

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

**MODELAGEM DA FRATURA POR CORROSÃO SOB TENSÃO NOS BOCAIS
DO MECANISMO DE ACIONAMENTO DAS BARRAS DE CONTROLE DE
REATOR DE ÁGUA PRESSURIZADA**

OMAR FERNANDES ALY

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Materiais**

Orientador: Dr. Arnaldo Homobono Paes de Andrade

SÃO PAULO

2006

DEDICATÓRIA

A meus pais,
À minha família,
A meu País.

À memória do saudoso colega
Pedro A.L.D.P.L.P. Moreira do
CDTN.

“FILALETEO (DISCÍPULO DE JOHN LOCKE): -...Assim sendo, acredito que podemos enumerar três espécies de conhecimento: o *intuitivo*, o *demonstrativo* e o *sensitivo*.

TEÓFILO (DISCÍPULO DE G. W. LEIBNIZ): -Creio que tendes razão. Penso até que a estas espécies de *certeza* ou ao *conhecimento certo* poderíeis acrescentar o *conhecimento do provável*. Assim sendo, haverá duas espécies de *conhecimento*, como existem duas espécies de *provas*, das quais umas terminam na certeza, as outras na *probabilidade*...”

(de “Novos Ensaios sobre o Entendimento Humano” de Leibniz, coleção Os Pensadores nº 52, ed. Abril Cultural, São Paulo, 1980, p. 299, tradução de Luiz João Baraúna)

A Iannis Xenakis que
soube como artista e cientista
modelar de modo genial seu
pensamento musical

AMOR OMNIA VINCIT

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Arnaldo H. P. de Andrade, meu orientador no IPEN, pelas sugestões sempre oportunas e pela especial amizade e consideração.

Ao Dr. Miguel Mattar Neto, do IPEN pelas sugestões sempre oportunas e pela especial amizade e consideração.

À Dra. Idalina Vieira Aoki, da EPUSP, pelas sugestões sempre oportunas e pela especial amizade e consideração.

À Dra. Mônica M.A.M. Schwartzman, do CDTN, pelas sugestões sempre oportunas e pela especial amizade e consideração.

Ao Dr. Moyses Szajnbok, da EPUSP, pelas sugestões sempre oportunas e pela especial amizade e consideração.

À Dra. Dora de Castro Rubio Poli, amiga, colega e incentivadora.

Ao Dr. Yogen Garud da Aptech, CA, USA, pelos importantes comentários sobre esta pesquisa.

Ao Dr. Roger W. Staehle da Universidade de Minnesota, USA, pelo apoio na pesquisa bibliográfica.

Ao prof. Wanderley de Lima, Coordenador do Centro de Laboratórios de Ciclotrons.

A todos os colegas e professores do IPEN e do CDTN por sua dedicação e competência sem as quais seria difícil a elaboração deste trabalho. Menção especial aos colegas Adalberto Matias, Celeste Alentejano, Célia F.C.Neves, Herbert Jakstas Toth, Francisco J. Breda, Gerson Marinucci, Osmar de Moraes, Raquel M. Lobo, Sidney J. Buso, Silvana Maranhão.

Ao CNPq pela bolsa e atenção dispensada ao meu trabalho. IPEN-CNEN/SP pela oportunidade de poder ter realizado este trabalho.

MODELAGEM DA FRATURA POR CORROSÃO SOB TENSÃO NOS BOCAIS DO MECANISMO DE ACIONAMENTO DAS BARRAS DE CONTROLE DE REATOR DE ÁGUA PRESSURIZADA

RESUMO

Um dos principais mecanismos de falha que causam riscos de fratura a reatores de água pressurizada é a corrosão sob tensão de ligas metálicas em água do circuito primário (CSTAP). É causada por uma combinação das tensões de tração, meio ambiente em temperatura e microestruturas metalúrgicas susceptíveis. Ela pode ocorrer, dentre outros locais, nos bocais do mecanismo de acionamento das barras de controle. Essa fratura pode causar acidentes que comprometem a segurança nuclear através do bloqueio das barras de controle e vazamentos de água do circuito primário reduzindo a confiabilidade e a vida útil do reator.

O objetivo desta Tese de Doutorado é o estudo de modelos e uma proposta de modelagem para fraturas por corrosão sob tensão em liga 75Ni15Cr9Fe (liga 600), em água de circuito primário de reator de água pressurizada nesses bocais. São superpostos modelos eletroquímicos e de mecânica da fratura e validados com dados obtidos em experimentos e na literatura. Na parte experimental foram utilizados resultados obtidos pelo CDTN no equipamento recém-instalado de ensaio por taxa de deformação lenta.

Na literatura está proposto um diagrama que exprime a condição termodinâmica de ocorrerem diversos modos de CSTAP na liga 600: partiu-se de diagramas de potencial x pH (diagramas de Pourbaix), para a liga 600 imersa em água primária à alta temperatura (300^oC a 350^oC). Sobre ele, determinaram-se os submodos de corrosão, a partir de dados experimentais. Em seguida acrescentou-se uma dimensão adicional ao diagrama, correlacionando uma variável a que se denominou “fração de resistência à corrosão sob tensão”. No entanto, é possível acrescentar-se outras variáveis que exprimem a cinética de iniciação e/ou crescimento de trinca, provenientes de outras modelagens de CSTAP.

