se
mais por engenheiros ocupados com o estabelecimento de dados em-
piricos, do que por analistas scientificos⁽¹⁾.

Atribui-se a Heron, matematico Grego que vivia
em Alexandria no seculo II, a invencao da primeira maquina termi-
ca: a eolipila, que transformava calor em trabalho mecanico por
meio de uma esfera acoplada a um eixo horizontal. Admitindo
vapor pelo proprio eixo, a esfera o expulsava, por dois tubos
recurvados e diametralmente opostos, adquirindo movimento de ro-
tagao.

1. INTRODUCCAO

1.1. Historico

Os modelos de convecção demandam leis de

aerodinâmica e hidrodinâmica, envolvendo o transporte e a troca devida ao movimento relativo das partes de um fluido que se encontram em temperaturas diferentes. Sua primeira expressão foi apresentada por Isaac Newton em 1701:

$$q = h A_s \Delta T \quad \text{onde:}$$

q = fluxo de calor, no tempo

h = coeficiente de transferência de calor do filme

A_s = área da superfície de aquecimento

ΔT = diferença de temperatura entre uma superfície e um fluido em contato com ela

Para gases, a condução figura por impactos elas-

tics, para sólidos não condutores, em vibração longitudinal e para metais, em movimentos de elétrons. Em 1828, Fourier

formulou a lei básica da condução de calor:

$$q = -k A_s \frac{dT}{dx} \quad \text{onde:}$$

k = condutibilidade térmica;

A_s = área da seção transversal, constante e

$$\frac{dT}{dx} = \text{gradiente de temperatura}$$

(o sinal menos significa que o calor flui na direção de decréscimo de temperatura, em conformidade com a segunda lei da termodinâmica)

O período de Newton a Planck cobre do início da física clássica ao início da física moderna, no começo do século XX. Esse intervalo também marca, praticamente a origem, o desenvolvimento e o declínio da máquina a vapor de James Watt (1736 a 1819) como "motor térmico universal" da indústria. A física moderna teve início no mesmo momento em que a tecnologia permitiu o desenvolvimento das máquinas de combustão interna, das

o conceito de quantum.

A equação de Stefan-Boltzmann representa a energia radiante total emitida por um corpo negro em todas as direções e portanto não revela a distribuição espectral de energia. A distribuição de poder emissivo pelos diversos comprimentos de onda foi deduzida por Max Planck em 1900, usando

$Q = \text{constante de Stefan-Boltzmann,}$
 $A_s = \text{área de transferência de calor}$
 $T = \text{temperatura absoluta}$

$$Q = \sigma A_s T^4 \quad \text{onde:}$$

É a radiação é uma parte da óptica tanto em sua geometria, como em sua dinâmica. A terceira lei fundamental da transferência de calor, a equação básica para total radiação térmica de um radiador ideal, ou corpo negro, foi descoberta empiricamente por Josef Stefan em 1879 e foi deduzida teoricamente por Ludwig Boltzmann, em 1884:

turbinas a vapor e do consequente obscurecimento da máquina a vapor.

Por outro lado, o início do século XX marca um incrível record de infelizmente com explosões de geradores de vapor. De 1870 a 1910, ocorreram 10.000 explosões nos Estados Unidos da América do Norte, das quais mais de 1300 no ano de 1910, ou seja, mais de 3 por dia. (2)

Com o desenvolvimento da normalização e de códigos como o ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), novos métodos de dimensionamentos e o aperfeiçoamento de exames de materiais, foi possível a atenuação dessas ocorrências.

Ainda assim, nos dias de hoje, pode-se dizer que são frequentes os casos de explosões de geradores de vapor e outros vasos, não só no Brasil, como também na América do Norte, na Europa e em outros continentes. (3,4,5,6)

Refletindo essa indesejada realidade, o *National Board of Boiler and Pressure Vessels Inspectors* revela (3) que o

registro de mortes em incidentes com caldeiras (geradores de vapor) nos Estados Unidos, evoluiu de 9 em 1981, para 9 em 1982, 17 em 1983 e 73 em 1984. (Observamos que, parte desse crescimento deve-se também à maior sistematização na coleta e no processamento de dados ocorridas no período).

(*) segmento da Metalurgia que emprega análises metalográficas, microscopia, cromatografia, difratometria de Raios X e outros métodos, para identificar provas, causas e desencadeamentos de incidentes que envolvem direitos civis, penais e responsabilidades. (**) instrumento gráfico proposto pela O.I.T. - Organização Internacional do Trabalho e I.N.R.S. - Institut National de Recherche et Sécurité, da França, que estabelece, por meio de diagramação de blocos lógicos, a rede de causas de um acidente, notada das conexões, disjunções e sequências dos eventos que re-presenta a dinâmica de sua ocorrência.

Uma providência que se demonstra necessária e urgente é a de tornar prática usual, por meio de normas técnicas ou leis, que toda explosão que coloque a integridade de pessoas sob risco, ou que retire um vaso sob pressão de funcionamento normal tenha, pelo menos, seus fragmentos preservados e submetidos a análises de "Metalurgia Forense" (*) e suas causas analisadas por meio do Método da Árvore de Causas (**)(7,8).

Mais importante que a frequência das explosões acidentais ocorridas na indústria, é a gravidade dos casos, dada a grande quantidade de energia liberada momentânea e caoticamente, provocando destruições, geralmente acompanhadas de perdas de vidas humanas.

No Brasil não se dispõe de dados estatísticos da frequência de acidentes com caldeiras, devido a inexistência de programas com esses objetivos nas instituições governamentais. Porém, a gravidade de uma série de casos é de conhecimento geral.

1.2. Explosões: a magnitude de suas consequências.

$$MTC = \frac{PCT}{ETC}$$

dividindo-se esse valor pelo poder energético do TNT, tem-se uma certa massa de TNT equivalente calculada, "MTC":

$$ETC = M_e \times P_{cs}$$

pelo produto:

O valor energético total calculado, "ETC" é obtido

P_{cs} = poder calorífico da substância,

(adotada a massa estequiométrica necessariamente necessária para a reação de combustão com o ar atmosférico no limite inferior de explosividade).

M_e = massa de inflamável em explosão

Os seguintes parâmetros são destacados:

danos.

Buscando parâmetros para comparar magnitudes de explosões de equipamentos industriais com o poder de explosivos convencionais, Keith Guban⁽⁹⁾ demonstra o nível de caotização e ao mesmo tempo o potencial de danos de tais incidentes. Em explosões acidentais de nuvens de vapor de inflamáveis não confinadas, Guban buscou relacionar a quantidade de T. N. T. [Trinitrotolueno, com poder calorífico ("PCT") de 4.575,3 kJ/kg (1093 kcal/kg)] necessária para produzir o mesmo efeito, propondo assim esse equivalente como padrão de medida de danos.

consequente ruptura. temperatura de operação e provocou a pressurização do vaso e a falha no funcionamento do termostato do aparelho não limitou a

O relato da explosão do aquecedor (10) revela que uma

quências dessas explosões com esse método.

tas na Tabela 2, indica a possibilidade de apreciação de conse-
 dade de aquecimento de água e a de um gerador de vapor, descri-
 A análise elementar da explosão de uma pequena uni-

metodologia similar a de Guilan.

ding Vapor Explosion), poderiam ser apreciadas por meio de

água-vapor (designadas pela sigla BLVE - Boiling Liquid Expan-

Consequências de explosões de sistemas bifásicos

uma série de casos. A Tabela 1 apresenta seis desses casos.

demonstra a inexistência de correlação, conforme análise de
 que, comparado com a massa de inflamável em explosão, "Me",

$$Y = \frac{MTE}{MTC}$$

fornece um fator de eficiência "Y":

explosão etc). A divisão da massa efetiva pela massa calculada
 nação, detecções de instrumentos em funcionamento no instante da
 tanques de materiais conhecidos, dobramento de postes de lumi-
 indiretamente, por meio de outras evidências (deformações de
 ciação. A massa equivalente de TNT efetiva, "MTE", é obtida
 reações, misturas inadequadas do inflamável com o ar e a disso-
 vido a perdas por baixas velocidades de certos estágios das
 esse valor não corresponde aos danos reais, de-

$$Y = \frac{MNE}{MNC} = \frac{0,675}{32,86} = 2,05\%$$

e portanto, pode ser encontrada a eficiência Y:

$$MNE = 33,75 \times 0,02 = 0,675 \text{ kg}$$

lida pela explosão) será:

produzir dano equivalente (em 33,75 m³ - área efetivamente demo-

A massa efetiva de nitroglicerina necessária para

explosão acidental, realtadas na Tabela 3).

caso de alvenaria (dados da implosão da Fabrica Matarazzo e de

cerina são suficientes para demolir um metro quadrado de edifi-

a análise dos danos reais, sabendo-se que 0,02 kg de nitroglí-

Por similiaridade ao método de Guñan, podemos proceder

$$MNC = \frac{H}{PCN} = \frac{214.592}{6.530,16} = 32,86 \text{ kg}$$

Obtem-se como massa de nitroglicerina equivalente:

$$PCN = 6530,16 \text{ kJ/kg}$$

Sendo o poder calorífico da Nitroglicerina:

(uma parte desse líquido vaporiza-se ao sofrer expansão pela ruptura do vaso e realiza trabalho, gerando na atmosfera, a onda de choque que exercerá pressão sobre as superfícies próximas)

$$H = 320 \times 670,6 = 214.592 \text{ kJ}$$

A entalpia do líquido saturado será:

$$h_f = 670,6 \text{ kJ/kg}$$

saturado:

E sendo nessa pressão a entalpia específica do líquido

$$P_r = 800 \text{ kPa}$$

Sendo estimada como pressão de ruptura:

seu ambiente próximo.

talpita encerrada no equipamento é aproveitada na demolição do
Ou seja, somente uma quantidade inferior a 10% da en-

$$Y = \frac{MNE}{MNC} = \frac{6}{226,15} = 2,65\%$$

e portanto, obtém-se como eficiência Y:

$$MNH = 300 \times 0,02 = 6 \text{ kg}$$

produzir dano equivalente (em 300 m²) será:

A massa efetiva de nitroglicerina necessária para

$$MNC = \frac{H}{PCN} = \frac{1.476,820}{6.530,16} = 226,15 \text{ kg}$$

Massa de nitroglicerina equivalente calculada:

$$H = 2.000 \times 738,41 = 1.476.820 \text{ kJ}$$

Entalpia de todo o líquido saturado:

$$h_f = 738,41 \text{ kJ/kg}$$

de ruptura:

Entalpia específica do líquido saturado, na pressão

$$P_r = 827 \text{ kPa}$$

Pressão de ruptura:

2), obtém-se:

pressão da caldeira do Hospital de São Paulo (relatada na Tabela

Adotando-se procedimento análogo com os dados da ex-

Traduzir a energia de tais explosões em massa de nitroglicerina oferece a possibilidade de prever a extensão de danos materiais com grande margem de erro, mas evidência com exatidão o mais importante aspecto para quem tem o homem como referência: a avaliação dos riscos à vida.

Ainda que a apreciação por meio das eficiências obtidas nesses dois casos não tenha maior precisão, ela permite expressar a violência com que ocorrem explosões na indústria e fora do meio industrial (os casos aqui analisados, de duas pequenas unidades, procedem de uma escola e de um hospital, onde não só trabalhadores, mas toda uma comunidade mais ampla foram atingidos).

Torna-se importante diferenciar os conceitos de risco (*risk*, ou *hazard*), e de perigo (*danger*), conforme propõe Kammer, W. (11), notando-se que a um gerador de vapor associa-se um risco de explosão diretamente proporcional à entalpia da água em saturação, e que ao perigo estarão associadas condições ambientais, de fabricação, operação e manutenção; ou seja, um equipamento de grande risco pode não oferecer perigo, desde que seja convenientemente construído e controlado. Mas, o fundamental é que se conheçam as causas e se adotem as medidas técnicas necessárias para que sejam eliminadas a tempo, de modo que os incidentes sejam prevenidos e as vidas preservadas; daí a importância de se estimar corretamente a vida útil de tais equipamentos.

1.3. Causas de explosões

Ao lado da corrosão e da sobrepressão, o efeito do calor excessivo constitui um dos mais importantes fatores de deformação e de explosão de geradores de vapor.

Como causa de incidentes, o calor provoca a redução da resistência do aço constituinte de partes sujeitas a pressão. Essa ação é "silenciosa" e não detetável pelos instrumentos convencionais de operação de caldeiras - os sensores de pressão e as válvulas de segurança não a impedem, uma vez que nem sempre é acompanhada de sobrepressões - explosões por temperaturas excessivas podem ocorrer até mesmo em pressões inferiores à MPTA (Máxima Pressão de Trabalho Admissível). A origem dessa causa de explosões é costumeiramente obtida por meio de exames não destrutivos, que a maioria dos países já incorporou como obrigatórios a nível de legislação.

Com a finalidade de estimar a importância da perda de resistência do material no elenco de fatores que podem comprometer a segurança de vasos sob pressão interna, sugerimos (12) tomar o equilíbrio de tensões traduzido como expressão

$$t = \frac{P \cdot R}{S}$$

onde:

t = espessura (teórica, independente de coeficientes de execução tecnológica)

P = pressão interna

R = raio (do corpo cilíndrico)

S = tensão admissível característica do material

O presente estudo tem como objetivo a análise do comprometimento da segurança de geradores de vapor devido a exposição de componentes pressurizados a altas temperaturas, verificando mecanismos de ruptura nessas condições. Em outras palavras, tem um escopo que compreende as "BLEVEs" (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions*) causadas por temperaturas excessivas, não compreendendo as demais "BLEVEs" (por corrosão, erosão, ou falhas de instrumentos), nem explosões de câmaras de combustão. Como incidentes críticos serão entendidos os eventos não programados e indesejáveis que retiram os equipamentos do funcionamento normal, criando riscos de danos materiais e de lesões à vida humana.

c) sobrepressão.

b) redução de resistência do material;

a) perda de espessura, que pode advir de corrosão ou de erosão;

causas: (V. figura 1).

geral, os riscos podem ser originados pela combinação de três condições de segurança quando situados na região contida pela concavidade da curva da pressão P!. Desta forma, e de um modo e fazendo-se notar que os pontos cartesianos (S!, T!) representam e plotar $t = f(S, P)$, mantendo-se constantes as demais variáveis

1.4. Revisão Bibliográfica

MALU, Mahendra e TIEN, John⁽¹⁸⁾, em 1974, desenvolveram

uma nova teoria de fluência estacionária baseada no movimento sob efeito térmico de ressaltos de discordâncias (jogs), (pre-
sentes nos contornos de grãos de materiais metálicos). Essa
teoria é baseada no princípio que a maior parte dos ressaltos
situados nas discordâncias espirais que se deslocam são de emis-
são intersticial (ou de absorção de vacâncias) e que a energia
de ativação para a fluência depende do tamanho da malha do feixe
de discordâncias. A teoria prevê uma energia de ativação peque-
na, da ordem de grandeza da autodifusão das lacunas para a flu-
ência dos metais puros e de ligas de uma só fase e energia de
ativação elevada para a fluência de sistemas de ligas
industriais. A teoria mostra que a fluência de sistemas que
demandam energia de ativação elevada depende fortemente da
tensão, enquanto que as de baixa energia de ativação dependem
menos.

ASHBY, Ghandi e Taplin⁽¹⁷⁾ analisam, em 1979, o meca-
nismo de fratura dútil transgranular por fluência e propõem o
desenho de mapas de fraturas, contrapondo a tensão de tração
com a temperatura homologa (razão entre temperatura de prova e
ponto de fusão) do material e definindo regiões, em conformidade
com o mecanismo predominante.

HARTH, G.H. e SHEBLOK⁽¹⁸⁾, em 1985, discutem
diferentes metodologias para a determinação de vida útil

vos deve ser otimizado, visando melhor relação custo-benefício. pessoal qualificado e que o emprego de exames não destrutivos tem sido usados extensivamente, devido ao custo e à demanda de externas, boroscópio, para superfícies internas e réplicas não turas. Consideram que microscópios ópticos para superfícies vapor, especialmente para componentes expostos a altas temperaturas. estratégia prática para a avaliação de vida útil de geradores de

GUPTA, G. D. e outros⁽¹⁴⁾, em 1985, apresentam uma

de componentes.

operação e para acumularem-se dados para o cálculo de vida útil esforços e danos, estabelecem métodos para a otimização de obtenção de um protótipo de gerador de vapor para a análise de

DAVIDSON, M. J. et al.⁽²⁰⁾, em 1985, objetivando a

analisar a mudança em propriedades físicas do material.

prático detectar metalúrgicamente os vazios de fluência, do que ção de fluência, é sugerido que, no presente momento, é mais Revendo o status corrente de métodos não destrutivos de detec- soldadas de metais dissimilares em tubos de geradores de vapor. ruptura de tubo de vapor de aço inoxidável tipo 316 e (2) juntas estudos de experiências de campo de dois tipos de falhas: (1)

MASUYAMA, F. e Setoguchi, K.⁽¹⁹⁾, em 1985, apresentam

util do componente em estudo.

lises permite maior precisão na determinação do final da vida estrutura do material, uma vez que, associado a outras análises método mais efetivo consiste em observar as modificações na mi-vapor, analisando superfícies e juntas soldadas. Concluem que o exausta e remanescente de componentes de tubos e de tubulões de

Conclui que há muito terreno para o futuro desenvolvimento de bases para relações empíricas derivadas de dados experimentais. te identificados, mas devem ser combinados, de modo a fornecer relacionados e que tais mecanismos podem sempre ser separadamente tra que na fluência, ocorre mais de um mecanismo, inter-relações empíricas em fluência e fraturas por fluência, demonstrando GREENWOOD, Geoffrey W. (24), em 1990, interpreta corretamente

da solicitação/tempo para condições de carga arbitrária. banco de dados de parâmetros modelo e a simulação da trajetória permite a análise de dados de fluência, o desenvolvimento de um incorporaram o método em software, denominado Crispin, que de deformação desses materiais em alta temperatura. teóricos e materiais de engenharia, considerando os mecanismos são das diferenças do comportamento da fluência entre sólidos DYSON, B. F. e McLean M. (23), em 1990 procederam revisão

na iniciação de fluência e propagação de danos em tubos soldados. uma abordagem para estimativa de integridade de tubos, baseada de apreciação de vida útil de tais equipamentos e desenvolvimento de tubos de vapor, analisam as deficiências na tecnologia corrente estimulados pela ocorrência de duas rupturas catastróficas de VISWANATHAN, R., R. Dooly e A. Saxena (22), em 1988,

durante 20 anos.

fluência. Baseiam-se em medições de diâmetros externos de tubos, componentes pressurizados de geradores de vapor, sob a ação de diferentes métodos para se calcular a vida útil remanescente de MLYNARSKI, F. e Taler, J. (21), em 1988, discutem

similares, para os dois tipos de sollicitação. Formas, dimensões (namente) e uniaxial. As curvas de fluência encontradas foram distintas de sollicitação: multiaxial] tubos pressurizados interagindo resultados de fluência em longa duração em duas condições res de vapor [T22 (2.25Cr-1Mo) e TP321H (18Cr-10Ni-Ti)], comparando (27) em 1990, procederam testes em tubos típicos de gerador ISRD, Atsuro, Yoshiatsu Sawaragi e Kunihiko Yoshika-

ar.

similares a dos espécimes de tamanhos convencionais testados no ruptura e a ductilidade das miniaturas testadas em argônio, foram amostras de metal base ou de cordão de solda, com 2 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento. As curvas de fluência, o tempo para desenvolveram dispositivo de testes de fluência que utilizam util remanescente de materiais industriais sujeitos a fluência, obtenção de espécimes miniaturizados para determinação de vida finalidade de investigar técnicas de amostragem e métodos de KADOYA, Yoshikuni et al (28) em 1990, com a

de curta duração.

de fluência podem ser determinados satisfatoriamente por testes de longa vida por fluência e o tempo para atingir a taxa mínima minação do tempo para a ruptura. Concluem também, que rupturas equações constitutivas que permitem maior precisão para a determinação do tempo para a ruptura. Concluem também, que rupturas particularmente o terceiro estágio, próximo à ruptura, obtendo danos contínuos, para descrever o processo de fluência, equacionamento até então existente, o conceito de mecânica de PLUMTBEE, A. e Shen, G. (29) em 1990, combinam com o

modelagem para métodos de predição.

em metal base e em juntas soldadas de componentes de geradores de vapor construídos nas décadas de 50 e de 60, tendo operado por mais de 100.000 horas. Os danos por fluência foram analisados pela comparação entre métodos metalúrgicos e testes destrutivos (testes de ruptura por fluência e testes de fadiga e fluência) em amostras removidas de componentes nas mesmas posições. A análise metalúrgica (obtenção de espectros de cromo e molibdênio e frações de carbeto) demonstrou-se mais adequada para avaliar a vida útil em sua primeira metade, enquanto que a densidade de vazios de fluência, mostrou-se mais relevante na última metade da vida. Concluíram que o emprego dos dois métodos oferece melhores condições para avaliação da vida útil remanescente de equipamentos reais.

SUGITA, Yuji et al.⁽²⁸⁾, em 1990, avaliaram a fluência

e desenvolvimentos de microtrincas foram analisados em comparação com medições de densidades, sendo concluído que a obtenção de réplicas conduz a maior precisão. Um método de predição de vida útil de tubos pressurizados é proposto e sistematizado.

uma unidade similar, mas não compacta e sim, montada em campo. cedentes da combustão. A figura 2 (b) contém a ilustração de encontra-se uma dispersão de gás e de material particulado, pro- tra-se a água, constituindo um sistema bifásico, e externamente com um tubo horizontal inferior. No interior dos tubos encon- de tubos que fazem a ligação de um tubo horizontal superior de caldeira aquotubular compacta típica, constituída por feixes A figura 2 (a) contém a ilustração de um modelo

água, superfícies tocadas pelo vapor e equipamentos auxiliares. divididos em tres maiores categorias: superfícies tocadas pela consideram que os componentes de um gerador de vapor podem ser calor se transforma continuamente em vapor" e G.D. Gupta et al (14) deira à vapor e constituída por um vaso fechado a presso, com dores de Vapor de Água, considera que "essencialmente uma cal- PRBA, Hildo (13), no tópico Tipos Fundamentais de Gera-

comuns, a combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos). e material procedente da combustão no caso das unidades mais -fonte de energia térmica (combustível, ar, fluido vaporizante- água-vapor, a quem transferem calor e, por outro, ao sistema- que, por um lado encontram-se expostos ao sistema bifásico Os geradores de vapor possuem componentes metálicos

2.1. Gradientes de Temperatura

2. CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS E DE PROJETOS DE GERADORES DE VAPOR

Assim como a incrustação, a operação com baixos níveis de água também é frequente causa de superaquecimento (ex-posição de metais a temperaturas excessivas). A deficiência de circulação também pode provocar superaquecimentos, embora seja rara essa atuação exclusiva pois, quando ocorre, na maioria das vezes, figura como concausa, associada à presença de incrustações.

(13)

Por controle inadequado de propriedades químicas da água, podem ocorrer concentrações elevadas de agentes formadores de depósitos que se agregam às superfícies metálicas no lado Água: depósitos de sulfatos, carbonatos (de cálcio e/ou de magnésio), silicatos complexos contendo ferro, alumínio, cálcio, sódio e outros sólidos). Esses depósitos, denominados incrustações, tendo condutibilidade térmica muito inferior à dos apo, oferecem maior resistência à transferência de calor do apo para a água, provocando elevação das temperaturas de paredes do apo de T_1 para $T_1 > T_1$, no lado Água e de T_2 para $T_2 > T_2$, no lado gás.

3(A).
 T_1 - temperatura de ebulição à pressão da caldeira. V. Figura se forma uma película de gás. No lado oposto (Lado Água), o perfil prossigue declinando, do valor T_1 , junto à parede, para próximas à chama, a um valor T_2 nas proximidades da parede, onde lado dos gases (Lado Gás) decresce de um valor T_0 , das regiões Em funcionamento normal, o perfil de temperaturas no

Regiões V e VI (F-G): Ebulição em película estável

Região IV (E-F): Ebulição em película parcial instável

D-E: Fluxo de calor crítico

Região III (C-R): Ebulição nucleada, plenamente desenvolvida.

isoladas.

Região II (B-C): região de transição, com a formação de bolhas

para fase líquida.

Região I (A-B): convecção natural, com transferência de calor

rápido. Essa curva permite visualizar as seguintes regiões:

A Figura 5 mostra a Curva de Ebulição nessas condições, tendo, em escala logarítmica: o fluxo de calor por unidade de área nas ordenadas e nas abscissas a diferença entre a temperatura da parede interna do tubo e a temperatura de saturação. Essa curva permite visualizar as seguintes regiões:

co do sistema são mostrados na Figura 4.

percorrido. As condições hidrodinâmicas e o comportamento térmico do sistema são mostrados na Figura 4. Para que seja totalmente vaporizada ao longo do comprimento alimentado por um fluxo de água, com vazão necessária e suficiente, pela extremidade inferior o tubo é uniformemente distribuído. Sendo aquecido externamente por fluxo de calor transversal e sendo percorrido em seu interior por fluxo de água ascendente com parâmetros das experiências realizadas com tubo vertical

Os modelos clássicos da Transferência de Calor em Escaldamento Bifásico (15, 37, 39, 40) permitem avaliar esses riscos

(DNB - *departure from nucleate boiling*).

Nos geradores de vapor e nos reatores nucleares, quando o fluxo de calor local excede o fluxo correspondente ao ponto E, a temperatura do tubo pode aumentar muito rapidamente ao longo da linha horizontal tracejada, em direção ao ponto F. Se a temperatura nesse ponto é suficientemente alta, o tubo superaquece, podendo até alcançar seu ponto de fusão. O ponto E é conhecido como "ponto de queima" e o ponto D, que pode estar muito próximo, é denominado ponto de saída da ebulição nucleada

regime de escoamento anular disperso (Região V).

Essa primeira fase (Região IV) é estável na fase subsequente, em condições conhecidas como ebulição em película, e instável na sobre uma parte da superfície de transferência de calor. Essa As bolhas coalescem e formam um filme de vapor superaquecido ferência das bolhas de vapor com o fluxo ascendente de água. região de fluxo de calor crítico (D-E) que é criada pela inter- Ao fim da região de ebulição nucleada, entra-se numa

cimento.

ido, no instante de liberação de bolhas da superfície de aque- de tensão superficial disponível na interface líquido-vapor-só- mentos secundários da água, provocados pela liberação da energia- ficiente de transmissão de calor, atribuído ao aumento de movi- excede pouco a temperatura de saturação, devido ao elevado coe- Nas regiões I e II, a temperatura da parede do tubo

onde:

W = densidade de fluxo de calor [W/m^2]

σ = tensão superficial da água [N/m]

ρ^s = massa específica da água [kg/m^3]

ρ^v = massa específica do vapor [kg/m^3]

g = aceleração da gravidade [m/s^2]

r^v = calor latente de vaporização [J/kg]

η^s = viscosidade da água saturada [$Pa \cdot s$]

η^v = viscosidade do vapor saturado [$Pa \cdot s$]

d = diâmetro interno do tubo [m]

Pr = número de Prandtl para a água saturada ($Pr = \eta C_p / \lambda$) [adimensional]

C_p = calor específico da água saturada à pressão constante [$J/kg \cdot ^\circ C$]

λ = condutibilidade térmica [$W/m \cdot ^\circ C$]

Re = Número de Reynolds para a água saturada ($Re = G d / \eta$) [adimensional]

G = Velocidade mássica [$kg/m^2 \cdot s$]

$$X_{DNB} = \left[W \sqrt{\frac{g(\rho^s - \rho^v)}{\sigma}} \right]^{-0.125} \cdot Pr^{-0.5} \cdot \left(\frac{\eta^s}{\eta^v} \right)^{-0.2} \cdot \left[\frac{1}{d} \sqrt{\frac{g(\rho^s - \rho^v)}{\sigma}} \right]^{0.2} \cdot \left[\frac{Pr}{500} + 350 \right] + 35$$

essa finalidade:

A localização do DNB, ou seja, o título do vapor onde ele ocorre, depende fundamentalmente da densidade de fluxo de calor, mas uma série de variáveis tem interferência na sua determinação. Kontkov e Modnikova⁽¹⁵⁾ fornecem uma correlação para

Na curva representativa de densidade de fluxo de calor alto, o ponto DNB é alcançado em um título mais baixo e o pico de temperatura é mais alto. Em fluxos de calor muito elevados, o DNB ocorre em baixos títulos de vapor e a temperatura do metal poderia alcançar seu ponto de fusão, se o tubo fosse capaz de suportar a pressão interna sem se deformar plasticamente e sem romper. Em fluxos de calor extremamente elevados, de reatores nucleares, o DNB pode ocorrer em água sub-resfriada.

distançado.

Segundo-se a linha de densidade de fluxo de calor moderada a partir da região de água sub-resfriada, nota-se que a evolução da temperatura do tubo é paralela à linha de temperatura da água e a distância que as separa é pequena. Quando a ebulição tem início, o coeficiente de transferência de calor cresce e a temperatura do metal permanece próxima à temperatura de saturação. O ponto de DNB é alcançado onde o título é elevado - na região de finalização do processo de ebulição nucleada. A temperatura do tubo eleva-se nesse ponto e decresce novamente, quando o título aproxima-se de 100%. Na região de superaquecimento de vapor, a temperatura da parede do tubo novamente acompanha a temperatura do fluido, com paralelismo um pouco mais

rentes densidades de fluxo de calor.

A Figura 6 apresenta a temperatura da parede interna do tubo (da Figura 4), em função do título do vapor e de dife-

Muitas correlações de densidade de fluxo de calor crítica e DNB tem sido propostas, com relativa precisão, dentro de determinados limites de pressão, velocidade mássica e densidade de fluxo de calor. Para geradores de vapor convencionais, de circulação natural, a curva apresentada na Figura 7⁽³⁵⁾, plotando velocidade mássica contra título de vapor saturado, serve como exemplo de aplicação, definindo regiões de segurança e de riscos para dois valores de densidade de fluxo de calor (A: 630 kW/m^2 e B: 315 kW/m^2), a pressão de 18,6 MPa.

Para geradores de vapor que operam na faixa entre 13 MPa e o ponto crítico da água (22,10 MPa) o título correspondente ao DNB pode decrescer de 20% a 1% para densidades de fluxo de calor da ordem de 800 kW/m^2 e de 30% a 1%, para fluxos da ordem de 300 kW/m^2 .

Os riscos referentes ao superaquecimento por deficiência de circulação ocorrem à medida em que se aproxima do ponto crítico da água, devido ao decréscimo da razão dos pesos específicos água/vapor, fator determinante da circulação.

- 18 Cromo - 10 Niquei(815,55gC):
SA 213 TP 304(H); 321 (H); 347 (H)

iii) Aços Inoxidáveis Austeníticos:

. 2 1/4 Cromo - 1 Molibdenio(579,44gC):
SA 213 T-22; SA 335 P-22

. 1 1/4 Cromo - 1/2 Molibdenio (551,66gC):
SA 213 T-11; SA 335 P-11

- Ferríticos:

- Carbono - 1/2 Molibdenio (482,22gC): SA 209

ii) Aços de média liga (intermediate alloy-steel)

- Médio carbono acalmado: SA 210; SA 515; SA 516

- Médio carbono não acalmado: SA 192

- Baixo carbono com silício: SA 106

- Baixo carbono: SA 178

i) Aços-carbono (454,44 gC)

ras máximas usadas⁽³⁸⁾:

Em conformidade com a normalização, de 85 a 90% dos aços empregados estão compreendidos na relação de tipos e especificações listadas a seguir, com as respectivas temperaturas

as diversas partes componentes do equipamento.

Diversos tipos de aço são empregados para a construção de geradores de vapor, conforme a carga e o tipo de calor (radiante, convecção ou condução) a que estarão submetidas

2.2. Materiais Empregados Na Construção de Geradores de Vapor

SA-515 70.

SA-515 65;

SA-515 60;

SA-515 55;

SA-285 B;

SA-285 B;

SA-285 A;

SA 302 B

SA 302 A

- Aços-carbono: - Aços de baixa liga:

de aço empregados são:

a) Chapas: Uma vez que os tubulões de vapor normalmente operam na temperatura do vapor saturado, as propriedades mecânicas mais significativas são as resistências à tração e ao escoamento - e não a resistência à fluência. Os exemplos típicos

mediante os seguintes critérios⁽³⁷⁾:
A Babcock & Wilcox emprega os diversos tipos de aço

como admissíveis para 11 tipos diferentes de aço^(1,38)
propostas pela ASME (American Society of Mechanical Engineers)
A Figura 9 contém faixas de temperaturas e tensões

Mitsubishi.
da CBC - Companhia Brasileira de Caldeiras, com tecnologia
as faixas de temperaturas adotadas como aceitáveis em projetos
A Figura 8 mostra alguns tipos de aços empregados e

cromo, resistentes a corrosão em alta temperatura.⁽³⁸⁾
9 Cromo - 1 Molibdenio SA 213 T-9 e ligas SB-407, de níquel e
tras ligas, como 1/2 Cromo - 1/2 Molibdenio SA 213 T-2;
Em aplicações específicas, podem ser encontradas ou-

principalmente de ferrita (ferro alta) e perlita. vez que sua microestrutura no estado recozido é composta por propriedades magnéticas e são considerados ferríticos, uma molibdenio foram desenvolvidos para esse fim. Possuem propriedades complexas, com ligas de cromo e teores variáveis de da de vapor, e aços de média-liga para a saída.

baixa-liga (carbono-molibdenio): para as regiões de entrada partir desses valores, utilizam-se aços-liga: aços de bono é empregado somente até faixas de 450 gC a 510 gC. A mais altas temperaturas nos geradores de vapor. O aço carbono - Aços-liga: Em superaquecedores e reaquecedores ocorrem as

usuais.

de vapor nas faixas de temperaturas de 280 gC a 360 gC, de tensões mais elevadas em tubos de fornalhas e geração - Aço de médio-carbono (máximo de 0,35% C): permite níveis

e recozidos).

diâmetros e/ou de dimensões especiais são estirados a frio ou soldados eletricamente. (Somente os tubos de pequenos construídas com tubos de aço de baixo carbono, sem costura superfícies de geração de vapor e de economizadores são - Aço carbono: superfícies de paredes de água de fornalhas,

b) Tubos:

- Aços inoxidáveis: São empregados nas regiões de maior aporte térmico de superaquecedores de unidades modernas, que operam em pressões elevadas (de 12 a 27 MPa), às quais correspondem as mais altas temperaturas (de 540 a 570 °C).

. Ferríticos: referidos como "ferro de alto cromo", ou "aço cromo-resistente", são ligas de ferro e cromo, contendo cromo em excesso de 11,5%. São ferromagnéticos, possuem baixa ductilidade e são sujeitos a excessivo crescimento de grãos na soldagem. Os exemplos mais frequentes de especificações são: 410 (12% Cr); 410 S (12% Cr); 405 (12% Cr + Al); 430 (16% Cr); 440 (17% Cr) e 446 (27% Cr).

. Austeníticos: São desenvolvidos aços cromo-níquel, baixo carbono, contendo acima de 16% de cromo, com níquel suficiente para prover estrutura austenítica (Ferro gama com célula de face centrada) em todas as temperaturas. Os mais utilizados são TP 304 H e o TP 321 H, estabilizado com titânio.

ocorrem devido à exposição a altas temperaturas e
 a) ensaio de fluência, que mede as variações dimensionais que

estudada por dois ensaios principais:
 sob tensão em altas temperaturas, é usualmente caracterizada e
 A fluência, deformação progressiva de um material

deformação e do tempo de exposição.
 nessas condições, a resistência depende fundamentalmente da taxa de
 temperatura elevada demanda a adoção de uma escala de tempo, pois
 O estudo da resistência mecânica de metais em

ambiente, causando oxidação superficial e intergranular.

- e) interferências nas condições de interação do metal com o
 dinâmica de recristalização, precipitação e coalescimento;
 d) redução da estabilidade metalúrgica, devido a interferências na
 (mudança nos planos de escorregamento):
 c) mudanças e introdução de novos mecanismos de deformação
 b) aumento da mobilidade de discordâncias,
 a) mobilidade elevada dos átomos, alterando o processo de difusão;

temperatura, devido a:

A resistência dos metais decresce com o aumento da

3. RUPTURAS E DEFORMAÇÕES POR FLUÊNCIA

na microestrutura).

do material deformado, sem que ocorra alguma mudança visível material) e recuperação (restauração das propriedades físicas devido à deformação plástica prévia do aumento (aumento da tensão necessária para produzir Resulta de um processo competitivo entre mecanismos de encurtamento, com variação muito pequena ao longo do tempo.

11. Fluiência secundária: a taxa de fluiência atinge um estágio de

material à fluiência aumenta devido à sua própria deformação. um período de fluiência transitente, no qual a resistência do e declina à medida em que o tempo passa. É predominantemente com uma taxa de fluiência que parte de um valor inicial máximo 1. Fluiência primária: o corpo de prova alonga-se rapidamente,

fluiência, registram-se os seguintes estágios:

Quando um corpo de prova metálico é submetido a um ensaio de

A Figura 10 contém a curva clássica da fluiência (29,33).

0,4, dependendo da energia de ativação.

do material, $\dot{\epsilon}_M$, tal que $\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_M$ resulte valor maior que 0,3 ou

considerável a fluiência, valor $\dot{\epsilon}$, inferior à temperatura de fusão

Entende-se (17) como temperatura elevada, para ser

por longos períodos.

temperatura na capacidade do material suportar carregamento

b) ensaio de ruptura por fluiência, que mede o efeito da

No passado, estudos de fluência e de propriedades de fraturas por fluência de metais e de ligas, fundamentavam-se em um número limitado de parâmetros, tais como estágio de equilíbrio e vida até a ruptura. Uma série de informações era ignorada,

mento da história da tensão aplicada/temperatura. da da evolução de deformação-tempo do material, com o devido conhecimento de serviço, somente podem ser efetivas mediante representação adequada - abordagens, visando estimular o comportamento de componentes em fluência, tempo para uma determinada deformação, etc.). Novas desempenho do material (tais como tempo de ruptura, taxa mínima de dos materiais. Os métodos antigos operavam com algumas medidas de rísticas aos dados requisitados para descrever o comportamento - pregando análises por computador, vem solicitando novas características de projetos industriais envolvendo altas temperaturas e em - Segundo abordagens recentes (23,24,25), avanços em procedi-

III. Fluência terciária: a taxa de fluência cresce com rapidez, provocando alongamento crescente. Na sua evolução normal, o terceiro estágio é finalizado pela ruptura do corpo de prova, ou, quando a tensão é suprimida, por uma deformação acen- tuada. Frequentemente é associado com variações metalúrgicas tais como crescimento de partículas de precipitado, recrista- lização, ou variações difusionais nas fases presentes.

tais como cavidades e fissuras.

(terciária) que resulta da iniciação e crescimento de falhas

III. um período final, de curta duração e nitida taxa de fluência

subestrutura de discordâncias estáveis; e

constante, ou estável, que se acreditava ser associada a uma

II. um período maioritário, dominado por uma taxa de fluência

material, devido à acumulação de discordâncias;

(primária) decrescente, que é associada ao endurecimento do

I. um período inicial relativamente curto, de taxa de fluência

a) em metais puros e em ligas simples, há geralmente:

por precipitação de partículas de segunda fase), considerando que:

para soluções sólidas / (b) - encontrada para material endurecido

Problemas as curvas representadas na Figura 11 (a) - encontrada

reproduz fielmente o comportamento geral dos materiais em fluência.

da fluência (Figura 10), devido a deficiências tecnológicas, não

Dyson e McLean⁽²³⁾ consideram que a curva clássica

preensão e no controle da fluência.

usinas termo-elétricas, promoveu avanços significativos na com-

tagão recente, voltada à apreciação de vida útil de turbinas e de

em temperaturas muito elevadas; e segundo porque a experimen-

motivos: primeiro, porque são usados nas situações mais críticas,

por, mas sua análise se torna de extrema importância, por dois

Tais materiais, não são usuais em geradores de va-

de segunda fase⁽²⁵⁾.

propriedades de ligas endurecidas pela precipitação de partículas

resultando em muitas anomalias, particularmente quanto às

b) E que, em muitas ligas complexas da engenharia, acredita-se agora que o comportamento estável reflete mais a imprecisão das técnicas de medições, do que as propriedades intrínsecas dos materiais: após um curto regime primário, há uma taxa de fluência progressiva causada pelo desenvolvimento de processos de "falhas" (*damages*) sem cavitação, exceto quando a ductilidade é baixa (1-2%).

Dyson e McLean desenvolvem parâmetros-modelo e parâmetros operacionais para o equacionamento da fluência em *software*, conforme figura 12, mas na discussão e *forward look*, concluem que: "se a intenção é modelar a forma de curvas de fluência, a técnica que apresentamos não traz vantagem substancial sobre os métodos empíricos de ajuste de curvas, como os de projeção e". Acrescentam que as vantagens da formulação empregada para o desenvolvimento de *software* estão na flexibilidade de admitir condições de carga variáveis e na extensão dos cálculos para incorporar outros fatores.

A. Plumtree e G. Shen⁽²⁵⁾ combinam a mecânica das falhas contínuas e as projeções para descrever o processo de fluência, particularmente o terceiro estágio, onde o acúmulo de falhas torna-se significativo.

- Nesse método, adotam o seguinte desenvolvimento:
1. Equacionamento da deformação (ϵ) em função do tempo (t) pelo sistema de "projecção" e "admitido como adequado para a predição de vida superior a 10 anos, com base em resultados de testes de curto-prazo (3 meses):
- $$\epsilon = \epsilon_1 [1 - \exp(-\epsilon_2 t)] + \epsilon_3 \exp(\epsilon_4 t) - 1 \quad \dots \text{[Eq. A]}$$
- onde: ϵ_1 , ϵ_3 : definem o domínio referente à deformação
 ϵ_2 , ϵ_4 : quantificam as curvaturas dos estágios primário e secundário.
- e as duas parcelas da equação representam o balanço dinâmico característico da fluência secundária, entre:
 o endurecimento: $\epsilon_1 [1 - \exp(-\epsilon_2 t)]$
 e a perda de resistência: $\epsilon_3 \exp(\epsilon_4 t) - 1$
11. Considerando a mecânica de danos contínuos, introduziram parâmetros que levam em conta a degradação microestrutural, como deformação independente do mecanismo de fluência dominante (ocorrendo por geração e movimentação de discordâncias em tensões elevadas, ou por processos de difusão em regimes de baixa solubilidade), desenvolvendo o equacionamento:
- $$\epsilon = \epsilon_1 (1 - \exp(-\epsilon_2 t)) + \epsilon_3 (1 - t/t_f)^{\alpha} \quad \dots \text{[Eq. B]}$$
- onde: α e ϵ_3 quantificam a tensão e a curvatura do estágio terciário de fluência e
- $$t_f = \text{tempo final de ruptura}$$

IV. Com a aplicação do método, foram encontrados valores (V. Fig. 14 - Medidas e curvas de fluência descritas), que indicam que as equações A e B descreveram satisfatoriamente os dados experimentais existentes, sendo a equação B mais fiel nas proximidades da ruptura.

III. Identificação e ajuste de parâmetros

O parâmetro λ_i (podendo ser θ_i ou α_i) possui relação com a tensão aplicada σ , expressa por:

$$\log \lambda_i = a_i \sigma + b_i \quad (i = 1, 2, \dots)$$

onde a_i e b_i são constantes que dependem do material e da temperatura e podem ser obtidos pelo método de mínimos quadrados (minimização da soma dos quadrados das diferenças entre as observações e os valores reais).

V. Figura 13 - Variação de λ_i com a tensão.

Quando um corpo de prova atinge o terceiro estágio da fluência e em seguida a ruptura, duas configurações principais podem ocorrer:

- a) fraturas com acentuada estricção e
- b) fraturas sem praticamente nenhuma estricção.

As fraturas que ocorrem com estricção são predominantemente de caráter transgranular, enquanto que as sem estricção são exclusivamente de caráter intergranular.⁽⁴³⁾

A uma dada temperatura o tipo de ruptura depende da tensão aplicada. A figura 15 mostra⁽²⁹⁾ a correlação entre tensão aplicada e o tempo necessário para a ocorrência de ruptura por fluência, em função da temperatura. Nesse gráfico, cada temperatura é representada por dois segmentos de reta: o da direita corresponde às fraturas sem estricção e o da esquerda, às fraturas com estricção. No ponto de encontro desses dois segmentos e nas suas vizinhanças (em que a temperatura se denomina equicoesiva), as fraturas são de caráter misto, caracterizando-se por uma estricção intermediária e por trinças mistas. Nota-se que numa dada temperatura e num tempo relativamente curto, as tensões elevadas causam ruptura com estricção, enquanto que as tensões baixas causam ruptura sem estricção, em tempos mais longos.

Observadas as condições do item 2. - "Gradientes de Temperatura", pode-se concluir que temperaturas superiores às de projeto e de funcionamento normal ocorrem quando:

4. RUPURA DE TUBOS DE GERADORES DE VAPOR

Nota-se também que um aumento da temperatura provoca um aumento da estricção. Essa condição é representada na Figura 18, que apresenta as curvas de fluência de um material submetido a uma mesma tensão em diferentes temperaturas. Além disso, o limite de resistência do material decresce linearmente com a elevação da temperatura e essa queda torna-se ainda mais acentuada quando a temperatura é suficiente para permitir recuperação⁽⁴³⁾.

(V. Figura 17).

O mecanismo desse tipo de fluência é o mesmo que conduz a uma ruptura de caráter dútil. Esse mecanismo, num ensaio de tração levaria normalmente a uma fratura do tipo taça e cone mostrado na Figura 16.

Nos casos em que há completa falta ou total obstrução na circulação de água, ocorre um rápido aquecimento do material do tubo que provoca o desenvolvimento de uma fratura ou deformação com estricção acentuada. Um caso típico desse tipo de fratura é

4.1. Rupturas por falta de água

O tipo de ruptura ou deformação decorrente de falhas dessa natureza, depende fundamentalmente do grau de deficiência presente⁽⁴⁴⁾.

- há falta de água, ou deficiência na alimentação ou na circulação, ou
- há impregnação de depósitos junto às paredes de transferência de calor.

fluência.

recuperação, esse mecanismo torna-se fundamental no processo de temperatura atingida pelo material é suficiente para que ocorra a ocasionando deformação plástica ao longo dos mesmos. Quando a diretamente associado ao deslize de grãos nos seus contornos, da formação de trincas intergranulares nesses casos está formação de cavidades ao longo dos contornos de grãos. O mecanismo o material. Se o superaquecimento contínuo persiste, pode causar perla em ferrita e carbonetos esferoidizados, que enfraquecem começa a se formar), causam nos aços-carbono a decomposição da turas inferiores a 721°C (ou AC 1 - temperatura em que a austenita Superaquecimentos prolongados, usualmente a tempera-

mostra a Figura 19 (c).

fraturas são exclusivamente de caráter intergranular, conforme presente caso, de fraturas com pequena estricção, afirma-se que as que as fraturas são predominantemente transgranulares, para o Em contraposição com o caso anterior, em que foi dito

spot, "joelho", ou "laranja" (Fig. 19).

apresentando deformação em estágio de evolução (denominada hot Figura 21 mostra não só tubos já rompidos, mas também, um tubo As figuras 19 e 20 mostram tubos nessas condições e a

longo, caracterizando-se por pequena estricção.

a ruptura ou deformação ocorrerá após um tempo consideravelmente pouco espessa, o aquecimento da parede também será menos intenso e de água é pouco acentuada, ou quando uma camada de incrustação é Quando a deficiência na alimentação, ou na circulação

4.2. Ruptura por deficiência de circulação ou por incrustação

Identificando-se estrutura martensítica, conforme Figura 24⁽⁰⁵⁾ em trechos de tubos rompidos, pode-se concluir, por meio de investigações, que água ou vapor da caldeira tiveram acesso ao tubo superaquecido, resfriando-o rapidamente. A microestrutura do tubo rompido indica que a temperatura excedeu 721°C.

material na zona de ruptura, por meio de exame micrográfico. Em certos casos de rupturas de tubos de geradores de vapor, há possibilidade de se estimar a temperatura atingida pelo

de grande importância, pois com esse dado, pode-se obter informações importantes para análises de causas e de consequências. A apreciação da temperatura em que ocorrem rupturas é

4.3. Estimativa da temperatura em que ocorrem rupturas

coalescimento determinam a propagação da trinca. O crescimento do núcleo, e um processo de crescimento de grãos. A Figura 23⁽³⁵⁾ contém a esquematização das cavidades nos ressaltos (*joags*) de discordâncias, presentes b) nucleação, devido a tensões de cisalhamento, de pequenas

na Figura 22^(29,35). Nesse caso, o escorregamento nos contornos de grão alivia as tensões de cisalhamento ao longo das mesmas e as concentra na região de encontro de três grãos. A formação de uma microtrinca oriunda desse mecanismo é mostrada esquematicamente a) por concentração de tensões de cisalhamento no encontro de três grãos. Nesse caso, o escorregamento nos contornos de grão conjuntamente:

A nucleação de uma trinca intergranular pode ter origem em dois mecanismos distintos que podem ocorrer isolada ou

Especímenes do metal dos tubos rompidos e não rompidos, receberam polimento e ataque químico para exame metalográfico, com aumento de 500 X, revelando:

dados condizentes com a especificação original. Análise química do metal do tubo rompido indicou firmemente aderida.

se cobertas com impregnação uniformemente distribuída, fina, e condições de oxidação geral. As superfícies internas encontravam-se As superfícies externas de todos os tubos exibiram um tubo e seções de dois tubos aparentemente não afetados.

Foram submetidos a investigação a seção de ruptura de medidas com ultra-som apresentaram resultados entre 4,7 e 5,5mm. caldeira revelou a inexistência de tubos bloqueados e espessuras 8,6 MPa e 399°C, sendo a temperatura de saturação 300°C. Exame da temperatura do vapor no momento do incidente foram relatadas como serviço, ocorreu a ruptura de dois tubos adjacentes. A pressão e a caldeira, 2 horas antes do start-up. Seis horas após a entrada em Relatórios indicavam que havia água em quantidade na

vapor. rompidos durante colocação em marcha (start-up) de gerador de ASME SA-192, com diâmetro de 50mm e espessura nominal de 5,6mm, reaquecedor, fabricados em aço de baixo carbono, de especificação O caso em análise⁽⁰⁵⁾, refere-se a dois tubos de

Medições de espessuras e diâmetros externos dos tubos revelaram que os tubos (rompidos ou não) sofreram dilatação. O diâmetro próximo à ruptura variou de 52,4 a 52,9mm (3,5% acima do valor original). Nas regiões dilatadas as espessuras sofreram reduções de 5,7 - 7,3mm a 4,5 - 5,6mm.

Um dos tubos não rompidos [Figura 24 (c)] revelou uma considerável quantidade de martensita ou bainita em matriz ferrítica e dureza de 80 a 82 Brinell. O outro tubo não rompido apresentou estrutura de carbono sob a forma esférica em matriz ferrítica e dureza de 73 Brinell.

b) A microestrutura do metal a 250mm de distância da ruptura apresentou áreas pequenas e aleatoriamente localizadas, contendo martensita acicular ou bainita em matriz ferrítica. Figura 24 (b).

A dureza do metal era de 33 a 34 Brinell. O exame da microestrutura oposta à ruptura revelou menor quantidade de produtos de baixa transformação, o que indica que a temperatura de transformação para o material em questão) superiores a 727°C, devido à elevada dureza apresentada, de 89

A microestrutura e o fato do material não ter sido trabalhado a frio indicou que a temperatura alcançou valores acima de 727°C (temperatura de transformação para o material em questão).

a) nas proximidades da borda do tubo rompido, a microestrutura consistia de ferrita e martensita acicular (forma de agulha) ou bainita (cementita dispersa em ferrita). Figura 24 (a).

As conclusões são que os tubos romperam por superaquecimento rápido. A microestrutura, dureza e espessura dos depósitos indicam que temperaturas acima de 727°C ocorreram em grande parte da caldeira. Os produtos de baixa transformação produzidos revelam que o aço deve ter alcançado 870°C na zona de ruptura e sofrido restrição súbita, causado por fluxo de água liberado pelo próprio tubo, pois a ausência de tratamentos térmicos evidencia que os tubos foram superaquecidos somente uma vez.

relação direta com o módulo de Young, $E: [\mu = E / 2(1 + \nu)]$, submetido à tensão de cisalhamento τ (V. Figura 25). Seu valor tem sendo γ a deformação angular resultante sobre um cristal unitário cisalhamento, ou de torção, também é conhecido como $[\phi = \tau / \mu]$, ensaio. O módulo de elasticidade de cisalhamento (μ), ou módulo de elasticidade de cisalhamento, não importando a temperatura de efeito, as tensões devem ser da ordem de $\mu / 10$, sendo μ o módulo vizinhos, produzindo a deformação permanente. Para se obter esse átomos no cristal podem ser integralmente afastados de planos de Em tensões suficientemente elevadas, os planos de os defeitos necessários aos outros tipos de deformações.

Uma tensão que excede a tensão de cisalhamento ideal causa deformação plástica, mesmo que o cristal não tenha 1º : Deformação de cristal perfeito (defect-less flow).

Dentre esses modos, destacaremos como principais:

Seu trabalho parte do princípio de que quando um material cristalino é plasticamente deformado, sua cristalinidade é preservada e que existem modos distintos e independentes pelos quais um polícristal pode ser assim deformado. Dentre estes modos, destacaremos como principais: Dentre eles, destaca-se para a construção de Mapas de Fraturas. Dentre eles, destacamos Ashby, que desenvolveu a forma mais clara para visualização dos fenômenos e, consequentemente, um dos métodos mais eficazes para o controle de deformações de materiais submetidos a tensões em diversas temperaturas. Diversos pesquisadores (17,41,44) criaram metodologias

5. MAPAS DE FRATURAS

O deslizamento de discordâncias é limitado nos cristais pela presença de obstáculos, tais como impurezas, solutos, outras discordâncias e precipitados. Para tais cristais, a tensão de deformação é proporcional a $[H b / l]$ onde l é a distância entre os obstáculos e b é o vetor de Burgers (descrição unitária quantitativa e orientada de uma discordância). A

Praticamente todos os cristais possuem imperfeições. As discordâncias são podendo ser de ponto, linha, ou de superfície. As discordâncias são os mais importantes defeitos de linha em redes cristalinas, constituindo a região de distúrbio localizado da rede, que separa as regiões deslizadas e não deslizadas do cristal.

2º : Deslizamento de discordâncias (*dislocation glide*)

ideal

σ é a tensão de tração correspondente à tensão de cisalhamento

v é a velocidade de deformação à tração

onde:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 = 0 \\ \sigma_1 = \infty \end{array} \right\} \begin{array}{l} \sigma / H < \sigma_1 / H \\ \sigma / H \geq \sigma_1 / H \end{array} \quad (1)$$

As relações que definem esse comportamento são:

1/3).

Conde ν é o coeficiente de Poisson, que relaciona a deformação transversal com a deformação longitudinal e tem valor da ordem de

ela assume a forma:

A movimentação de discordâncias em cristais de corpo centrado e em carbeto é mais difícil: por si mesmo, a malha de cristal oferece ao movimento uma resistência inversamente proporcional à temperatura. Ashby adota para essa resistência um potencial cuja energia de ativação requerida para mover uma discordância assume a forma:

$$S = H b / l$$

onde S = taxa de deformação quando $\sigma = S$

H = temperatura absoluta
 a = área de ativação
 σ_0 = tensão de corte
 k = constante de Boltzmann = $\left\{ \begin{array}{l} 1,38054 \times 10^{-23} \text{ J / K mol.} \\ 4,98 \times 10^{-8} \text{ kcal/h m}^2 \text{ K} \end{array} \right.$

representa a tensão de deformação no zero absoluto

$$\left. \begin{array}{l} \frac{H}{\sigma} \approx \frac{H}{\sigma_0} \\ \frac{H}{\sigma} > \frac{H}{\sigma_0} \end{array} \right\} \text{(2a)}$$

Figura 26 ('42) representa esquematicamente as discordâncias, usando as linhas de discordâncias e o vetor de Burgers em uma estrutura cristalina de NaCl. (Observação: para traduzir *dislocation*, esse autor emprega os vocábulos *deslocação* e *deslocamento*, ao invés de *discordância*, termo mais aceito atualmente).
 A constante de proporcionalidade da deformação é complexa: depende da tensão dos obstáculos e de sua distribuição probabilística. Ashby adota a seguinte equação constitutiva:

onde:

$$\epsilon_{3,4} = 14 \left\{ \frac{\sigma_p}{\sigma_0} \frac{k}{\mu} \frac{D^2}{1} D^V + 1 + \frac{D}{\pi \delta} \frac{D^V}{D^B} \right\} \quad (3,4)$$

intergranular):

Escoamento por difusão de íons, causados pelo transporte transgranular ou intergranular, provocam a fluência Newtoniana-Viscosa de um polícrystal, com as seguintes equações constitutivas combinadas (índice 3 para transgranular e 4 para

3º : Fluência por difusão (diffusional creep)

Diferentemente das outras relações constitutivas, essa não representa um mecanismo independente, alternativo. A resistência do cristal é um mecanismo de endurecimento (work-hardening) e não um mecanismo de deformação. Deve ser incluído como ten- são superposta e não como taxa de deformação.

sendo ϵ'_0 um termo pré-exponencial adequado.

$$\epsilon'_2 = \epsilon'_0 \exp - \frac{k}{\mu} \quad (2b)$$

A taxa de deformação é dada por

onde σ_p é a tensão de deformação no zero absoluto e u^k é a energia de formação de um par de torção

$$u = z u^k \left\{ 1 - \frac{\sigma_p}{\sigma} \right\}^2$$

onde A e n são constantes

$$\epsilon_s = A \frac{D_v^v}{D^d} \left[\frac{H}{\sigma} \right]^n \quad (5)$$

obedecendo a seguinte relação constitutiva:

Essa fluência de discordâncias é encontrada experimentalmente,

não linear da tensão (diferente da fluência por difusão).

do escoamento por difusão), mas a taxa de deformação é uma função

ção resultante é aparentemente controlada por difusão (diferente

grãos de um polícrystal e se agregam formando células. A deforma-

relativamente elevadas, as discordâncias movem-se através dos

Em temperaturas acima de $0,5 T_M$ e tensões

4º : Fluência de discordâncias (dislocation-creep)

distintos e aplicáveis em campos diferentes.

equações em uma só (3,4), os dois processos são independentes,

Embora o tratamento adequado permita combinar as duas

denominada Coble-creep.

fluência com predomínio de difusão intergranular, por sua vez, é

é denominada de Nabarro-Herring, ou simplesmente Nabarro-creep. A

Quando a difusão transgranular predomina, a fluência

D_B = coeficiente de difusão intergranular

D^v = coeficiente de difusão transgranular

d = tamanho do grão

Ω = volume atômico

[Segundo Ashby, a forma geral dessa equação pode ser levantada teoricamente (por exemplo, postulando que se trata de um escoamento simplesmente difusional, com o tamanho de grão substituído por um tamanho de célula dependente da tensão). Não há teoria conveniente neste sentido mas, do ponto de vista experimental, a documentação disponível é bastante ampla, com dados das constantes A e n para uma grande variedade de materiais].

Com esse equacionamento, desenham-se mapas bidimensionais, no plano tensão/temperatura. Como eixo de temperaturas (abscissas), usa-se a temperatura homóloga (T/T^M) e como eixo de tensões (ordenadas), usa-se a tensão de tração normalizada (σ/μ), onde μ é o módulo de elasticidade de cisalhamento. Essa normalização propicia grande vantagem de reduzir os mapas para materiais da mesma classe de cristal e ligações, para um mesmo grupo. Com (σ/μ) variando de 10^{-8} a 1 e (T/T^M) variando de 0 a 1, são cobertas todas as possibilidades de valores das variáveis encontradas na prática.

A construção dos mapas envolve as seguintes etapas:

1^a) Pergunta-se inicialmente: em qual campo do espaço tensão/temperatura um mecanismo é dominante sozinho, ou seja, onde ele fornece taxa de deformação maior que qualquer outra, fornecida por outro mecanismo isolado?

Fixando-se uma determinada taxa de deformação e fazendo-se variar o material, pode-se visualizar a utilidade dos mapas para a comparação entre materiais de estruturas similares e materiais de estruturas diferentes. A Figura 28 (a, b e c), mostra a semelhança entre tres materiais de estrutura cubica de face centrada: alumínio, chumbo e níquel, para um mesmo tamanho de grão ($32\mu\text{m}$) e uma mesma taxa de deformação (10^{-8}seg^{-1}), permitindo notar a sensibilidade de cada um deles aos diversos mecanismos. A Figura 28(d), com o tungstênio, de estrutura cubica de corpo centrado, revela, para a mesma taxa de deformação e o mesmo tamanho de grão, a grande diferença de comportamento, com diferentes dimensões e formatos de campos.

digão, para o níquel e para o tungstênio. Formação constantes. As Figuras 27 (b) e (c) apresentam essa contornos de deformação, permitindo-se plotar contornos de taxas de deformação, com a equação constitutiva apropriada, pode-se calcular a taxa de deformação, permitindo-se plotar contornos de taxas de deformação constantes. As Figuras 27 (b) e (c) apresentam essa contornos de deformação, permitindo-se plotar contornos de taxas de deformação, com a equação constitutiva apropriada, pode-se calcular a taxa de deformação, permitindo-se plotar contornos de taxas de deformação constantes.

Qualquer par de valores de tensão e temperatura pode dessa maneira localizar um ponto em um campo. Pelo mapa pode-se ler o mecanismo dominante.

2^a) As fronteiras entre os campos são obtidas resolvendo-se pares de equações constitutivas (1)-(5) para tensão em função da temperatura. Em uma fronteira, os dois mecanismos que ali se encontram contribuíram igualmente para a taxa de deformação. Em um ponto onde tres campos se encontrarem, tres mecanismos contribuirão igualmente. A Figura 27 (a) mostra os campos obtidos dessa forma, para o Níquel.

A Figura 29, mapeando o ferro, permite visualizar seu aumento de resistência à fluência ao transformar-se da estrutura de corpo centrado (que possui maiores coeficientes de difusão) à estrutura de face centrada (que possui coeficientes menores). Mapas mais completos como o da Figura 30, para o óxido de magnésio⁽¹⁷⁾ deixam mais claros os modos de ocorrência de fraturas, dentre as quais, destacamos a transgranular, conforme segue (Figura 31):

a) cavidades são nucleadas em torno de falhas pontuais já existentes, ou das inclusões, que concentram tensões;

b) as cavidades alongam-se, conforme o material é estendido;

c) as cavidades unem-se quando seu comprimento $2h$ tende a se igualar à separação entre elas ($2l-2rv$);

d) a cavidade única, formada pela união das cavidades, aumenta rapidamente, segundo uma direção transversal à direção da tensão e passa a constituir uma trinca;

e) a trinca formada no interior do material, depois de propagar-se até as proximidades da superfície, segue uma direção que forma um ângulo de 45° com o eixo da tensão, levando à ruptura final.

"A extensão de vida dos geradores de vapor existentes tornou-se um item da maior importância para a indústria de utilidades elétricas. Muitas usinas tem caldeiras em uso com mais de 30 anos de idade. Originalmente, essas plantas tinham uma vida determinada de 25 a 30 anos, antes de serem descartadas devido a obsolescência. Era esperado, na época, que os equipamentos de reposição seriam projetados para maiores níveis de capacidade, maiores eficiências e maior disponibilidade por meio de aperfeiçoamentos tecnológicos. No entanto, as circunstâncias alteraram essas expectativas, criando uma situação mais favorável ao rejuvene-

te explicitada, com importantes detalhes e considerações:

Na literatura científica essa situação é objetivamente

incluídos com destaque.

de equipamentos, entre os quais os geradores de vapor tem sido Programs, destinadas a apreciar com exatidão a vida remanescente *Residual Life Assessment*, ou *Life Evaluation and Extension* de estratégias tecnológicas próprias, recém-desenvolvidas, denominadas Essa contraposição se resolve, enquanto não antagônica, por meio jeta a riscos causados pela atividade de máquinas extenuantes. outro lado, a segurança - a vida de pessoas - não pode estar usado sem se comprovar o real esgotamento de sua existência. Por nal, não oferecem mais a facilidade de descartar-se de maquinário -

As atuais condições econômicas, a nível internacional

6.1. Por que prever vida útil

6. PREVISÃO DE VIDA ÚTIL DE GERADORES DE VAPOR

nescimento dessas unidades com mais de vinte anos. A vida útil de caldeiras de utilidades não é limitada por projeto a uma idade predeterminada. Em muitos casos, unidades com 25 ou 30 anos tem muitos mais anos de vida útil (20).

"Em geral, como as usinas termo-elétricas tornaram-se menos econômicas para serem operadas, foram retiradas de linha e novas plantas as substituíram. Todavia, as mudanças nas condições econômicas e o crescente clamor pela proteção ambiental estão tornando mais difícil a construção de novas unidades. Como resultado, as áreas de utilidades tem aumentado o interesse em manter suas velhas usinas termo-elétricas de modo a otimizar demandas. As velhas caldeiras foram originalmente projetadas como unidades básicas de abastecimento de vapor e muitas delas estão sendo relegadas a cargas intermediárias e cíclicas. Essas cargas cíclicas requerem aumentos extremos de "liga-desliga" e de oscilação de carga. Como resultado, as partes sujeitas a pressão sofrem aumento substancial de sollicitações térmicas e cíclicas. Isso afeta as propriedades do material dos componentes críticos e os deixam mais suscetíveis a falhas por fadiga, fluência e interações de fadiga e fluência. De modo a estimar claramente a vida útil remanescente e manter a confiabilidade... são requeridos métodos para avaliar a condição presente e monitorar a condição do equipamento durante a operação continuada. É difícil dar conta da história operacional de uma caldeira exatamente dentro da avaliação analítica dos dados, assim o exame direto dos componentes críticos é considerado como o melhor meio de determinar a vida remanescente. Atividades de pesquisas para desenvolver tais técnicas de exames encontram-se

Retardamentos e cancelamentos na construção de novas usinas geradoras criaram uma nova preocupação para a indústria de eletricidade. Muitas caldeiras antigas, projetadas e construídas nos 20-40 anos atrás, que teriam sido retiradas de funcionamento nos próximos anos, devem agora ter suas vidas úteis estendidas por mais 10-30 anos. Essas caldeiras velhas contêm componentes em

no" (21)

antes desgastados, com segurança, economia e em momento oportuno - predição de vida útil oferecem uma base para reposição de componentes de vida residual são necessários. Métodos precisos e ágeis de vida operacional. Por essa razão, métodos confiáveis para predição lógicas e devem encontrar um meio para estender com segurança a instalação e caldeiras existentes por razões econômicas ou tecnológicas sua vida esperada de projeto. Muitas companhias não podem repor tem estado em serviço por 20-30 anos ou mais e estão alcançando cas. O problema é especialmente importante para as unidades que muitas indústrias - engenharia de potência, químicas e petroquímicas - trabalhando em altas temperaturas é um problema enfrentado por "Prever a vida residual de elementos pressurizados

de life assessment tem que ser estabelecida" (28)

manutenção sistemática, não há dúvida de que tecnologia confiável razões econômicas. De maneira a estender a vida útil por meio de cionando após reparos apropriados ou reposições parciais devido a operou por mais de 20 anos. Elas serão forçadas a continuar funcionamento por mais de 50 e 60. Mais da metade de tais equipamentos é antiquada e já "No Japão, muitas caldeiras foram construídas nos

em progresso" (19)

se conceber um planejamento geral objetivo.

perguntas básicas devem ser preliminarmente formuladas, de modo a

Para se proceder a previsão de vida útil, algumas

um gerador de vapor, que ainda se encontra em operação.

narski⁽²¹⁾, com dados que começaram a ser compilados em 1954, de

estimável nível de organização poderiam permitir o estudo de MLY-

importante preservar a sua história. Somente essa filosofia e

componentes, solicitações e métodos de construção, torna-se muito

que podem assumir uma certa complexidade, devido à grande gama de

para extrapolações. No caso de geradores de vapor, equipamentos

uma história em evolução, infra-estrutura para análises e modelos

Previsões são possíveis somente quando se dispõe de

6.2. Planejamento Geral

des⁽¹⁸⁾.

tes, resultando em notáveis reduções na confiabilidade das unida-

lidades serão um crescimento das taxas de falhas desses componen-

nesciente esperada. As consequências de indolência na parte de uti-

cos de caldeiras e metodologias para determinar a vida útil rema-

um programa para definir a presente condição de componentes criti-

durar mais 50 anos ou mais... É imperativo que sejam estabelecidos

melhor tecnologia disponível na época, não foram projetados para

que esses componentes tenham sido projetados em conformidade com a

dores, que operam em regime de fluência dependente do tempo. Ainda

altas pressões e temperaturas, tais como coletores de superaquece-

Consiste em priorizar os subsistemas de um gerador de vapor, conforme ofereçam maior ou menor risco e/ou perigo (de explosão) em caso de falha. Assim, podemos, sem dúvida, destacar o tubulão de vapor (balão, ou *drum*), e o costado de caldeiras (tubo-tubulares, como itens prioritários, uma vez que:

- Critério da segurança:

diversos critérios podem ser adotados para o direcionamento objetivo dessa questão e para a obtenção de respostas adequadas. Destacamos dois critérios: o da segurança e o da probabilidade de ocorrências:

Itens de um gerador de vapor devem ser prioritariamente escolhidos para serem submetidos a análises profundamente detalhadas.

a) Onde atuar?

com que modelo matemático efetuar análises?

e

· como, com que estrutura?

· quando?

· que mecanismo monitorar?

· onde atuar?

quintess:

Dentre outras, consideramos como fundamentais as se-

- são os elementos pressurizados dotados de maior diâmetro, tendo portanto, espessura crítica;
 - são itens preferenciais a riscos de corrosão por diversos meios simultaneamente atuantes (que associados, provocam danos superiores à soma dos danos que causariam isoladamente), tais como: aerção diferencial, erosão pela incessante variação de nível de água, erosão pela colapso de bolhas de vapor e corrosão pela formação de cloratos;
 - são componentes que armazenam fluido compressível (vapor), com disponibilidade iminente de nucleação de onda de choque no ambiente, em caso de liberação repentina (explosão);
 - conforme estatísticas de incidentes⁽³⁾, são subsistemas com maior índice de frequência e maiores ainda índices de gravidade: com eles ocorreram 41% dos incidentes registrados, 48% dos acidentes com vítimas e 58% dos acidentes com mortes).
- Critério da probabilidade de ocorrências
- Evidentemente, as zonas sujeitas a maiores aportes energéticos, tanto na operação, como na construção, submetem-se a maior probabilidade de deformações, por fluência, ou por acúmulo de tensões. Davidson⁽²⁰⁾ relaciona como "componentes críticos":
- Balão (drum);
 - Coletores de superaquecedores;
 - Coletores de reaquadros;
 - Conexão de reaquadros;
 - Painel de divisão de reaquadros;
 - Parede radiante de reaquadros;

A essa relação consideramos importante acrescentar os tubos de circulação vertical ascendente (*risecomers*), devido às condições estudadas no capítulo 2.1. "Gradientes de Temperaturas"; as juntas soldadas e os tampos (principalmente não semi-estêrnicos) devido a acumulos de tensões. Ainda outra linha de raciocínio deve ser considerada, devido ao risco da formação de incrustações: o interior de tubos curvos e demais superfícies que possam constituir receptáculos de acumulos de sólidos.

No caso de caldeiras de recuperação de licor negro, da indústria de celulose, maior rigor e orientação específica devem ser adotados, uma vez que o acesso de água ao lado gás provoca explosão, pela repentina reação com o fundido (*molten smelt*). Os critérios mencionados não devem ser encarados isoladamente, a combinação de critérios pode e deve ser realizada. Assim, mais dois fatores importantes não podem ser negligenciados para ser respondida a pergunta "onde atuar?":

- a disponibilidade de peças para análise, devido ao custo das pesquisas pode tornar-se problemática e determinante. Oportunidades momentâneas não podem ser desprezadas, ainda que tenham sido programadas.

- . Tubulação de resaquecimento de pré-dessuperaquecedor;
- . Tubos de circulação vertical descendente (*Downcomers*)
- . Sistema tubular (*manifold*) de mistura de resaquecimento
- . *Manifold* de mistura de vapor principal
- . Coletor de economizador
- . Selo de topo (*high crown seal*)

Normalmente, a resposta a essa questão associa-se à infraestrutura: o programa deve prever todo o material necessário para se procederem as avaliações. No entanto, em certos casos, recursos já disponíveis podem condicionar o programa, com a devida adequação. Segundo Davidson⁽²⁰⁾, "o *Boiler Stress and Condition Analyser* (Analisador de Solicitações e Condições da Caldeira) pode ajudar a responder essas questões. O *Analyser* avaliará o modo presente de operação. O *Analyser* ajudará a otimizar o ritmo de funcionamento—não funcionamento, identificando transientes de danos. A operação contínua será avaliada para maximizar a vida dependente de fraturas por fadiga. Danos acumulados para componentes individuais baseados na operação da unidade serão cal-

c) Quando atuar?

Como foi visto no item anterior, certas partes de uma caldeira estão mais expostas a corrosão do que à fadiga; a fadiga também pode assumir papel importante na determinação da vida útil de geradores de vapor. A fadiga é, no entanto, o mecanismo prioritário de envelhecimento de geradores de vapor, os demais mecanismos, usualmente são estudados como coadjuvantes.

b) (Que mecanismo monitorar?)

deverá ser estudado.

- a resposta à pergunta seguinte "que mecanismo monitorar?", confere objetividade máxima à determinação do componente que

com essa informação, a unidade estará apta a predigê-las mais precisas quando um componente específico estiver em risco de falha. Se a falha é prevista, uma inspeção do componente será feita durante a próxima parada programada, para se determinar a extensão do dano".

Harth⁽¹⁸⁾ relata uma interessante situação específica - ca, não programada mas, também não tanto inesperada: "Coletores secundários de saída de superaquecedores e tubulações de conexão de vapor principal estão usualmente localizados no topo ou no vestíbulo de caldeiras... Assim como todas as partes sujeitas a pressão, as tensões de projeto permitidas para esses componentes são estabelecidas pela Seção I do Código ASME. O banco de dados usado para desenvolver as tensões permitidas para o material 1 1/4Cr - 1/2Mo - SI (P11) no código ASME de 1951 era relativa-mente pequeno e foi re-avaliado em 1965, quando mais dados tornaram-se disponíveis. O resultado foi que as tensões admissíveis para o Croloy 1 1/4 foram consideravelmente reduzidas no código de 1965 (Ver figura 32). Os componentes projetados no período de 1951 a 1965 podem estar operando em tensões superiores às atualmente permitíveis e podem sofrer deformações excessivas por fluência". Essa situação forçou aos usuários a implementação de programas praticamente de emergência para se investigar o emprego de tais materiais e a taxa de deformação sofrida por eles.

procedimento mais completo deve ser empregado. muito bem como meio para mapear e auxiliar a decisão de qual a vida útil em questão encontra-se em sua fase terminal. Serve como instrumento, não como um método em si, principalmente quando Na maior parte das vezes, a documentação pode servir

ções não diretamente aplicáveis à determinação de vida útil. tros de usuários podem ser incompletos, mal-feitos ou com informa- materiais podem variar muito dos dados publicados e que os regis- vels. Leva em conta também que as verdadeiras propriedades dos casos, os dados requeridos para cálculos precisos não são disponi- para outra, devem ser estimadas, além do que, na maioria dos e sistemas de tensões impostas, que podem variar de uma unidade considera que as desvantagens são significativas: tensões térmicas de vida exaurida e remanescente pode ser derivada. No entanto, lativo de danos (por exemplo, de vida até a ruptura), a estimativa registros de operação. Segundo Harth, usando-se um registro acumu- cantes e a história operacional do equipamento pode ser obtida de de materiais podem ser obtidas de publicações e de dados de fabri- podem ser calculadas pelas informações de projetos; propriedades não requerer qualquer medição física. Solicitações e temperaturas convenientemente estruturados. Esse instrumento tem a vantagem de construção e nos registros históricos de operação, desde que sejam Cálculos podem ser realizados com base em projetos de

- documentação:

de *Life Assessment* consiste das seguintes partes fundamentais:
A estrutura básica para o desenvolvimento de programas

d) Como, com que estrutura?

- Equipamento *in situ*, que corresponde às caldeiras que se preten-
- de estudar e que podem servir de objeto de observação direta,
- desde que lhe sejam conectados sensores ou dispositivos que fa-
- voreçam a obtenção de dados. Nessa categoria pode-se diferenciar
- dois tipos de equipamentos: protótipos, que simulam condições de
- operação e unidades reais, em operação normal.
- espécimes descartados da unidade, para exames de laboratórios.
- sensores e instrumentos de campo, compreendendo desde os medi-
- dores de espessuras, diâmetros, dimensões lineares, temperaturas,
- pressão, etc., até os equipamentos portáteis de verificação *in*
- loco, por ultra-som, *eddy current*, raios-X, microscopia, re-
- plificação, etc.
- laboratórios, compreendendo instalações completas de microscopia
- óptica, ou eletrônica, difratometria de raios-X, micrografia,
- cromatografia e dispositivos de ensaios de tração, fluência,
- fadiga e outros.
- *hardware*, compreendendo sistemas de aquisição e de entrada de
- dados, unidades de processamento, simulação e armazenamento de
- dados e subsistemas de comunicação operacional, integrados e co-
- mandados por meio de *software* compatível, que compreende o sis-
- tema de programas operacionais.
- pessoal qualificado, compreendendo auxiliares de campo, de labo-
- ratório, técnicos, engenheiros e técnicos de nível superior.

e) com que modelos matemáticos efetuar profecões?

Entende-se como modelo a construção teórica com que se procura representar um sistema mediante um outro sistema, material ou não, de cujo comportamento se possa inferir o comportamento e as propriedades do primeiro. No modelo matemático, a representação não se traduz em entidades ou processos materiais sensorialmente perceptíveis, mas sim em equações apropriadas que refletem propriedades intrínsecas do sistema e servem para prever novas propriedades ou organizar teorias mais gerais.

A escolha de um modelo adequado está intimamente relacionada não só com os mecanismos físicos a que se submetem os espécimes em análise, como também, com a metodologia empregada para se proceder o estudo.

Quando se trata de estudar um componente que tenha

curta duração, como um propulsor de foguete, ou pá de turbina, a dificuldade é totalmente oposta à que se apresenta a estudos de fadiga. Se a vida esperada do componente em questão é de 30 ou 40 anos de serviço ininterrupto, não há como se simular suas condições em igual tempo real. A alternativa prática é desenvolver testes de fadiga e extrapolar os dados ao regime de tempo-tempo-temperatura-tensão de interesse. Os modelos matemáticos apresentados para essa finalidade vem sendo desenvolvidos praticamente desde

1932, quando N. C. Andrade e B. Chalmers apresentaram a formulação pioneira $\epsilon = \epsilon_0 (1 + \beta t^{1/3}) e^{-\alpha t}$, com β e α constantes. Até

hoje, mais de 30 formulações foram desenvolvidas, com o objetivo de extrapolar-se dados para fora dos limites laboratoriais (46).

6.3. Experiências recentes

Algumas experiências aplicadas tornaram-se objeto de publicações científicas, contendo metodologias completas, desenhadas para *life assessment*. Uma vez que não se pode ter a expectativa de um manual genérico, aplicável a todas as situações, a compreensão e a análise de alguns desses recentes estudos torna-se um instrumento de grande valia para propostas futuras.

Para analisar as condições de operação dos coletores construídos com materiais reavaliados pelo código ASME em 1965, Harth⁽¹⁸⁾ adotou o seguinte procedimento:

- remoção do isolamento (térmico) e exame visual dos coletores, da tubulação, de suportes e soldas tubo-coletor;
- medição de diâmetros dos coletores e dos tubos;
- inspeção com líquido penetrante nas soldas tubo-coletor;

- confecção de réplicas das soldas tubo-coletor, para pesquisa de cavitação e microtrinças
- exame visual nas conexões entre tubos e coletores, para pesquisa de trinças de interligação.

A Figura 33 apresenta a acumulação de vazios observada em réplicas e o estágio de fluência correspondente, conforme o estudo de Harth.

Em caldeira ultrasuperfritica de termoelettrica, do tipo *once-through* (em que não há um limite de nível entre água e vapor), com turbinas operando nas faixas de 550°C e 34 MPa, Masu-yama e Setoguchi⁽¹⁹⁾ realizaram estudos, analisando tubos de aço inoxidável da linha principal de vapor. Especimes contendo solda entre materiais dissimilares (2 1/4 Cr - 1 Mo e Aço austenitico 316 SS) foram submetidos a ensaios combinados de fadiga e fluência (produzindo-se ciclos térmicos de aquecimento a 600°C e posterior arrefecimento a 50°C). Os exames físicos e químicos realizados são apresentados na Figura 34.

O método de Mynarski⁽²¹⁾, que realizou medições desde 1954, teve como recursos básicos, tubulações dotadas de pinos para medição de diâmetros externos, conforme Figura 35. O modelo matemático empregado serviu-se da equação:

$$\epsilon_{\phi,0}(\tau) = a [1 - \exp(\tau/b)] + \epsilon^m \tau$$

onde a e b são constantes calculadas da equação

$$\sum_{i=1}^N [\epsilon_i - \epsilon_{\phi,0}(\tau_i)]^2 = \min$$

onde ϵ_i é a deformação medida no momento $\tau_i = 1, \dots, N$

Se as constantes a, b e ϵ^m são calculadas dessa forma, então a

equação é a melhor aproximação dos valores de deformação medidos,

em conformidade com o método dos mínimos quadrados.

As curvas assim obtidas são apresentadas na Figura 36,

juntamente com os pontos representativos das medições feitas.

Duas publicações relatam experiências realizadas com espécimes-miniaturas, de 2 e 4 mm de diâmetro, em substituição aos de 8 e 10 mm, convencionais em testes de fluência acelerada. Mini-aturas são importantes, pois tendem à obtenção de amostras praticamente não destrutivas, que podem ser analisadas com os recursos dos testes destrutivos, além de demandarem menos energia e espaço físico de instalações laboratoriais. A Figura 37 mostra a comparação realizada por Viswanathan, Dooly e Saxena⁽²²⁾, que analisaram tubos soldados, entre espécimes convencionais e miniaturizados expostos a fluência. Um detalhe importante dessas experiências é a necessidade de serem realizadas em atmosfera de argônio, também constatada por Kadoya⁽²⁶⁾; cuja "máquina de teste de fluência em miniaturas" (*miniature creep test machine*) apresentamos na Figura 38, acompanhada de resultados obtidos.

7. DISCUSSÃO

Para conceber projetos em geral, a engenharia serve-se de propriedades de materiais, traduzidas em parâmetros quantitativos, que permitem o dimensionamento dos componentes da unidade a ser construída.

A segurança da operação desses componentes e portanto, da unidade, fica sujeita a diversas circunstâncias, dentre as quais ressaltamos as seguintes:

- os projetistas necessitam conhecer as propriedades dos materiais, para as diversas condições de solicitação;

- ao longo do tempo, o complexo de solicitações desencadeia mecanismos intrínsecos de deformações dos materiais, ainda que o funcionamento da unidade obedeça todas as técnicas previstas e recomendadas para a operação normal;

- em casos de funcionamentos anormais, as deformações ocorrem segundo mecanismos diferentes e com outras taxas, acelerando o processo, em direção ao final da vida útil de um ou mais componentes.

Essas três condições, se não forem convenientemente acompanhadas e controladas, podem provocar o colapso da unidade. No caso de geradores de vapor, que operam em pressões superiores à atmosférica, esse colapso associa-se diretamente à possibilidade da ocorrência de explosões, com magnitudes que podem ser catastróficas, colocando em risco a vida de pessoas e a integridade de instalações.

8. CONCLUSÃO

A mais moderna e completa estratégia tecnológica para se proceder avaliação e controle de riscos de geradores de vapor, no que se refere a BLEVES (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions) causadas por superaquecimentos, é a que se consolida com métodos de avaliação de vida útil (Life assessment, life prediction, ou life evaluation).

Analisando-se as vantagens e as limitações dos diversos métodos desenvolvidos, nota-se que um instrumento pode torná-los ainda mais poderosos: mapas de fraturas para materiais desenvolvidos para liga de engenharia, com a indicação do campo típico de operação de turbinas).

Os mapas de fraturas conferem mais segurança às experiências de testes de fluência, pois permitem apreciar globalmente em que campos as experiências se transcorrem e em que campos o funcionamento real se processará.

A utilidade dos mapas de fraturas transcende esse função. Projetistas deveriam dispor de cópias deles, para procederem a escolha dos materiais, correlacionando campos de mecânicos de deformações com a expectativa de solicitações esperada na vida útil real.

Trata-se de uma fase importante para um acervo tecnológico futuramente indispensável: seu surgimento, instante mais oportuno para informatização. Um tema de interesse para pesquisas próximas é o desenvolvimento desse acervo, dotado de bancos de dados de múltiplas entradas e de computação gráfica.

contram compilados.

ros, são disponíveis na literatura científica e ainda não se encontram materiais não é plena. Espécimes escassos e, porque não dizer, raros, são disponíveis de mapas de fraturas para esses

plexas ligas.

Para a construção de geradores de vapor, são empregados diversos tipos de materiais, desde aço carbono até mais complexas ligas.

9. Temas para pesquisas futuras - formulação de uma proposta

TABELAS

caso	data	local	inflamavel	fonte	massa(kg)	mortes	TNT equivalente (kg)	Eficiencia (%)
1	ago 1921	Hull, Inglaterra	hidrogenio	dirigivel ZR-2	6900	1	450	0,25
2	1961	Texas, EUR	ciclohexano	processo	3860	1	25	0,06
3	Jul 1974	Decatur, Ill. EUR	propano	tanque ferroviario	63000	7	20 a 40	32 a 65
4	1963	Dow Quimica, La. EUR	metano ou etileno	processo	-	0	1000	-
5	Jan 1964	Nevada, EUR	hidrogenio	laboratorio	90	0	27	1
6	Jan 1966	Caltex, Alemanha	metano	processo	500	1	1000 a 2000	18 a 36

Tabala 1 - Seis casos elucidativos de explosoes analisadas por Keith Gugen (9)

Data	Local	Fonte	Vítimas	Danos materiais
Jan 1982	Star Elementary School Spencer, Ok. EUA	Aquecedor de água, 320 litros - 500 kPa	Fatais: 6 alunos e 1 professora Feridos: 33	Destruição de um canto da cafeteria (9m por 7,5m, por 3m de altura)
Mar 1990	Hospital N.Sa. da Penha São Paulo SP. Brasil	Gerador de Vapor 2.000 litros - 827 kPa	Fatais: nenhum Feridos: 5	Destruição da Casa de Caldeira (300 metros quadrados)

Tabela 2 - Explosão de aquecedor de água e explosão de gerador de vapor

- EXPLOSAO ACIDENTAL

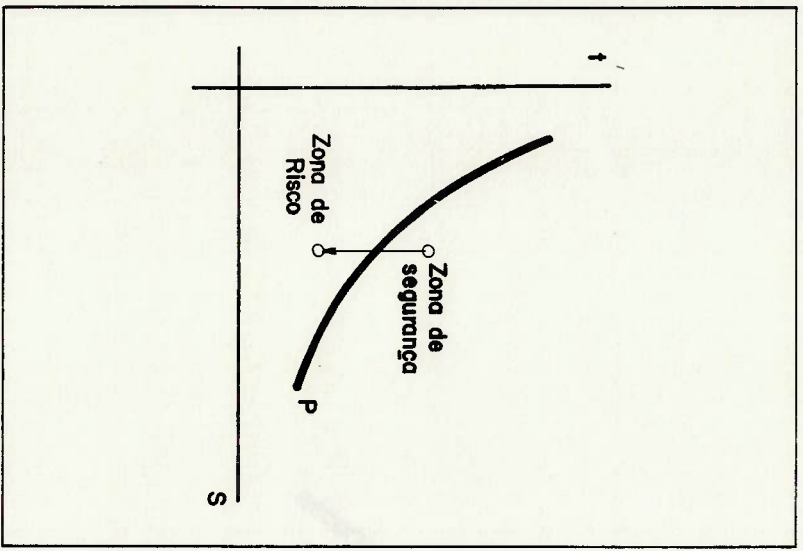
Data	Local	Fonte	Vitimas	Danos materiais
Fev 1982	Quartel Militar IV Pol. nitroglicerina Cacoal, RD. Brasil	(12 kg)	Fatais: 1 civil e 10 militares Feridos: 1	Destruição de um edifício da prefeitura municipal (cerca de 600 metros quadrados)

- DEMOLICAO POR IMPLOSAÇÃO

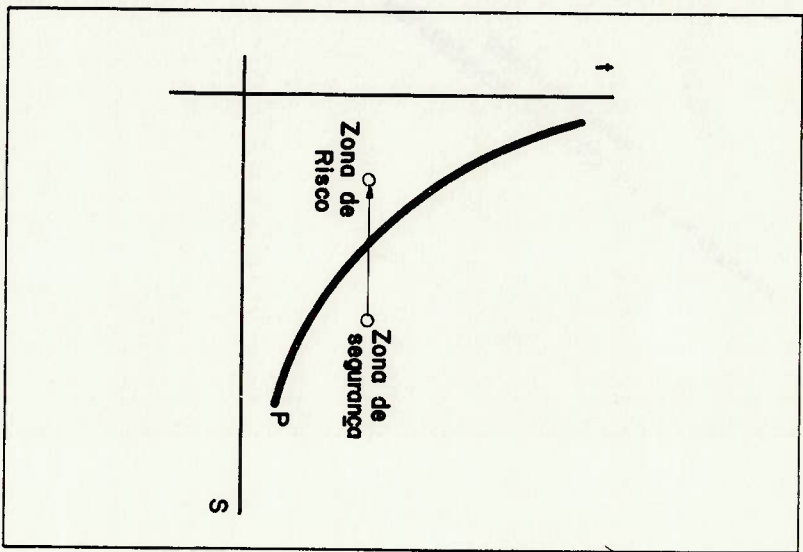
Data	Local	Obras	Dimensão	Área construída (m ²)	Massa de Nitroglicerina (kg)
1988	Sao Paulo, SP. Brasil	Fabrica Natarazzo	15 edificações	24.250	500

FIGURAS

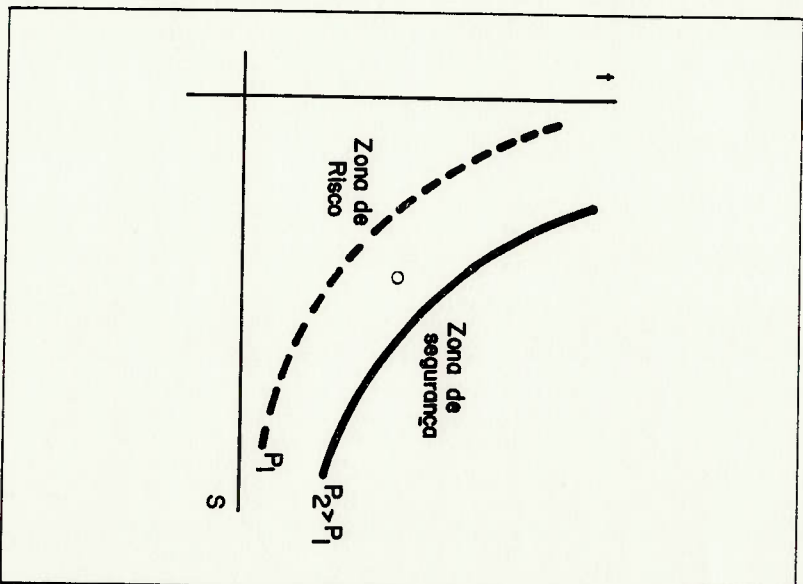




A. Diminuição da espessura.



B. Diminuição da resistência.

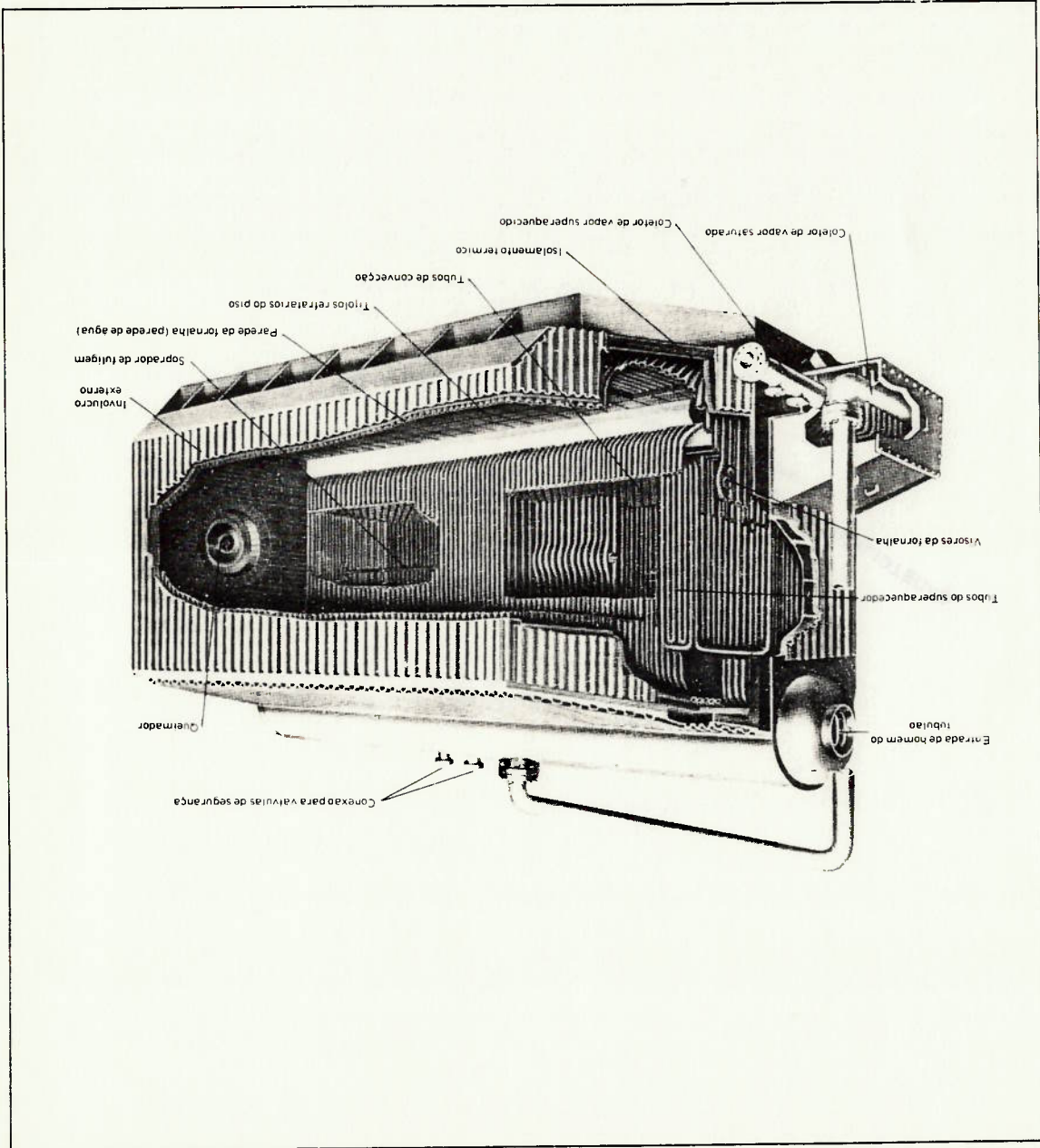


C. Elevação da pressão.

Figura 1. Causas fundamentais de "BLEVES"

Origem: CBC - Companhia Brasileira de Caldeiras

Figura 2a. Caldeira aquotubular (compacta)



- 1: Pré-aquecedor de ar
- 2: Superaquecedor
- 3: Desuperaquecedor
- 4: Queimadores
- 5: Ventilador

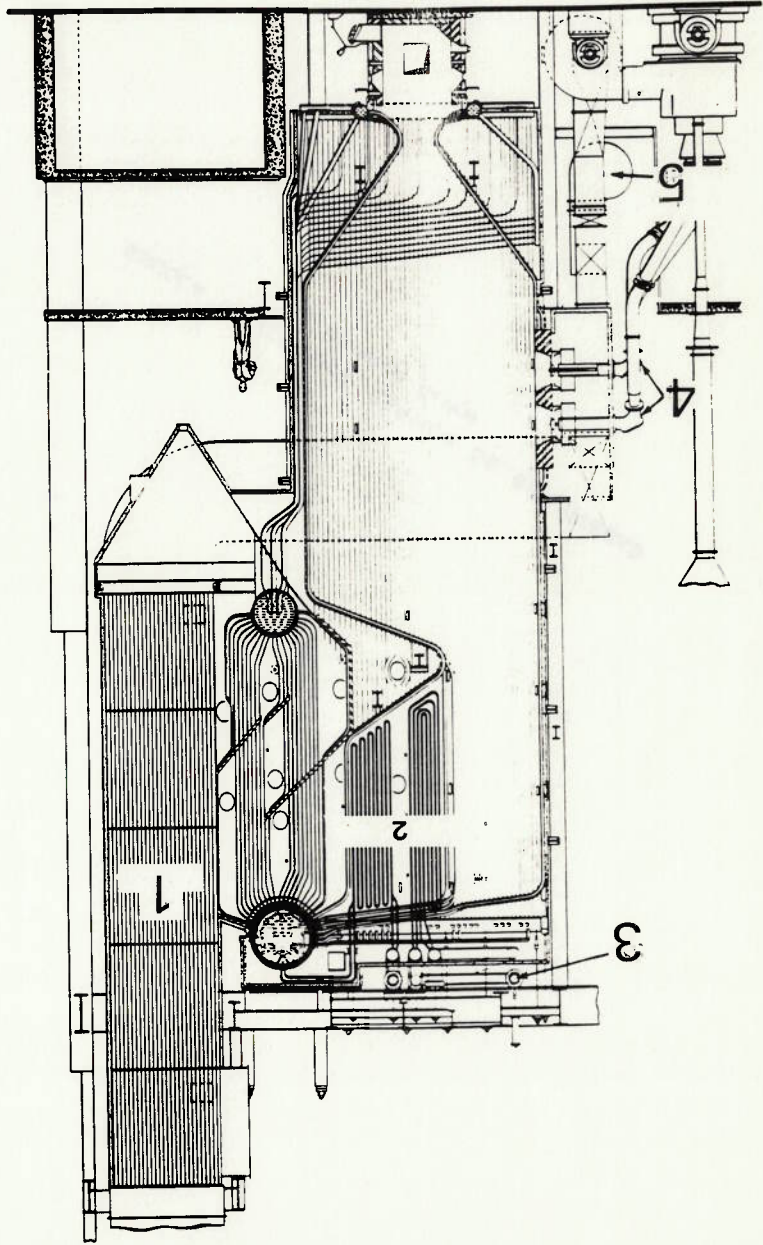
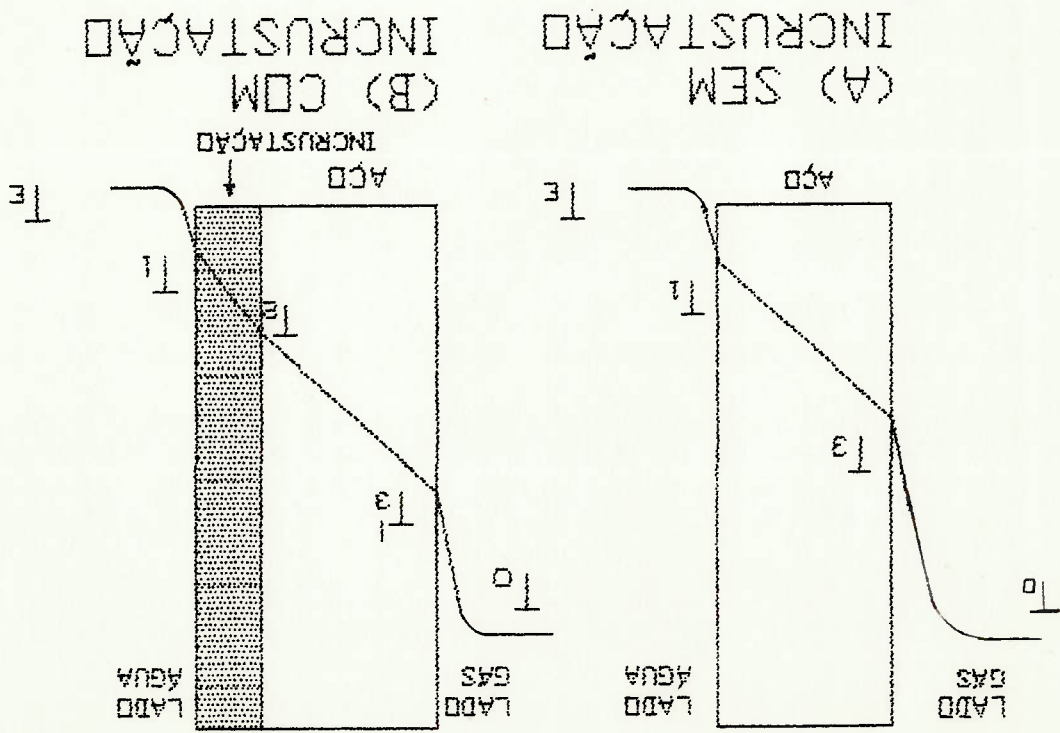


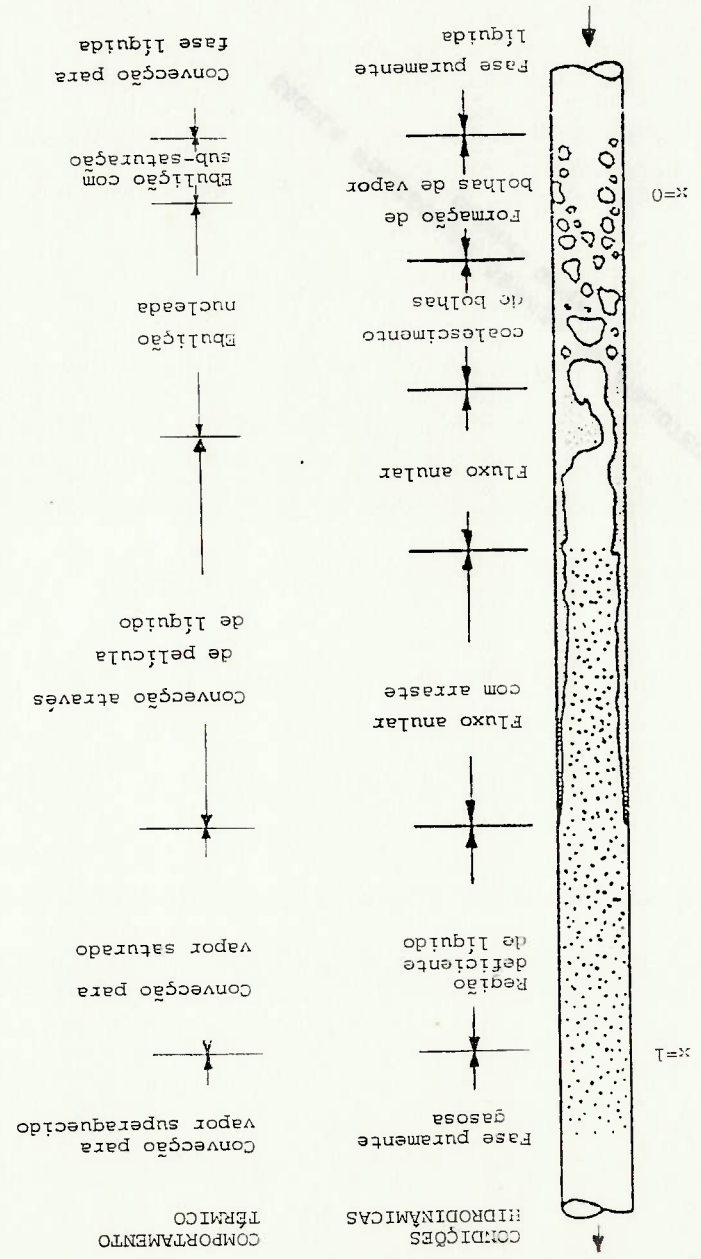
Figura 2.b. Caldeira Aquotubular montada em campo.
 Pressão de operação: 6,4 MPa.
 (origem: Babcock & Wilcox³⁷)

Figura 3. Gradientes de temperatura



(Segundo Collier³⁹)

Figura 4. Condições hidrodinâmicas e comportamento térmico de fluxo de água que se vaporiza ao ascender tubo vertical uniformemente aquecido.

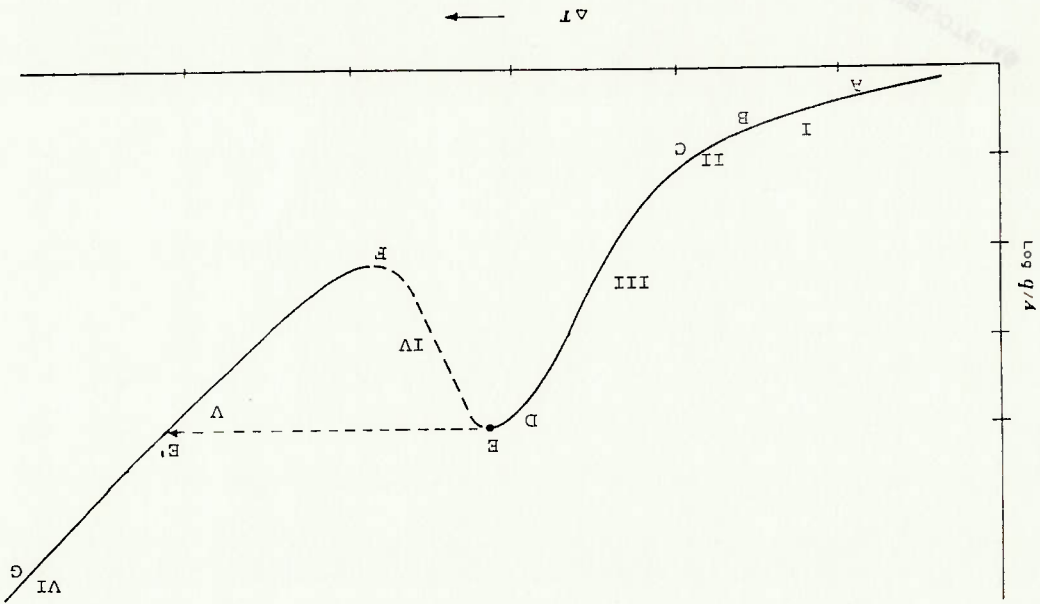


- I (A-B): convecção natural, com transferência de calor para fase líquida
- II (B-C): regime de transição, com a formação de bolhas isoladas
- III (C-E): ebulição nucleada, plenamente desenvolvida
- D-E: fluxo de calor crítico
- D: ponto *DNB*
- IV (E-F): Ebulição em película parcial instável
- V e VI (F-G): ebulição em película estável

permitted visualiser as regimes:

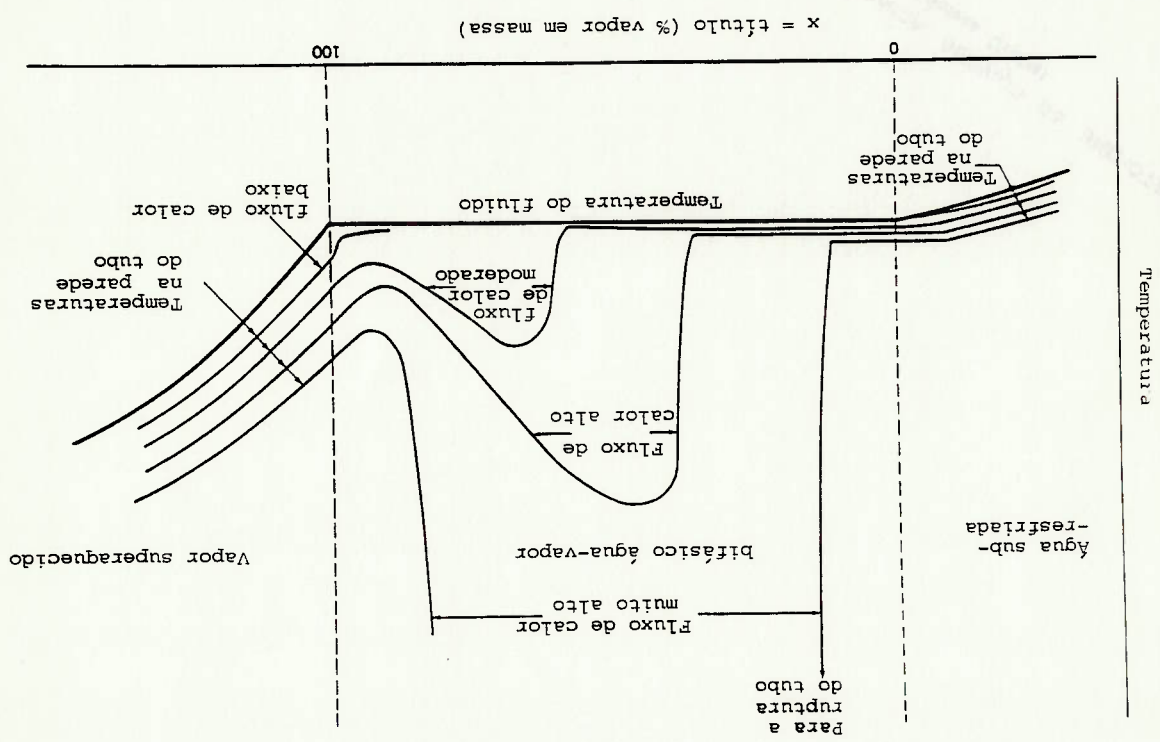
(em escala logarítmica; densidade de fluxo de calor nas ordenadas e diferença entre a temperatura da parede interna do tubo e a temperatura de saturação nas abscissas)

Figura 5: Curva de Ebulição, cf. Collier³⁹.



(cf. Collier³⁹)

Figura 6: Temperatura da parede interna do tubo (da Figura 4), em função do título do vapor e da densidade de fluxo de calor.



VELOCIDADE MÀSSICA

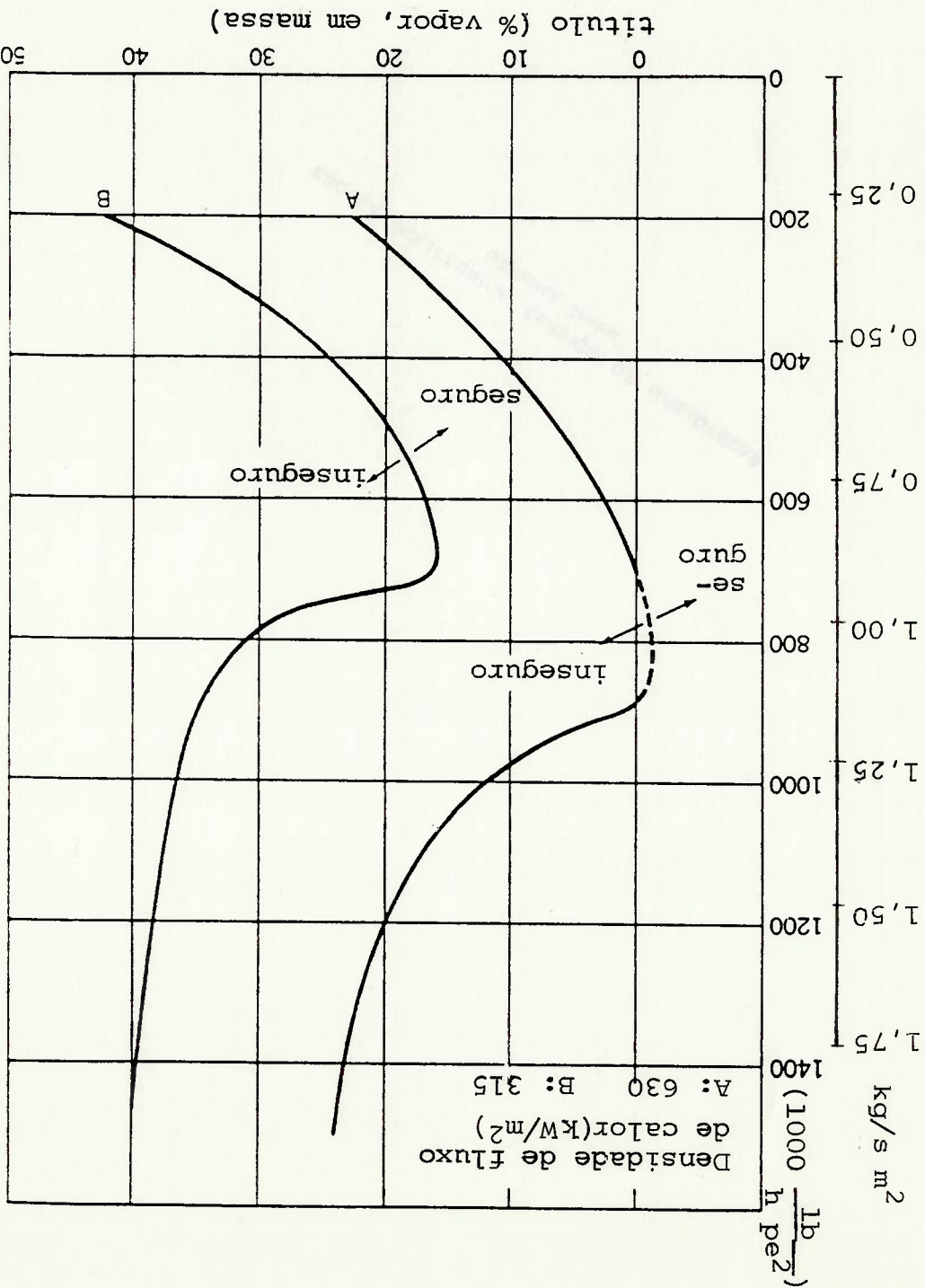


Figura 7. Velocidade mÀssica contra tÌtulo de vapor saturado, a pressÙo de 18,6 MPa, definindo regÌes de segurança e de risco para dois valores de densidade de fluxo de calor: 630 kW/m² (A) e 315 kW/m² (B). (CF. McLean³⁵)

Figura 8. Faixas de temperatura para chapas de aço. (Dados da CBC)

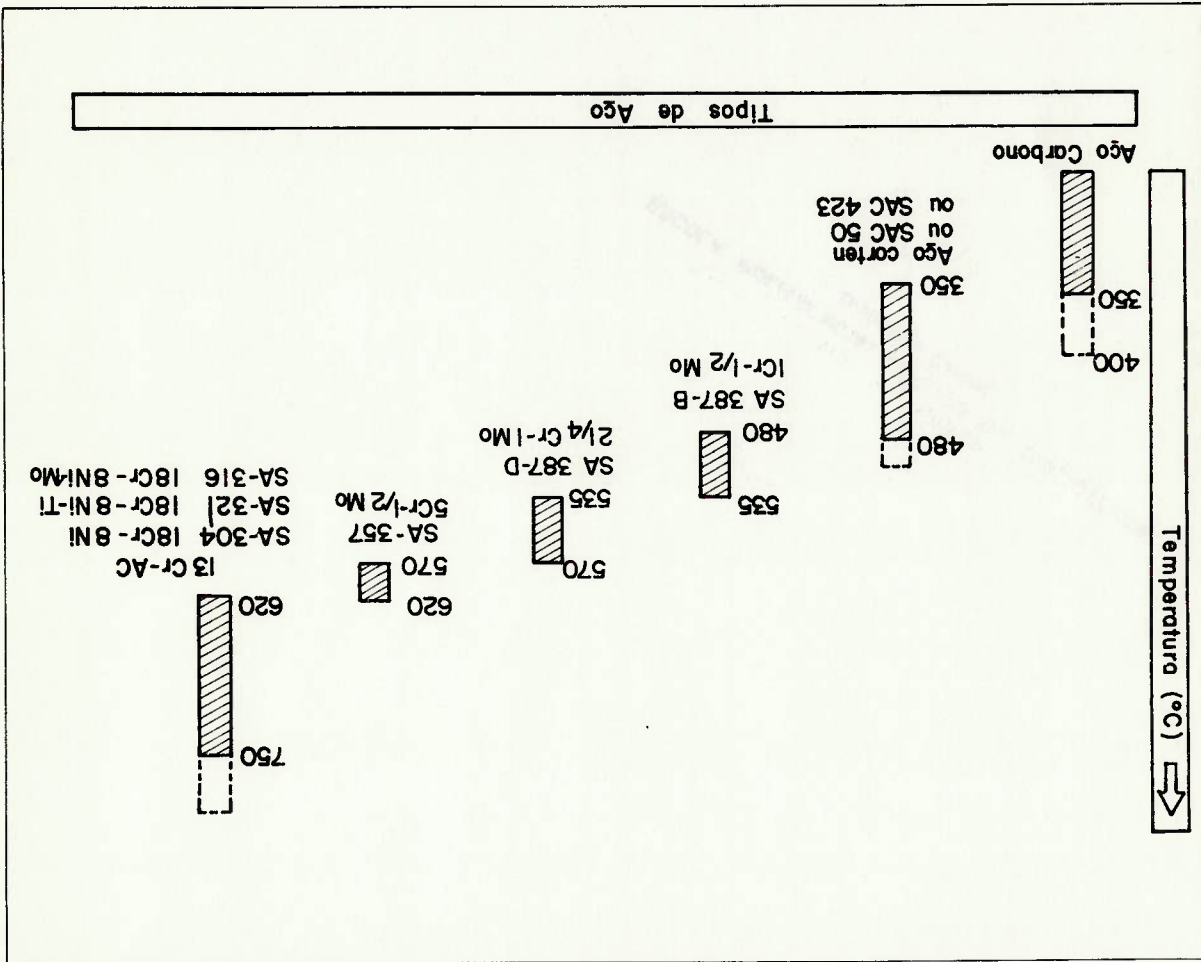


Figura 9. Faixas de temperatura e tensões admissíveis propostas pela ASME (American Society of Mechanical Engineers) 1. Gráfico cf. Telle36.

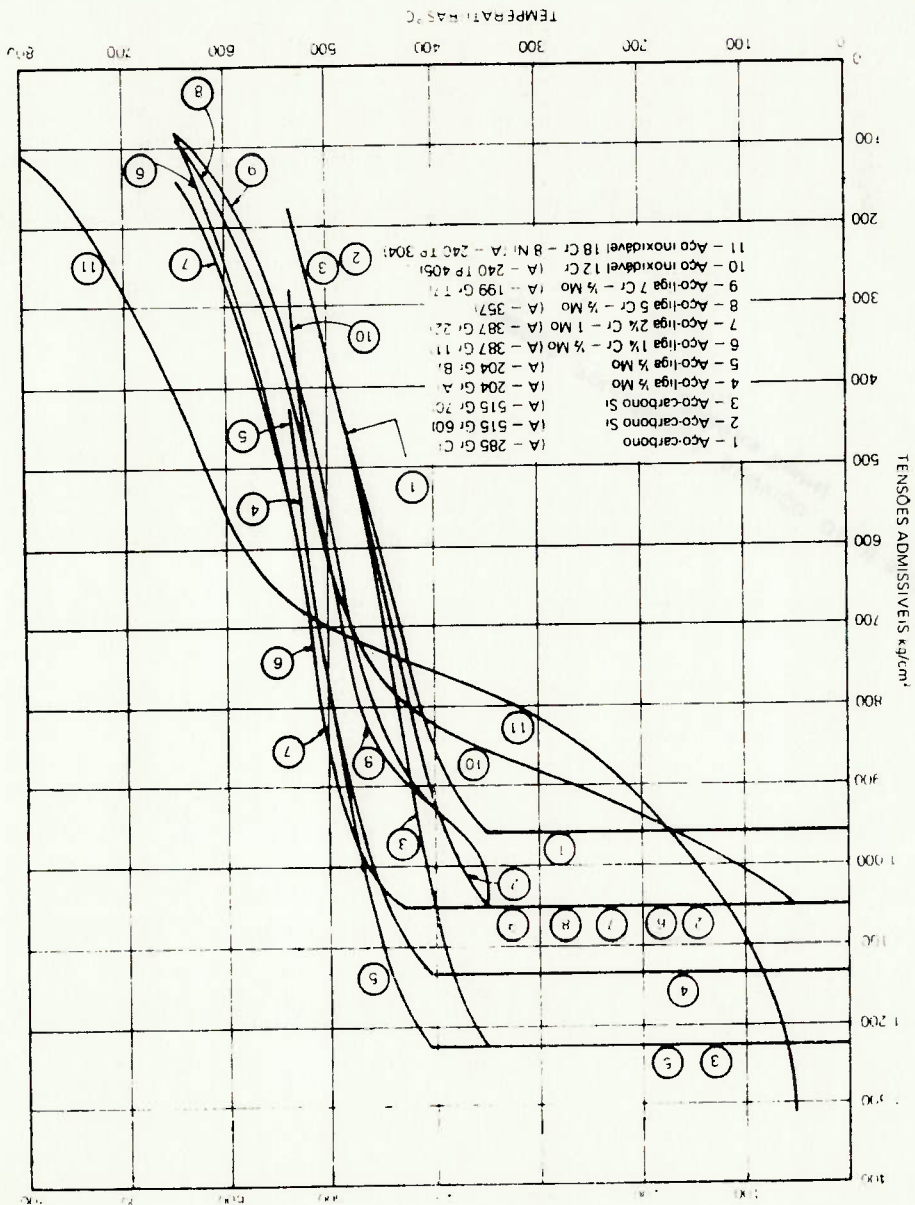


Figura 10 Curva típica de fluência, apresentando os três estágios do processo: " Fluência Primária " Fluência Secundária " Fluência Terciária

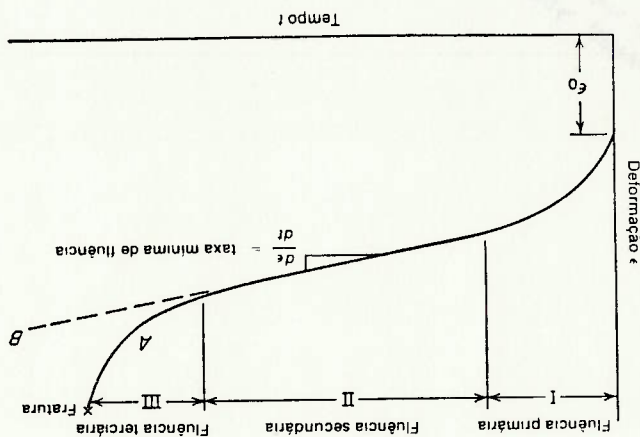


Figura 11. Curvas de fluência, segundo Dyson e McLean 23
(a): soluções sólidas
(b): material endurecido por precipitação de partículas de segunda fase

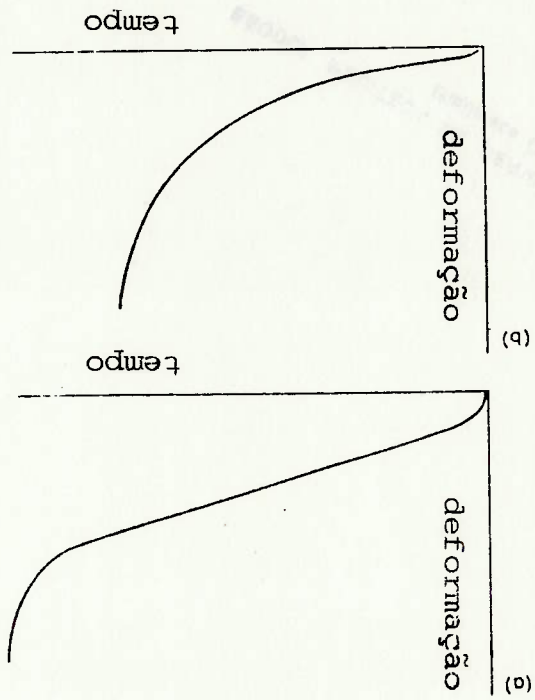


Figura 12. Curva de fluência, segundo Dyson e McLean²³, mostrando parâmetros operacionais que definem a forma da curva.

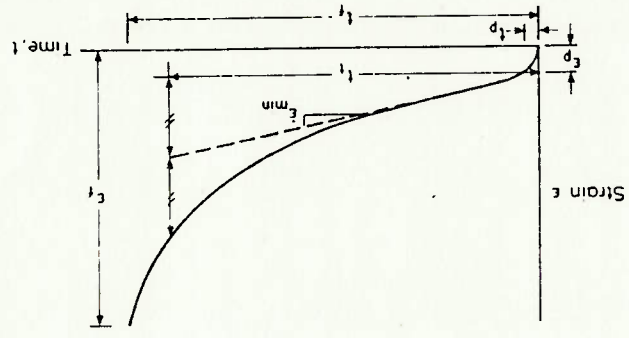


Figura 13. Variação do parâmetro λ_1 com a tensão, segundo A. Plumtree e G. Sheri²⁵

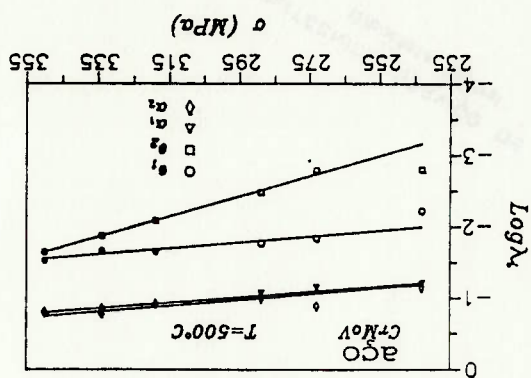


Figura 14. Curvas de Fluência descritas e dados experimentais para o 3º estágio, segundo Plumtree e Shen 25

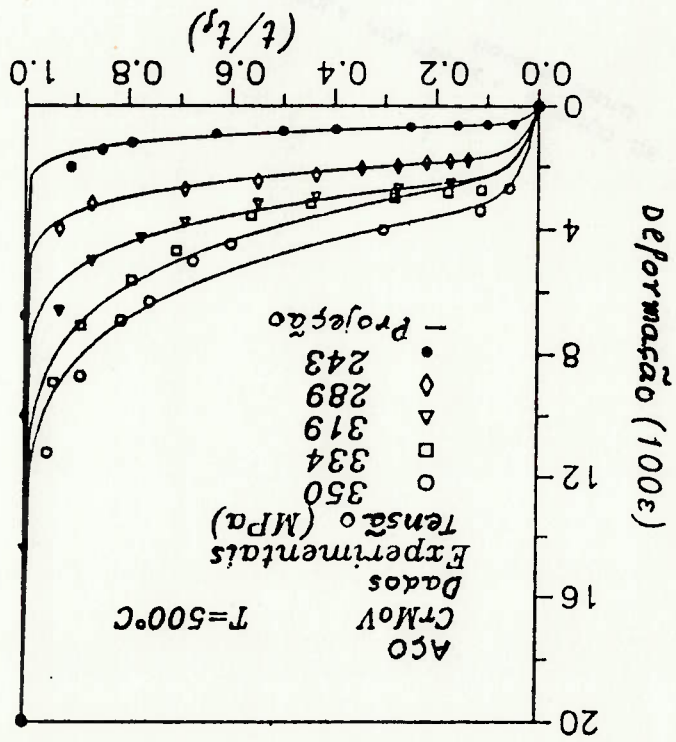


Figura 15. Correlação entre a tensão aplicada e o tempo necessário para a ocorrência da ruptura por fluência, considerando o efeito da temperatura (cf. Dieter39 e Papaleo43)

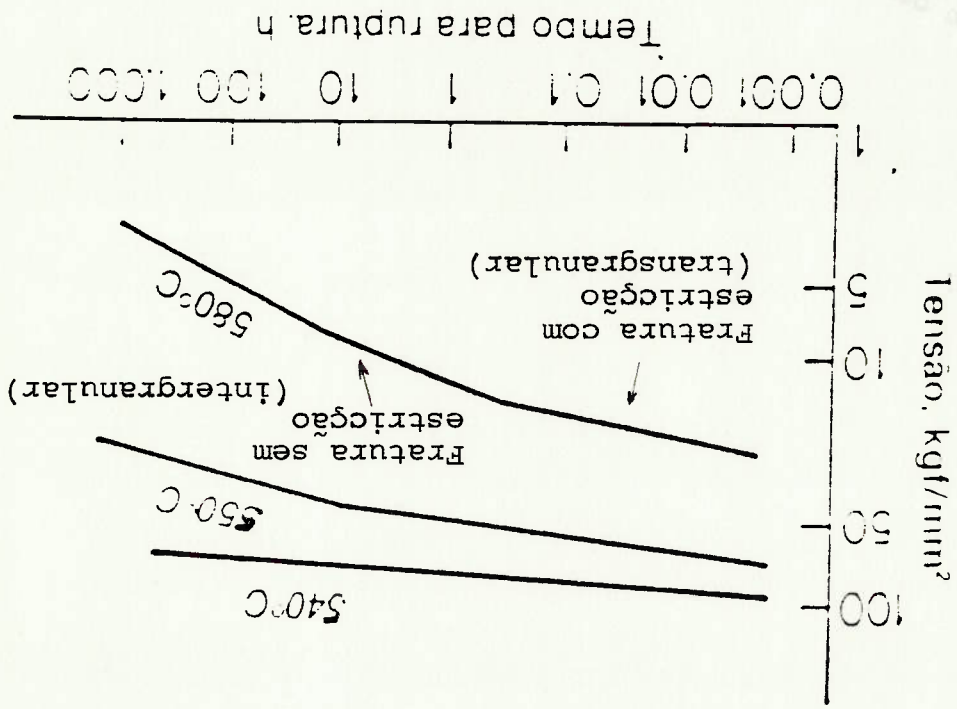
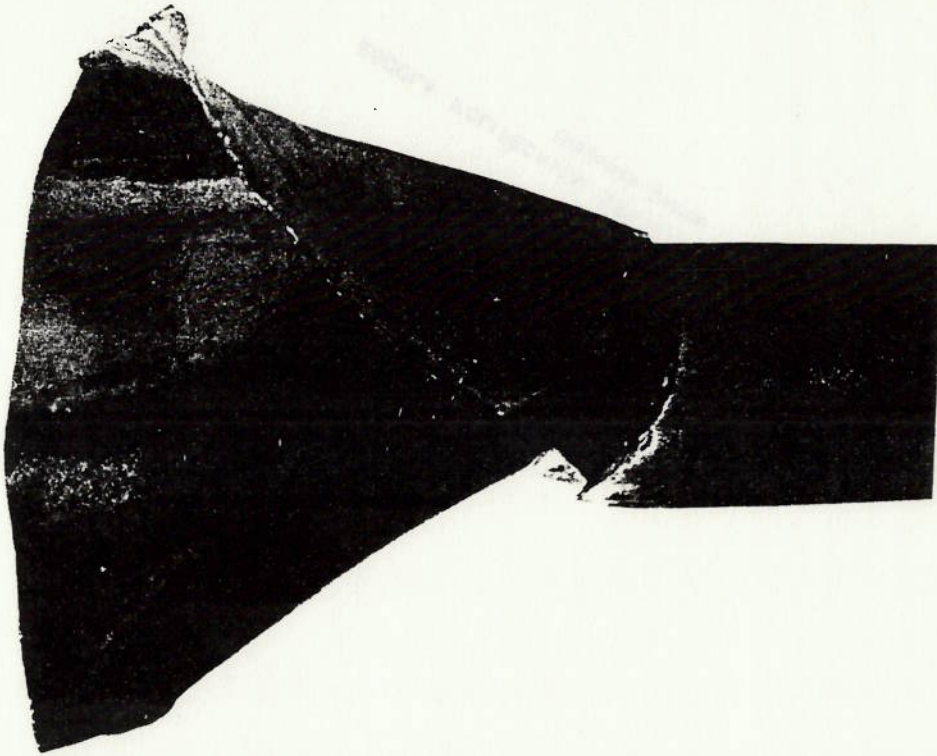


Figura 16. Fratura com acentuada estrição, ocorrida em tubo de caldeira, decorrente de ruptura por fluência, causada pela falta de água (cf. French⁵)



- a) Início de pescocamento no ponto de instabilidade plástica, onde o aumento da resistência devido ao encruamento cai para compensar a diminuição da área da seção reta transversal do corpo de prova, introduzindo um estado triaxial de tensões nessa região;
- b) Uma componente hidrostática da tensão atua no centro da região do pescoco ao longo do corpo de prova. Nucleam-se muitas cavidades nessa região; com a continuação da deformação, as cavidades, ou *dimples*, crescem e coalescem, formando uma trinca na região central;
- d) A trinca da região central cresce num plano perpendicular ao eixo do corpo de prova até se aproximar da superfície do material. Então, ela continua a se propagar localizadamente em planos cisalhantes orientados a 45° com o eixo longitudinal para formar a parte do "cone" da fratura;
- e) Separação das partes divididas pela fratura e identificação das regiões de cisalhamento e de ziguezague formada pelo alongamento das cavidades e do material entre elas, com aspecto fibroso.

Figura 17. Mecanismo de fraturas do tipo "taça e cone" (cf. Dieter29)

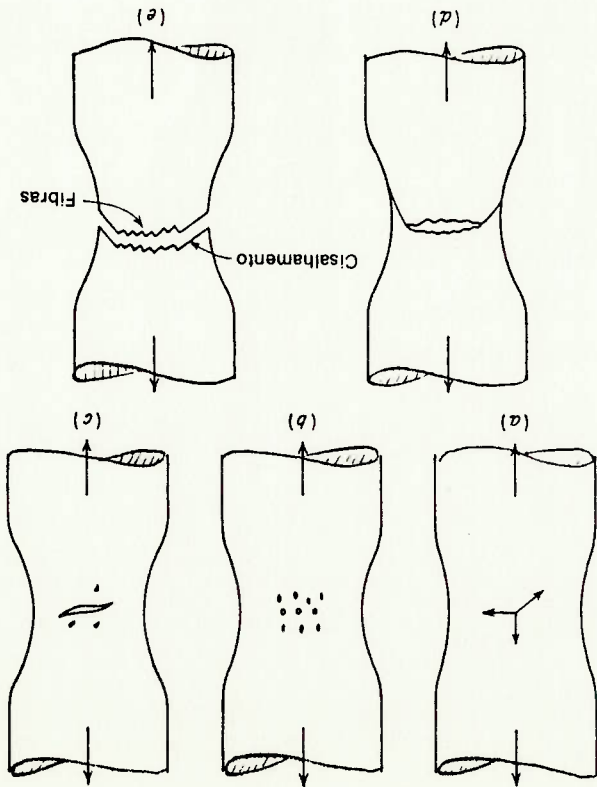


Figura 18. Curvas de Fluência, em diferentes temperaturas, para um material submetido a uma determinada tensão.

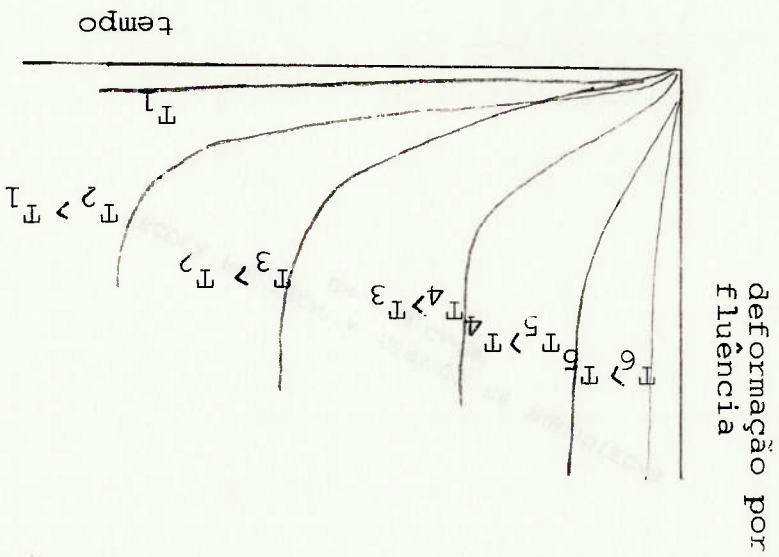


Figura 19. Fratura ocorrida em tubo de caldeira, devido a presença de incrustação (cf. French⁵)
a e b : aspectos gerais
c : microestrutura, evidenciando as trincas intergranulares, desenvolvidas por fluência

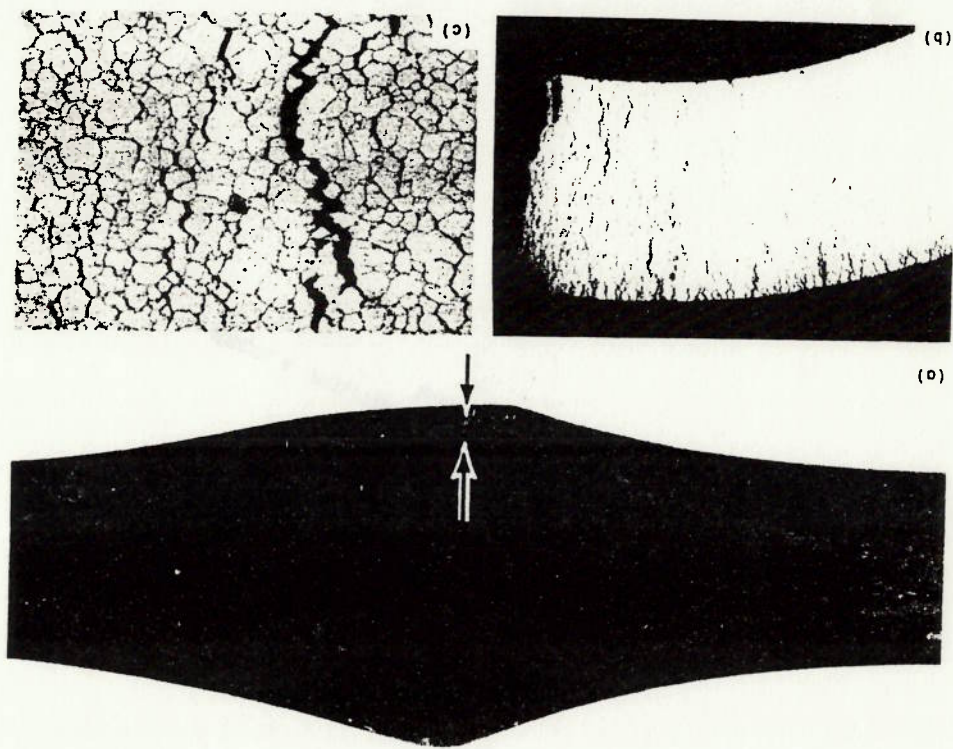


Figura 20. Diferentes aspectos, possíveis de ser encontrados para fraturas com pequena (ou sem estricção), em tubos expostos a superaquecimentos de menor severidade, causados por circulação de água deficiente.

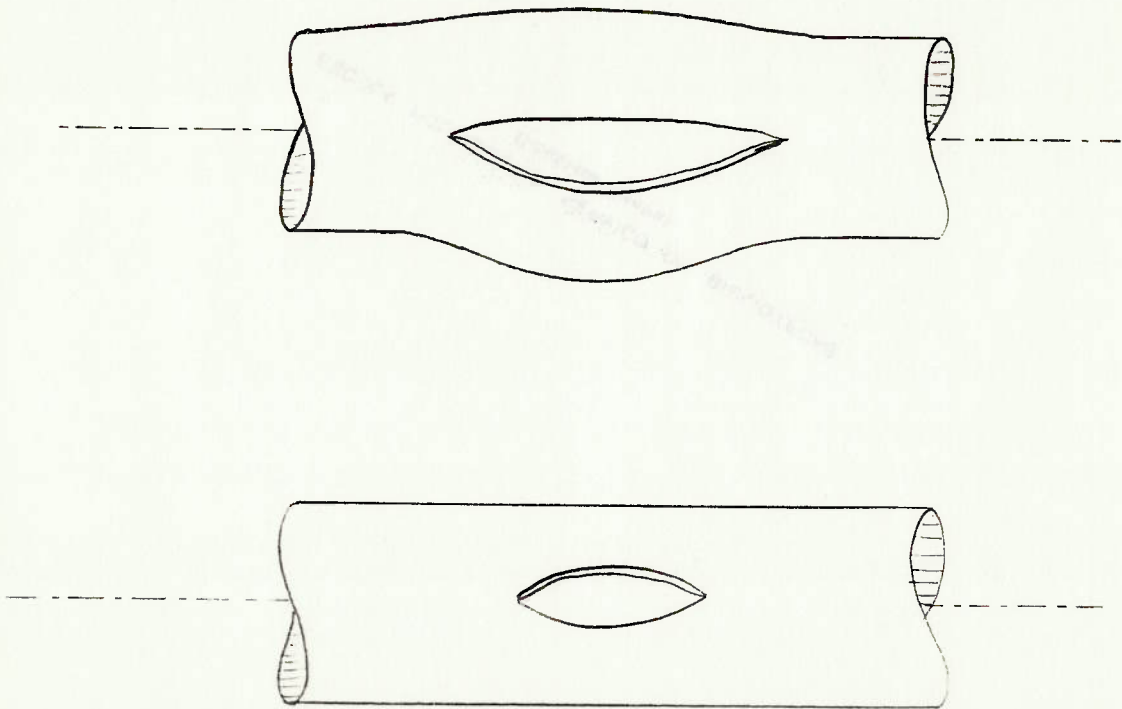


Figura 21. Tubos de caldeiras deformados devido ao calor excessivo. O tubo central, assinalado, apresenta uma "laranja" já rompida e o tubo à esquerda, outra deformação, também por flutuação, em estágio de evolução, rumo à ruptura. (cf. IBB³⁴)

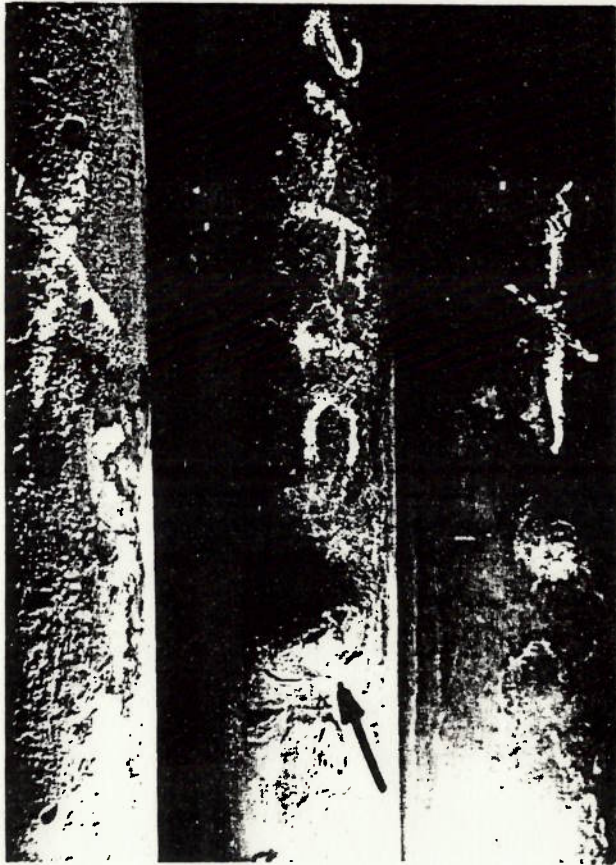


Figura 22. Mecanismo de nucleação por escorregamento dos contornos de grão de uma trinca intergranular, no encontro de três grãos. (cf. McLean³⁵).

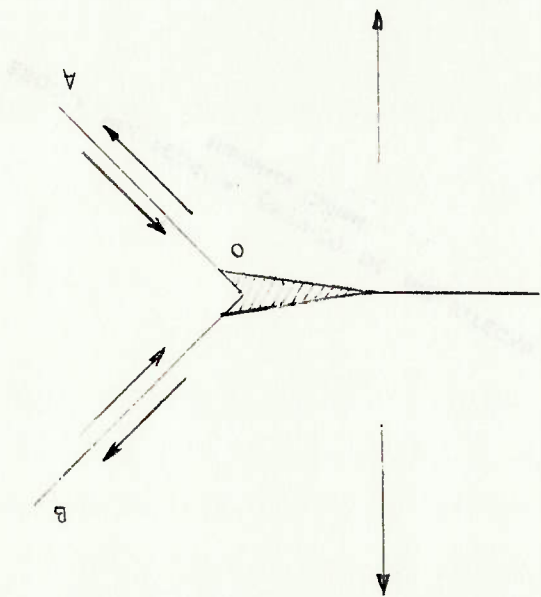


Figura 23. Representação da formação de cavidade no resalto ("jog") de discordância no contorno de grão. (cf. McLean³⁵)

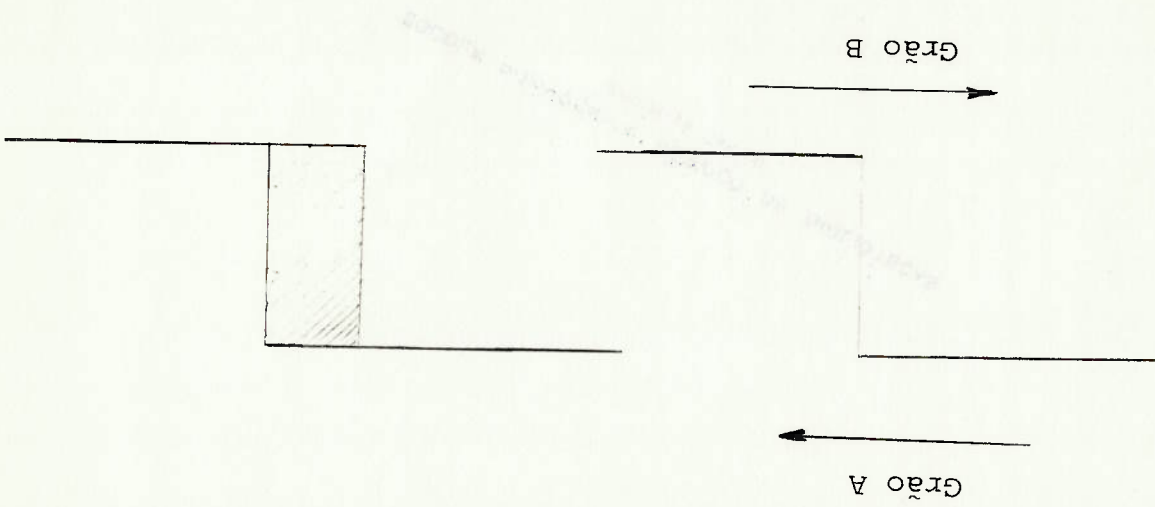


Figura 24. Micrografia de tubos de caldeira acidentada (French⁵).
a. Especime adjacente à ruptura
b. Parte do mesmo tubo, a 250 mm da ruptura
c. Parte de tubo não rompido, situado nas proximidades

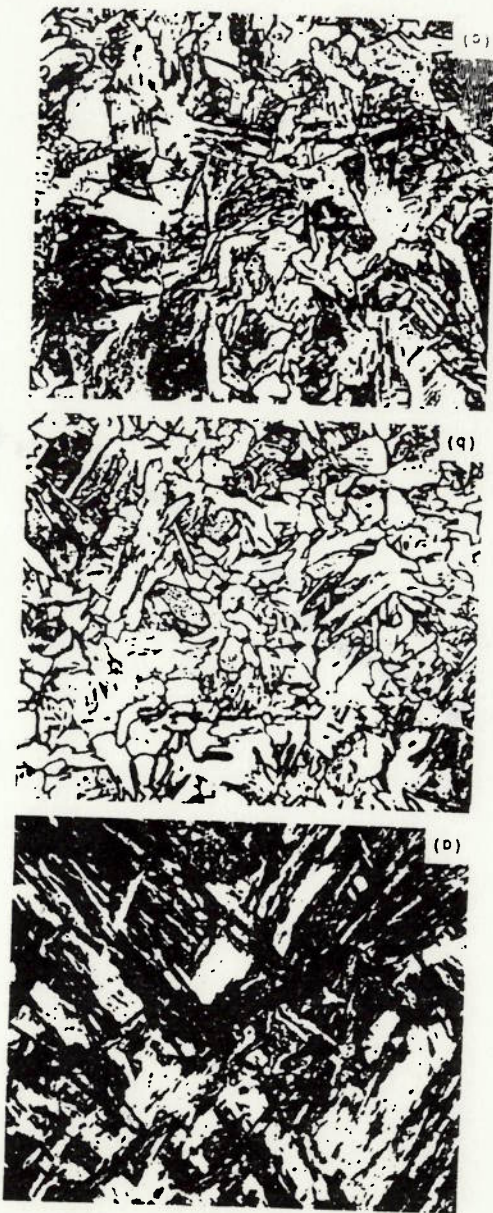


Figura 25. Deformação angular (γ) em cristal unitário submetido a tensão de cisalhamento (τ).

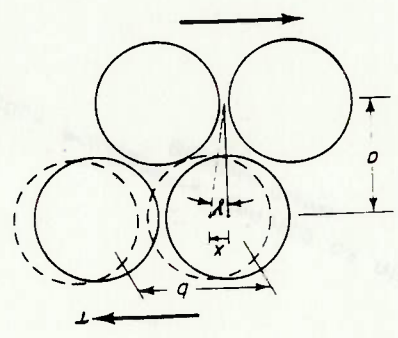


Figura 26. Representação, em uma estrutura cristalina de NaCl, das discordâncias e do Vetor de Burgers. (cf. Guy⁴²).

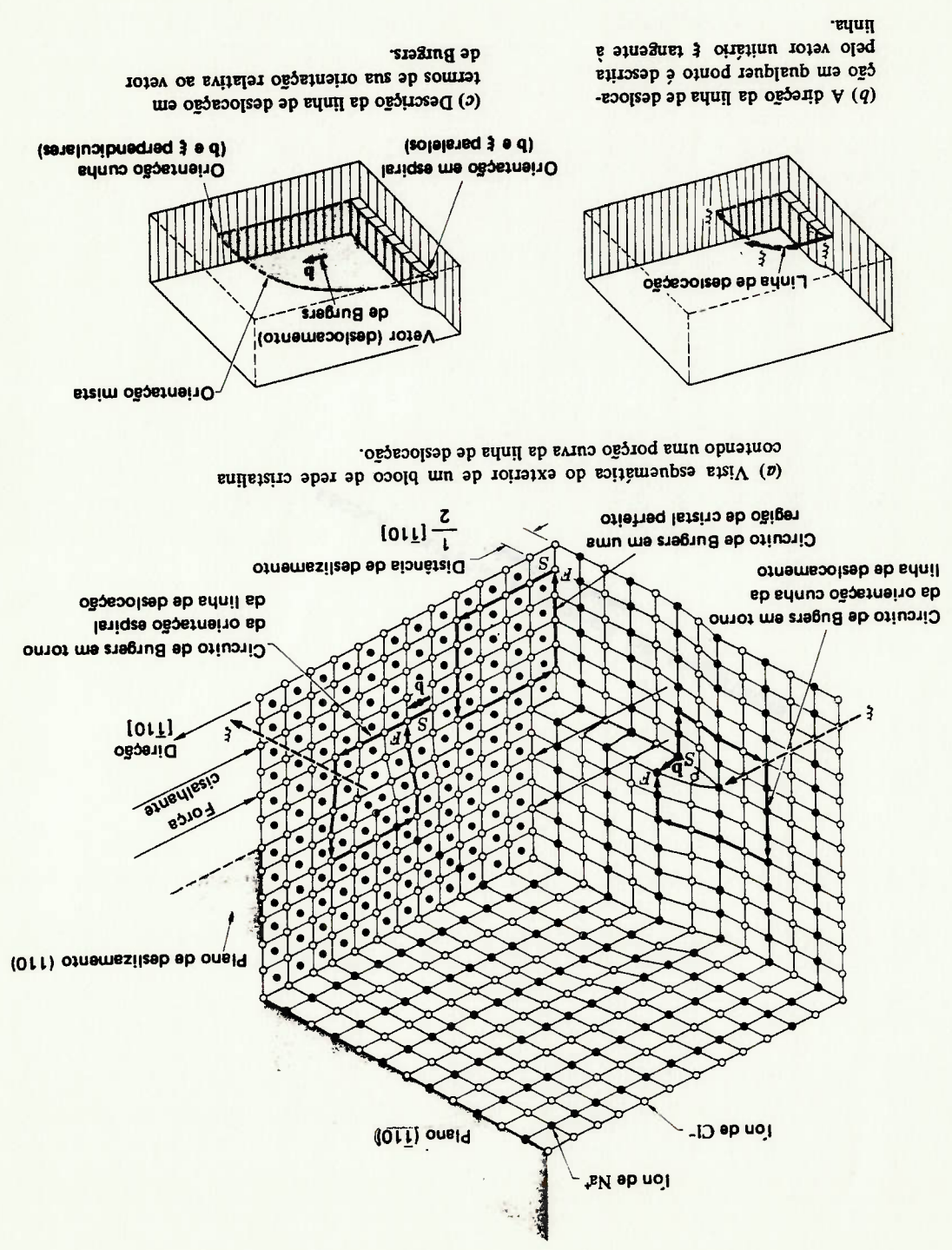


Figura 27. Mapas de fraturas, segundo Ashby:
 - definindo campos de predominância de mecanismos para o níquel (a)
 - com contornos de taxas de deformação constantes, para: o níquel (b) e o tungstênio (c)

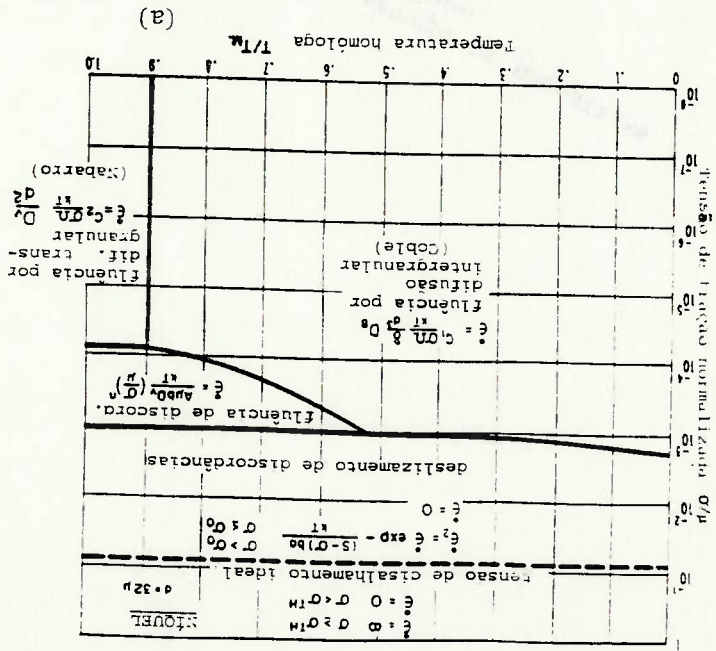
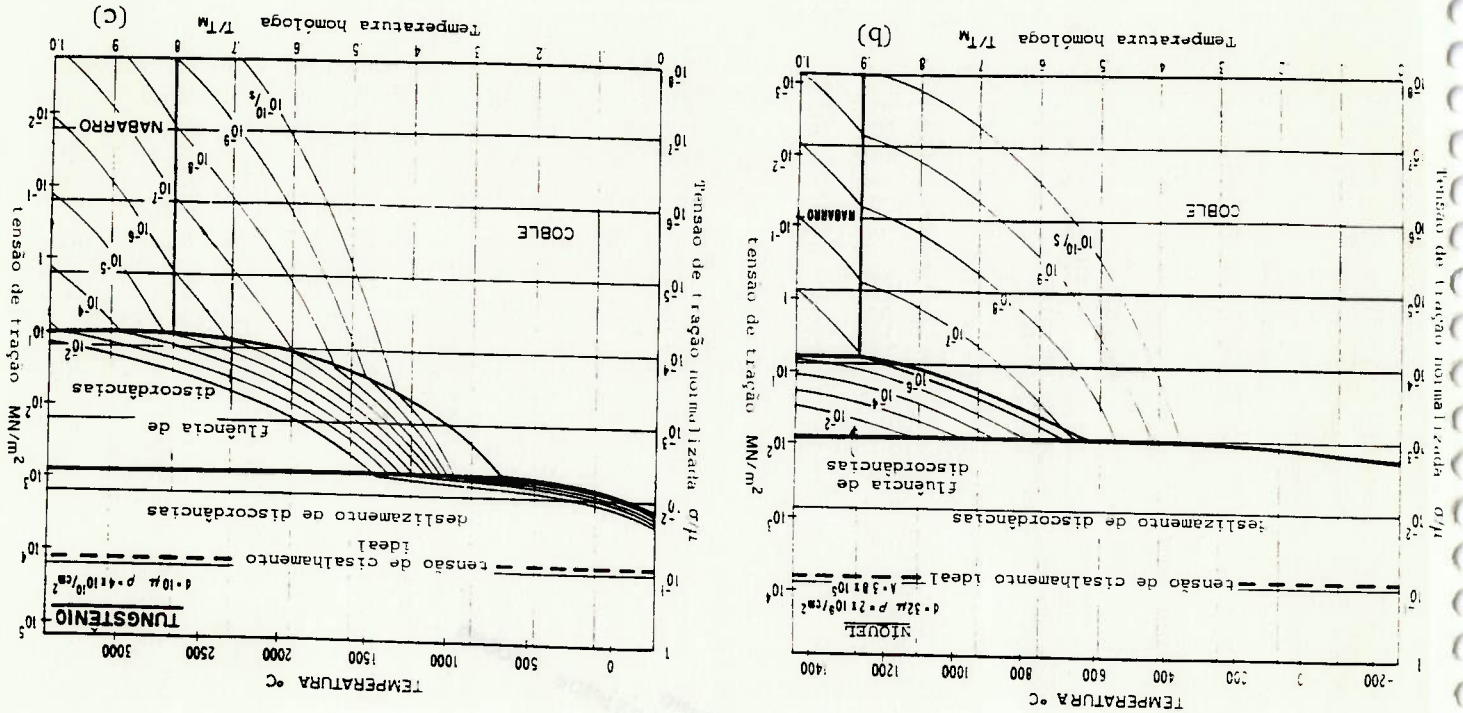


Figura 28. Mapas de fraturas, segundo Ashby, mostrando:
 - a semelhança entre materiais de mesma estrutura (cúbica de face centrada): alumínio (a), níquel (b) e chumbo (c).
 - a diferença de comportamento do tungstênio (d), de estrutura cúbica de corpo centrado.

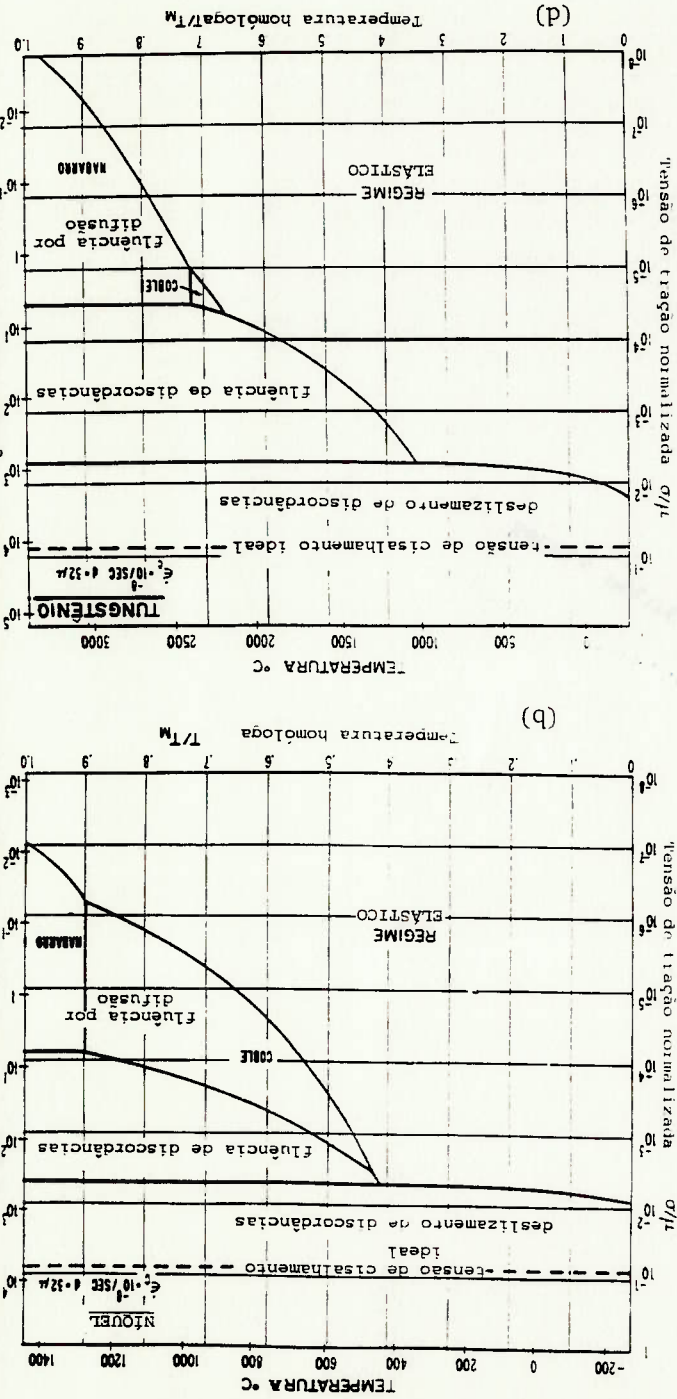
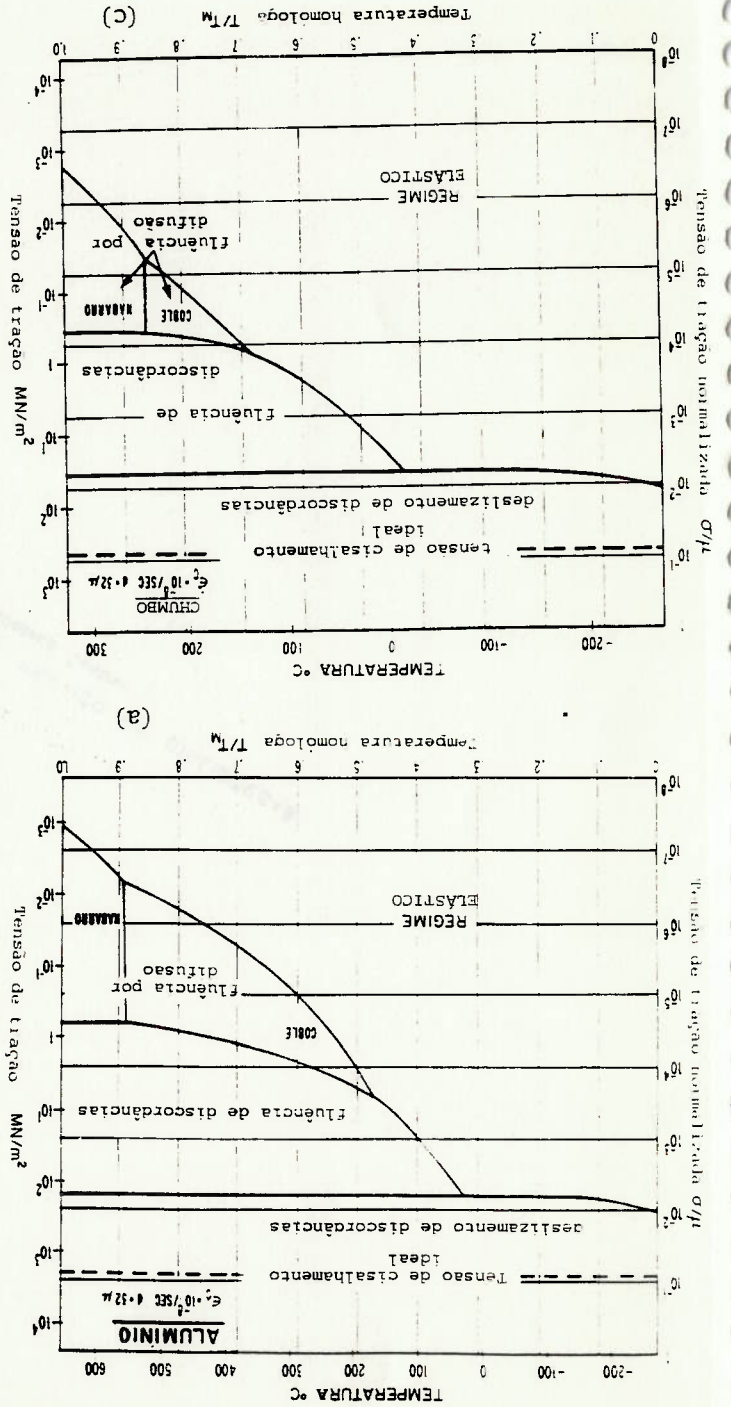
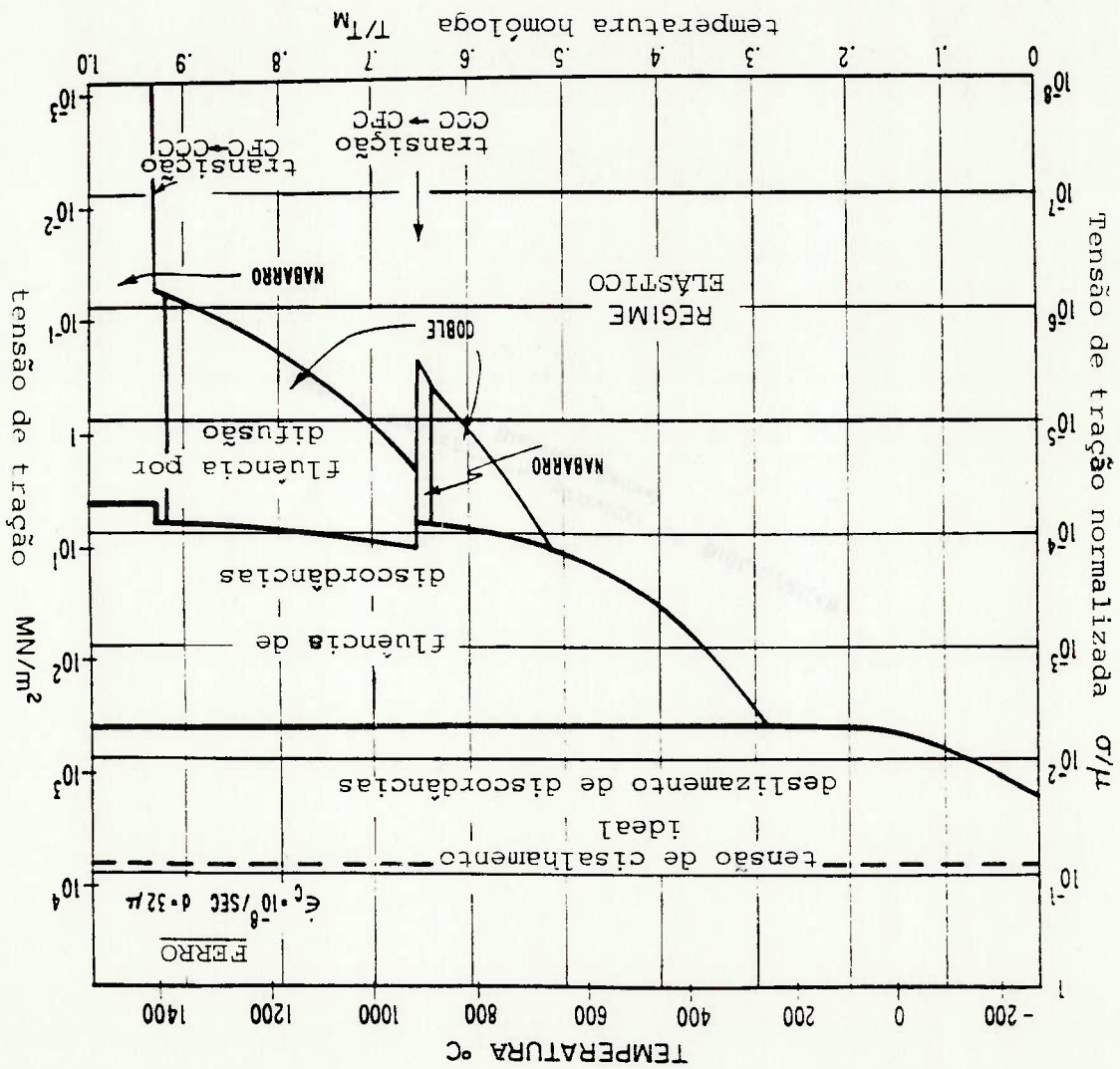


Figura 29. Mapa de fraturas para o ferro, permitindo visualizar seu aumento de resistência à fluência ao se transformar mar da estrutura de corpo centrado, para a de face centrada. (Conforme Ashby⁴¹).



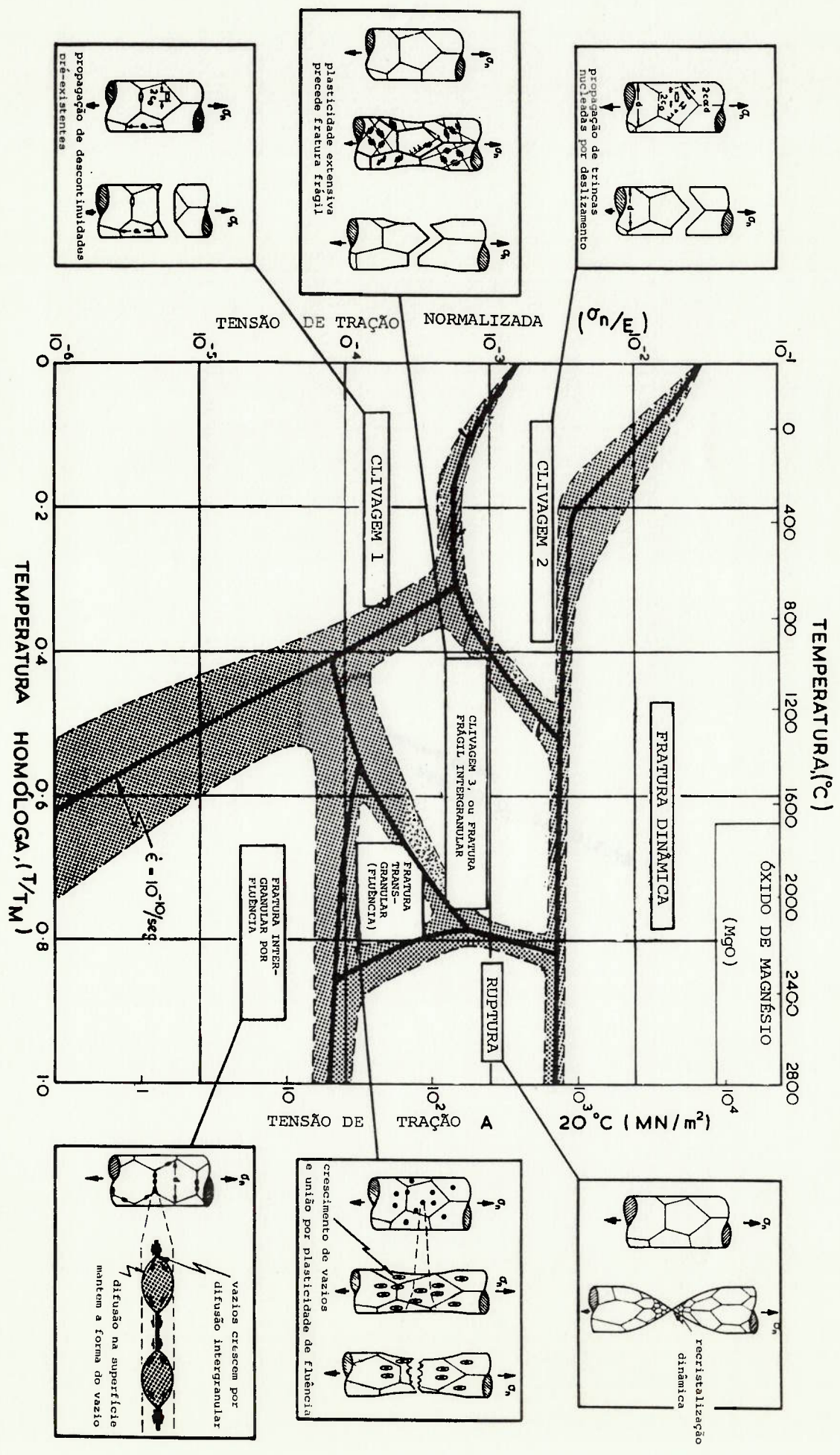


Figura 30. Mapa com a representação dos mecanismos de fratura (cf. Ashby17).

Figura 31. Representação do mecanismo de fratura transgranular por fluência, segundo Ashby¹⁷:

a) esse mecanismo demanda que cavidades já existam, ou que sejam nucleadas em inclusões, onde há concentração de tensões;

b) as cavidades alongam-se à medida em que o material é estendido;

c) elas ligam-se, provocando a fratura, quando o comprimento da cavidade torna-se equivalente à distância que as separa.

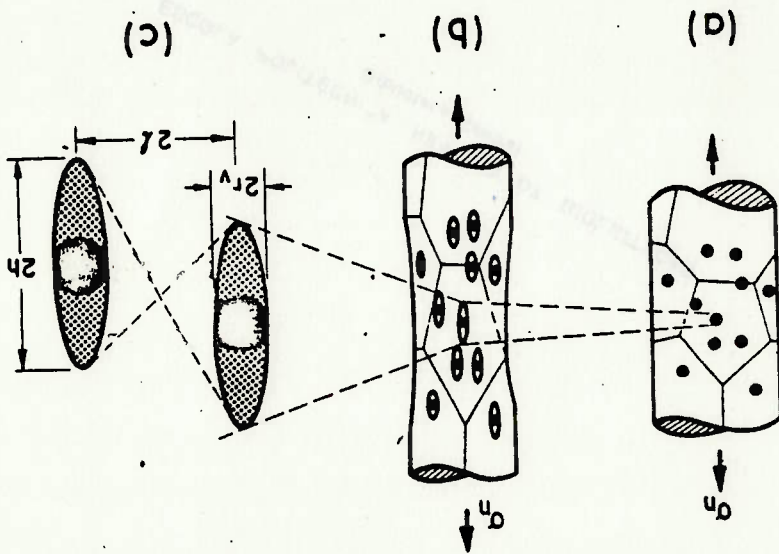
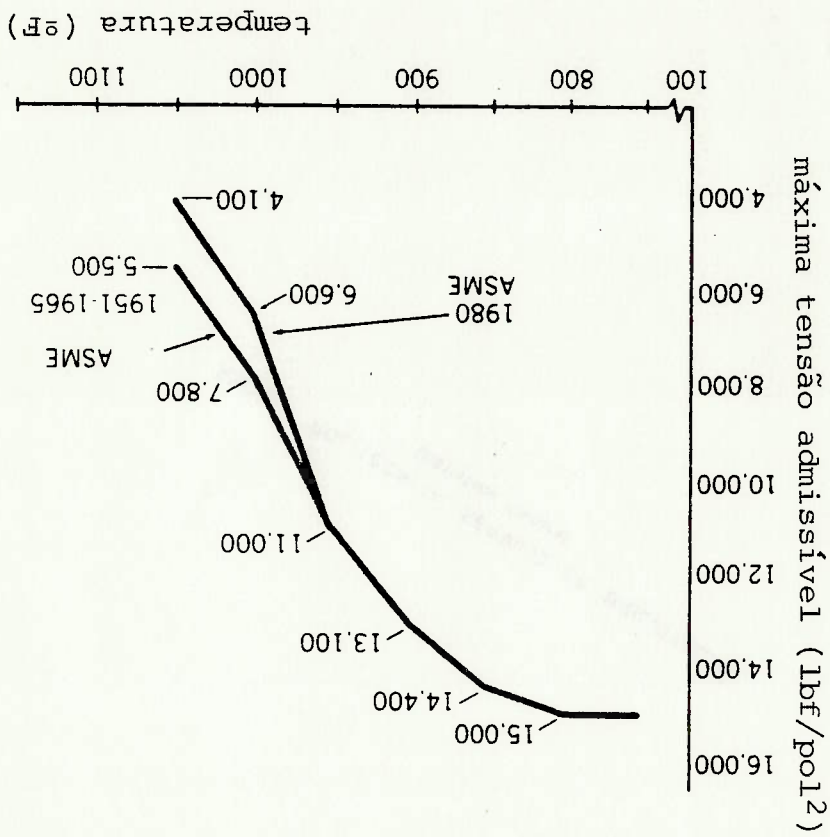
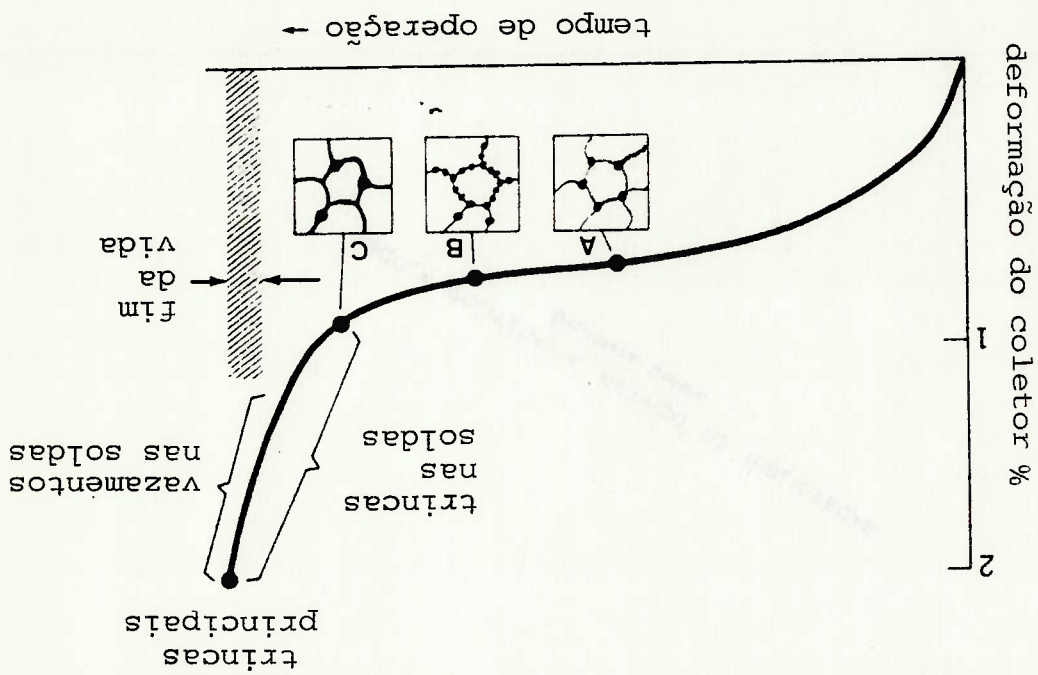


Figura 32. Tensões admissíveis definidas pelo Código ASME para o Coroloy 1 1/4, com a versão antiga (1951-1965) e a versão atual (representada conforme edição de 1980).



A: vazios
B: união de vazios
C: micro-trincas

estágio de fluência correspondente (por Harth¹⁸).
Figura 33. Acumulação de vazios observada em réplica e o



MÉTODO NÃO DESTRUTIVO DE DETECÇÃO

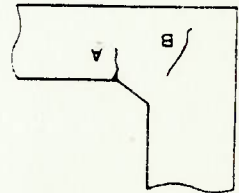
Para trinças superficiais:
 líquido penetrante
 partícula magnética
 ultrassom
 resistência elétrica
 Para trinças internas:
 radiografia
 ultrassom

réplicas
 métodos em experiência:
 ultrassom
 elétrico
 magnético
 radiográfico

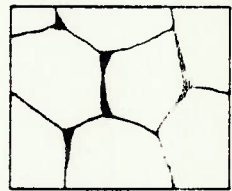
réplicas
 métodos em experiência:
 ultrassom
 elétrico
 magnético
 radiográfico

TRINÇAS

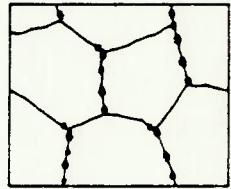
A - Superficiais
 B - Internas



MICROTRINÇAS



MICROVAZIOS



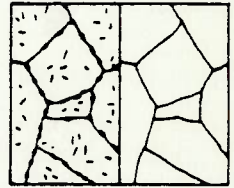
DEGRADAÇÃO ESTRUTURAL

Estereoidização
 de perlita



virgem exposto
 Ago ferrítico

Precipitação
 de fase σ



virgem exposto
 Ago austenítico

exemplos de análises
 de precipitados

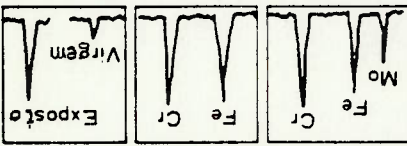


Figura 34. Exames físicos e químicos não destrutivos aplicados por Masuyama e Setoguchi, conforme diferentes tipos de falhas.

TIPO DE FALHA

(por F. Mlynarski²¹)

(b) detalhe dos pinos de medição

Figura 35. (a) Tubulações dotadas de pinos para medição de diâmetros nos pontos 1, 2, 3, 4 e 5.

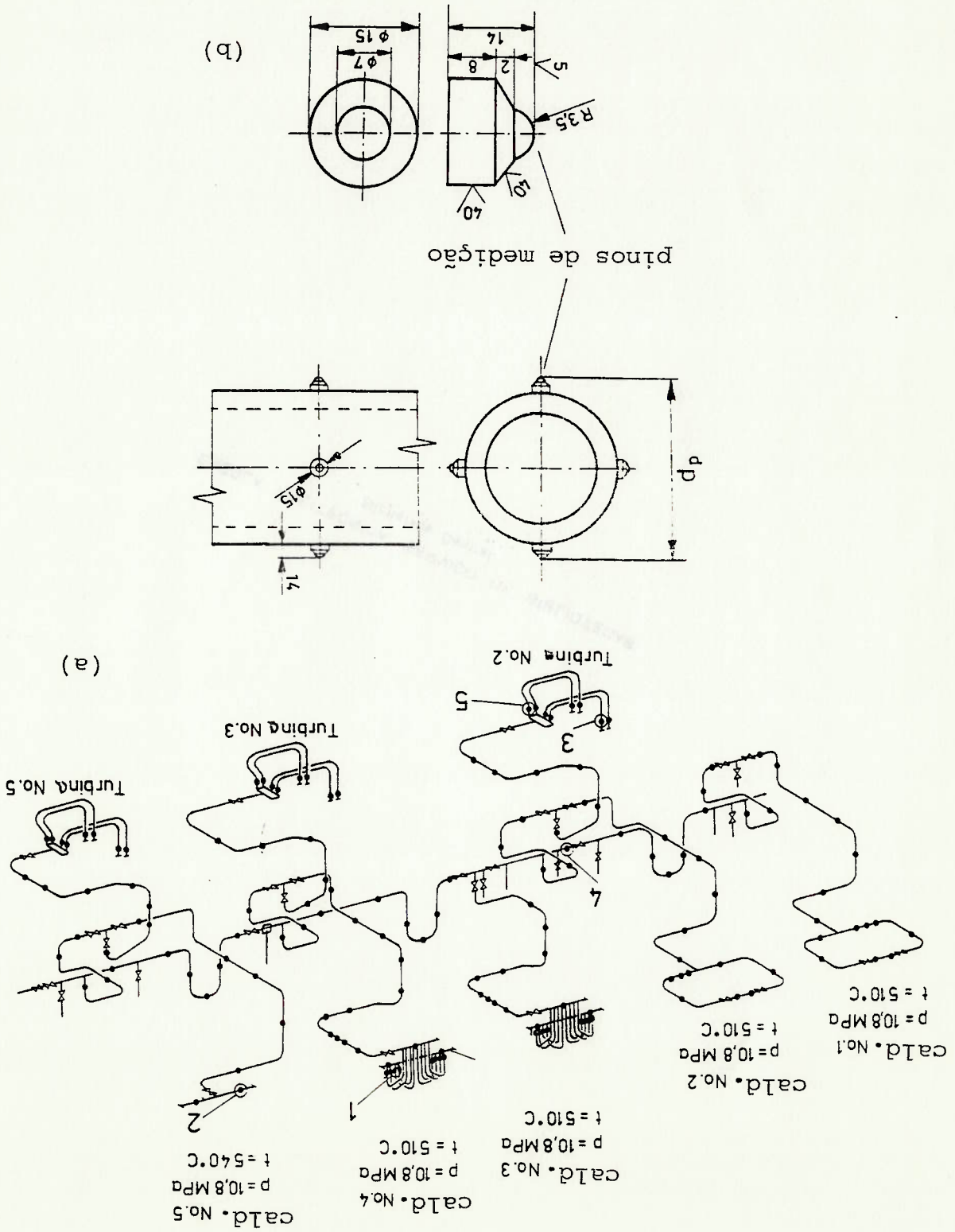


Figura 36. Curvas de fluência obtidas com medições de diâmetros em 5 tubos e método de mínimos quadrados. (Estudo de Mlynarski²¹).

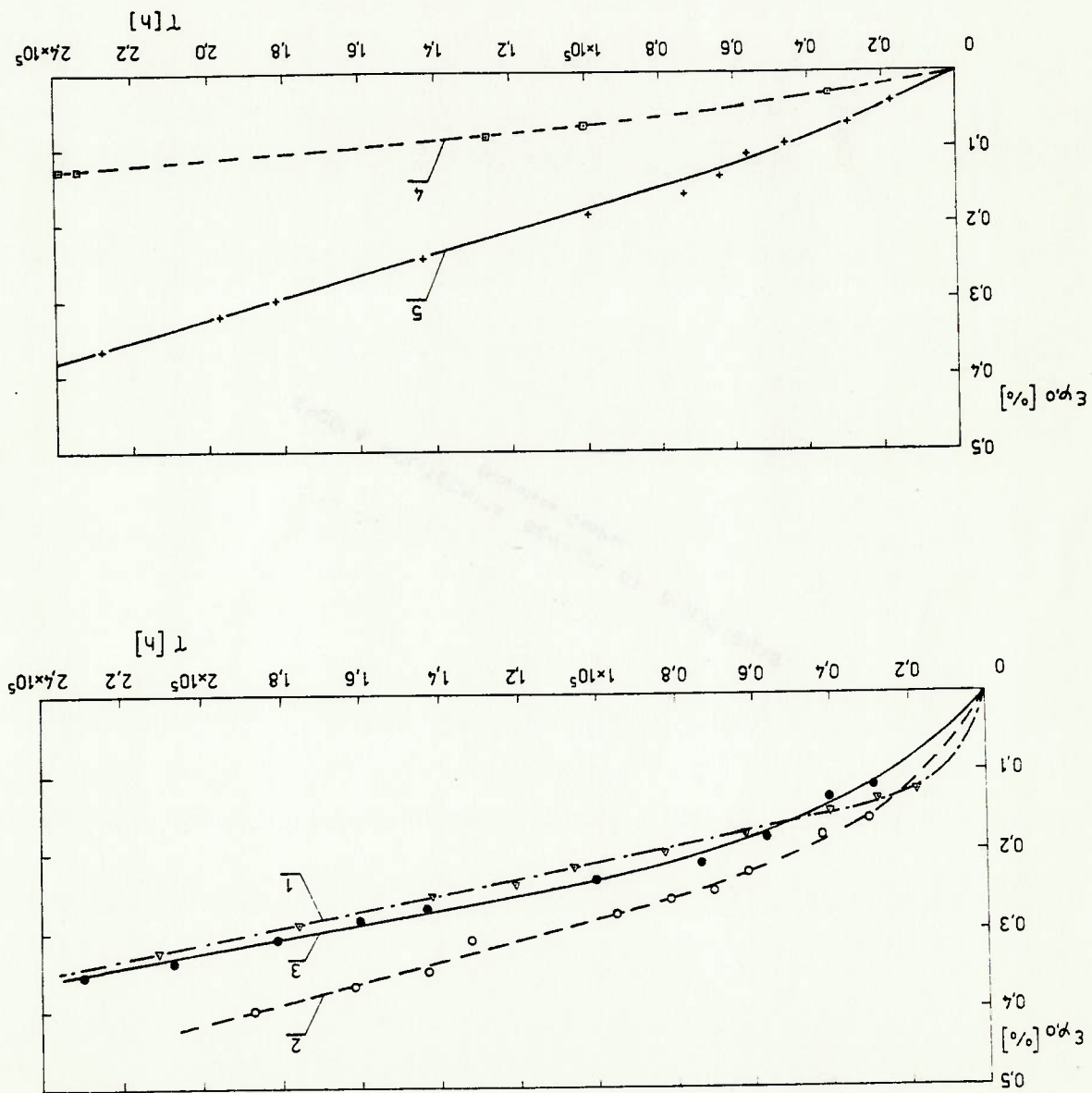
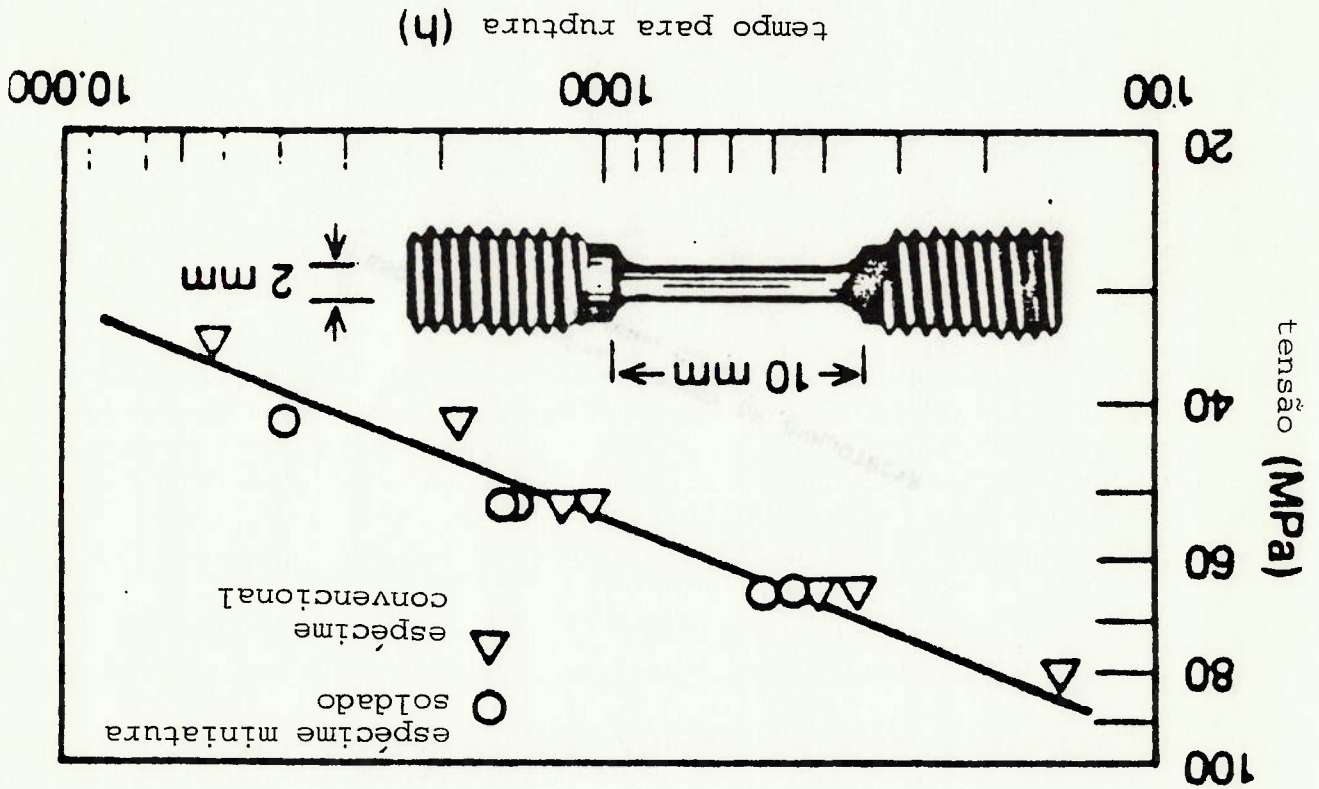
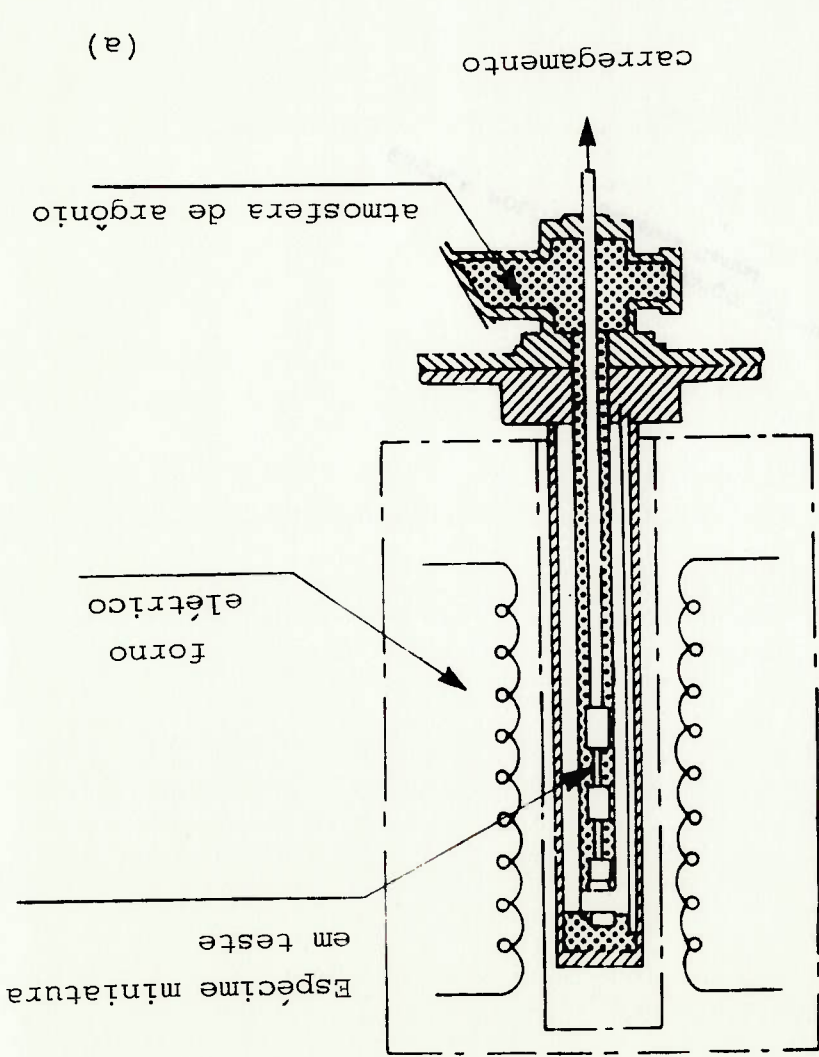


Figura 37. Comparação entre espécimes miniatura (O) e espécimes convencionais (Δ) empregados para correlacionar tensão de tração e tempo de ruptura por fluência. (Estudo de Viswanathan, Dooly e Saxena²²).

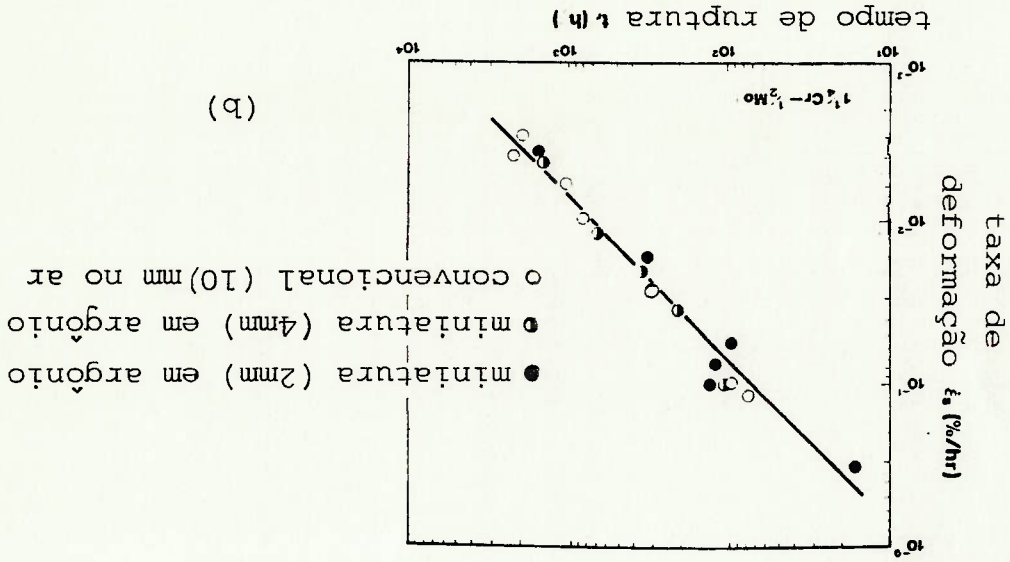


especímenes convencionais empregados para correlacionar taxa de deformação e tempo de ruptura por fluência.

Figura 38. (a) "Máquina de teste de fluência", empregando espécimes miniaturizados em atmosfera de argônio (cf. Kadoya²⁶) (b) resultados comparativos entre 2 tipos de miniatura e



(a)



(b)

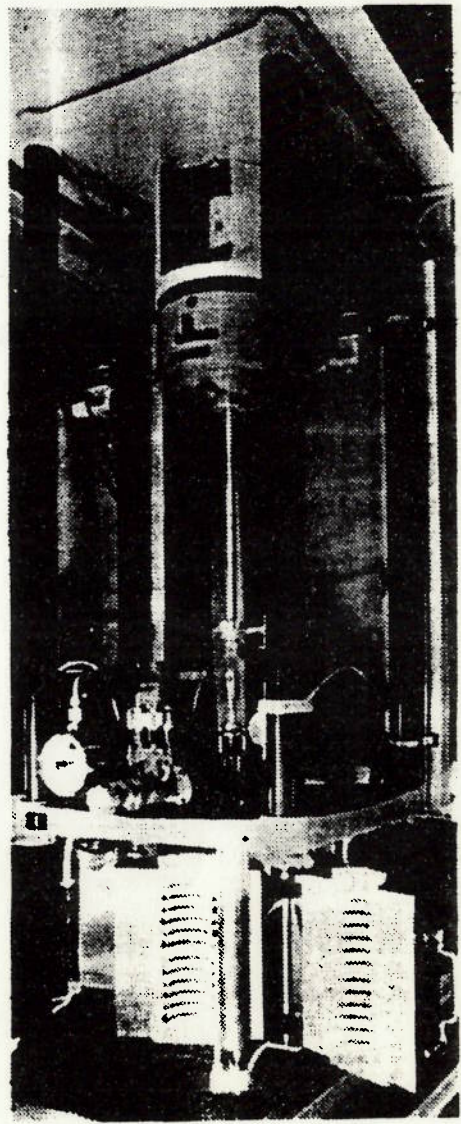
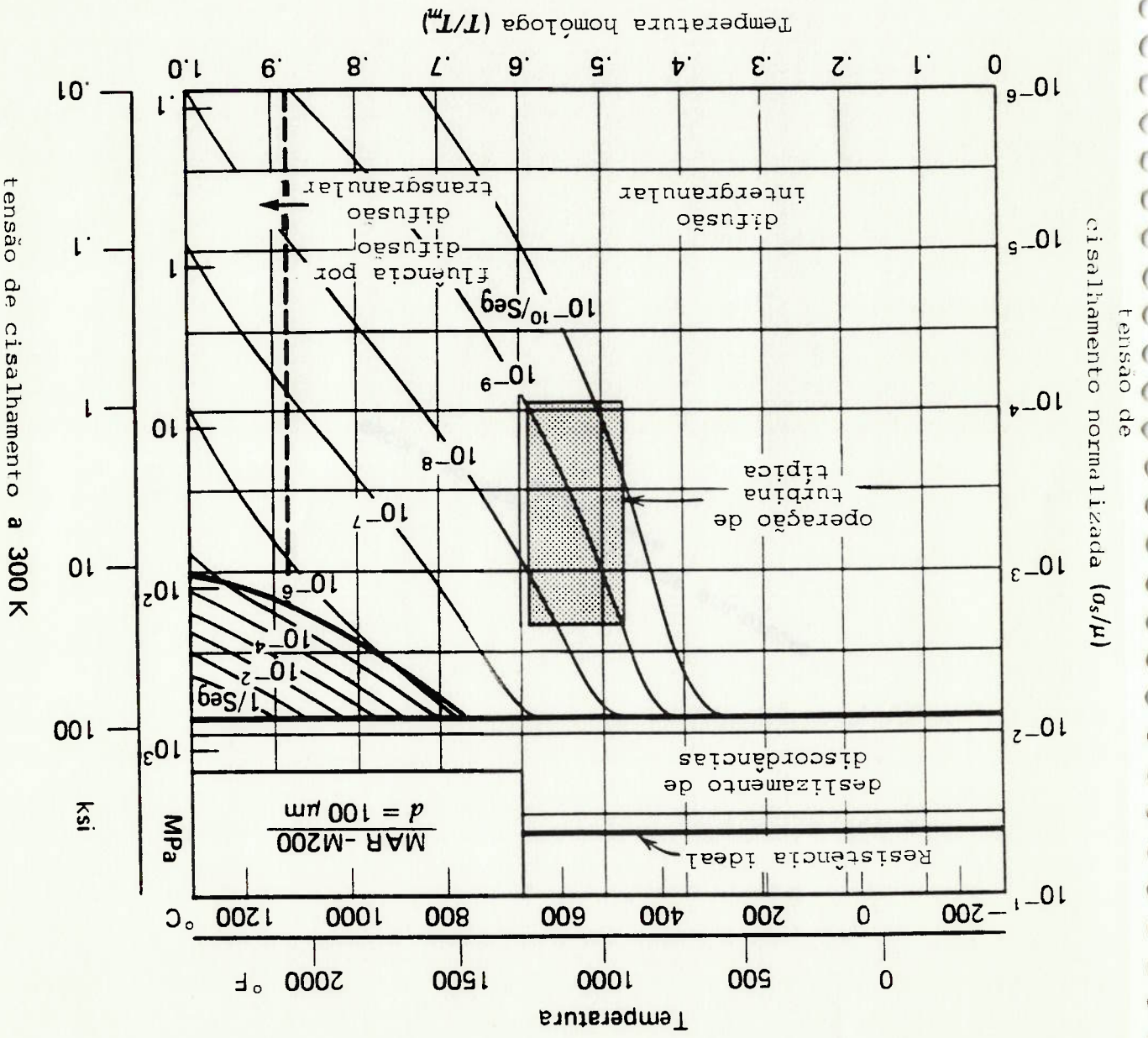


Figura 39. Mapa de fraturas desenvolvido por R. Hertzberg⁴⁶ para liga de engenharia, indicando campo de operação de turbina típica.



1. FRYLING, Glenn R. Heat Transfer. Combustion Engineering. New York. 1966. p. 6.1-6.37.
2. ROCHE, Roland, Criteres Modernes De Dimensionnement Des Appareils a Pression. Apresentado ao Coloque National Sur la Technologie des Appareils a Pression, Paris, Cetim, 1975/
3. KING, Roy T., Failures of Pressure Vessels. AMERICAN SOCIETY FOR METALS. In: Metals Handbook. Ohio, 1966. p. 643-69.
4. HERON, Cl. H., Incidents de Chaudières de Petites et Moyennes Puissances. Paris, 1984. Revue Apave N. 228, p. 27-43, 1984.
5. FRENCH, David N., Failures of Boilers and Related Equipment In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Metals Handbook 9. ed, Ohio, 1966. p. 602-27.
6. BUSH, S.H., Statistics of Pressure Vessels and Piping Failures. Journal of Pressure Vessel Technology. V. 110, Washington, 1988. p. 225-233.
7. MONTEAU, M. Accident Analysis. In: Enciclopedia of Occupational Health and Safety 3. ed. Geneva. International Labour Office, 1983, v. 1, p. 13-6.

8. VILLATE, Robert et al. La Methode Arbre de Causes. Paris, Institut Pour L'amelioration des Conditions de Travail. 1986 116 p.
9. GUGAN, Keith. Unconfined Vapour Cloud Explosions. London, Gulf Publish. 1979. 168p.
10. BEST, Richard; WALLS, Wilbur L. Hot Water Heater Bieve In School Kills Seven. Fire Journal, Quincy p.20-105. 1982
11. HAMMER, Willie. Handbook of System and Product Safety. Englewood Cliffs, . Prentice-Hall, 1972.351p.
12. MAGRINI, Rui de Oliveira. Riscos de Acidentes na Operação de Caldeiras. São Paulo, FUNDACENTRO, 1984. 72p.
13. PERA, Hildo. Geradores de Vapor: Um Compendio sobre Conversão de Energia Com Vistas à Preservação da Ecologia. São Paulo, Fama, 1990. 307p.
14. GUPTA, G.D. et al. A Practical Strategy For Life Evaluation and Extension of Fossil-Fuel-Fired Boilers. Journal of Pressure Vessel Technology, v.107,, p.301-7. Aug. 1985.
15. COSAR, Paul. Transmission de la Chaleur. , 1972.
16. MALU, Mahendra; TIEN, John. A Theory For Steady State Creep Based on The Motion Of Interstitial Type Jogs. Acta Metallurgica, v.22, p. 145-151, Feb.1974.

17. ASHBY, M.F.; GHANDI C.; TAPLIN D.M.B. Fracture-Mechanism MAPS And Their Construction For F.C.C. Metals and Alloys. *Acta Metallurgica*, v.27, p. 699-729, 1979.
18. HARTH, G.H.; SHERLOCK, T.P. Monitoring The Service-Induced Damage in Utility Boiler Pressure Vessels and Piping Systems. *Transactions of The ASME*, v.107, p. 226-9, Aug.1985.
19. MASUYAMA, F.; SETOGUCHI, K. Findings On Creep-Fatigue Damage in Pressure Parts of Long-Term Service-Exposed Thermal Power Plants. *Transactions of The ASME*, v.107, p. 260-270, Aug.1985.
20. DAVIDSON, M.J. et al. Monitoring for Life Extension. *Journal of Pressure Vessel Technology*, v.107, p.255-259, Aug. 1985.
21. MLYNARSKI, F.; TALLER, J. Residual Life Assessment for Boiler Pressure Components Based On Measurements of Creep Strains. *Transactions of The ASME*, v.110, p.308-313, Aug.1988.
22. VISWANATHAN, R.; DOOLEY R.; SAXENA A. A Methodology for Evaluating The Integrity of Longitudinally Seam-Welded Steam Pipes In Fossil Plants. *Journal of Pressure Vessel Technology*, v.110, p.283-90, Aug.1988.
23. DYSON, B.F.; MCFEAN M. Creep Deformation of Engineering Alloys: Developments from Physical Modelling. *ISIJ International*, v.30, n.10, p.802-11, 1990.

24. GREENWOOD, Geoffrey W. Mechanistic Interpretations of Some Empirical Correlations in Creep and Creep Fracture. *ISIJ International*, v. 30, n.10, p.795-801, 1990.
25. PLUMTREE, A.; SHEN, G. Prediction of Long-Term Creep and Rupture Life. *ISIJ International*, v. 30, n.10, p.812-16, 1990.
26. KADOYA, Yoshikuni, et al. Assessment of Remaining Life of Fossil Power Plant Parts by Means Of a Miniature Creep Rupture Test. *ISIJ International*, v. 30, n.10, p.854-61, 1990.
27. ISEDA, Atsuro, et al. Creep Damages Evaluation for Tubes by Internally Pressurized Creep Tests. *ISIJ International*, v. 30, n.10, p.862-68, 1990.
28. SUGITA, Yuji, et al. Evaluation of Creep Damage Progress by Metallurgical Examination in Aged Power Boiler Pressure Parts. *ISIJ International*, v. 30, n.10, p.895-904, 1990.
29. DIETER, George B. *Metallurgia Mecânica*. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1981. 653 p.
30. CHEN, C.W. Void Formation in Ductile Fracture of a Cobalt-Iron Alloy. *Acta Metall.*, v.9, p. 68-71, 1961.
31. ROGERS, H.C. The Mechanism of Crack Propagation in Ductile Metals. *Acta Metall.*, v.7, p.750-52, 1959.

32. ROGERS, H.C., The Tensile Fracture of Ductile Metals. *Trans. AIME*, v. 218, p. 495-506, Jun. 1960.
33. GITTUS, John. *Creep, Viscoelasticity and Creep Fracture in Solids*. London, Applied Science, 1975, 723p.
34. INSTITUTO BRASILEIRO DE PETROLEO. *Inspeção de Caldeiras. Rio de Janeiro*, 1976. 23p. (IBP, Inspeção de Equipamentos. Guia no 5.)
35. McLEBAN, D. *Mechanical Properties of Metals*. London, John Wiley, 1962. p. 285-334.
36. TELLES, Pedro C. Silva. *Materiais Para Equipamentos de Processo*. S. Paulo, Interciência, 1985, 244 p.
37. BABCOCK & WILCOX. *Steam: Its Generation And Use*. New York, 1978. 605 p.
38. FRENCH, David N. *The Metallurgy of Power Boilers*. National Board Bulletin, p. 5-7, Oct. 1990.
39. COLLIER, John G. *Convective Boiling And Condensation*. New York, McGraw-Hill, 1972. 430p.
40. KREITH, Frank. *Principios da Transmissão de Calor*. São Paulo, Edgar Blucher, 1977. 550p.
41. ASHBY, M.F. *A First Report on Deformation-Mechanism Maps*. *Acta Metall.*, v. 20, p. 887-97, 1972.

- 42. GUY, A.G. *Ciencia dos Materiais*. São Paulo, LTC/EDUSP, 1980. 435p.
- 43. PAPALEO, Renato; MOLYNEC Stephan. *Ruptura e Deformação por Fluência de Tubos de Caldeira*. Metalurgia, v. 24, p.311-21. 1968.
- 44. TAPLIN, D.M.R. *Flow and Failure of Superplastic Materials*. *Ann. Rev. Mater Sci.* v.9, p.151-89. 1979.
- 45. FELLBECK, David K. *Introdução aos Mecanismos de Resistência Mecânica*. São Paulo, Edgard Blucher, 1971. 147 p.
- 46. HERTZBERG, Richard. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. New York, John Wiley, 1989. 680p.