A contribuição original deste trabalho se insere nessa fase: partindo-se de uma condição de ensaio de potencial versus pH, foram iniciadas as modelagens de um modelo empírico-comparativo, um semi-empírico-probabilístico, um de tempo de iniciação e um de taxa de deformação, a partir dos ensaios experimentais e superpostas a essa condição. Esses exprimem respectivamente a susceptibilidade à CSTAP, o tempo de falha, e nos dois últimos o tempo de iniciação de falha por corrosão sob tensão. Os resultados foram comparados com os da literatura e se mostraram coerentes. Através desse trabalho, obteve-se uma metodologia de modelagem a partir de dados experimentais.

MODELING OF PRIMARY WATER STRESS CORROSION CRACKING AT CONTROL ROD DRIVE MECHANISM NOZZLES OF PRESSURIZED WATER REACTORS

Omar Fernandes Aly

ABSTRACT

One of the main failure mechanisms that cause risks to pressurized water reactors is the primary water stress corrosion cracking (PWSCC) occurring in alloys. It can occur, besides other places, at the control reactor displacement mechanism nozzles. It is caused by the joint effect of tensile stress, temperature, susceptible metallurgical microstructure and environmental conditions of the primary water. These cracks can cause accidents that reduce nuclear safety by blocking the rod's displacement and may cause leakage of primary water, reducing the reactor's life.

In this work it is proposed a study of the existing models and a modeling proposal to primary water stress corrosion cracking in these nozzles in a nickel-based Alloy 600. It is based on superposed electrochemical and fracture mechanics models, and validated using experimental and literature data. The experimental data were obtained at CDTN-Brazilian Nuclear Technology Development Center, in a recently installed slow strain rate testing equipment.

In the literature it is found a diagram that indicates a thermodynamic condition for the occurrence of some PWSCC submodes in Alloy 600: it was used potential x pH diagrams (Pourbaix diagrams), for Alloy 600 in high temperature primary water (300°C till 350°C). Over it, were located the PWSCC submodes, using experimental data. It was added a third parameter called "stress corrosion strength fraction". However, it is possible to superpose to this diagram, other parameters expressing PWSCC initiation or growth kinetics from other models.

Here is the proposition of the original contribution of this work: from an original experimental condition of potential versus pH, it was superposed, an empiric-comparative, a semi-empiric-probabilistic, an initiation time, and a strain rate damage models, to quantify respectively the PWSCC susceptibility, the failure time, and in the two last, the initiation time of stress corrosion cracking. It was modeling from our experimental data. The results were compared with the literature and it showed to be coherent. From this work was obtained a modeling methodology from experimental data.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. <i>Estratégias e métodos de inspeção</i>	<i>6</i>
1.2. <i>Histórico das inspeções realizadas</i>	<i>7</i>
1.3. <i>Melhoria da resistência a trincas: materiais e projetos.....</i>	<i>10</i>
1.4. <i>Objetivos</i>	<i>10</i>
1.4.1. <i>Contribuições originais.....</i>	<i>13</i>
2. O FENÔMENO DA CORROSÃO SOB TENSÃO E A ABORDAGEM DE ENGENHARIA.....	16
2.1. <i>Conceituação do fenômeno de CST</i>	<i>16</i>
2.2. <i>Morfologia da fratura por CST.....</i>	<i>23</i>
2.2.1. <i>Modos e submodos de corrosão</i>	<i>26</i>
2.3. <i>Definição da influência ambiental</i>	<i>28</i>
2.4. <i>Definição da influência do material</i>	<i>32</i>
2.5. <i>Superposição de modo com ambiente</i>	<i>34</i>
2.6. <i>Definição de falha</i>	<i>34</i>
2.7. <i>Definição estatística</i>	<i>35</i>
2.8. <i>Testes acelerados</i>	<i>41</i>
2.9. <i>Previsão</i>	<i>41</i>
2.10. <i>Modificações e otimização: projetos, materiais, ambientes e operação</i>	<i>42</i>
2.11. <i>Realimentação de informações e correção</i>	<i>43</i>
2.12. <i>Abordagem do projeto baseada em corrosão</i>	<i>44</i>
3. A CORROSÃO SOB TENSÃO NA LIGA 600 EM ÁGUA DO CIRCUITO PRIMÁRIO.....	45
3.1. <i>Descrição morfológica.....</i>	<i>46</i>
3.2. <i>Composição química e estrutura do filme passivo.....</i>	<i>50</i>
3.3. <i>Composição química e estrutura dos óxidos sobre as superfícies de ruptura.....</i>	<i>52</i>
4. INFLUÊNCIA DO MEIO NA CST EM LIGA 600	54
4.1. <i>Temperatura</i>	<i>54</i>
4.2. <i>Composição química</i>	<i>56</i>
4.2.1. <i>Espécies oxidantes</i>	<i>57</i>
4.2.2. <i>Espécies redutoras</i>	<i>59</i>

5. INFLUÊNCIA DO HIDROGÊNIO NA CST EM LIGA 600.....	60
5.1. <i>Influência do hidrogênio sobre a oxidação da liga 600</i>	<i>65</i>
5.2. <i>Propriedades eletroquímicas do óxido da liga 600</i>	<i>66</i>
5.3. <i>Hidrogênio absorvido e fragilização das ligas de níquel</i>	<i>70</i>
6. INFLUÊNCIA DO MATERIAL NA CST EM LIGA 600	73
6.1. <i>Parâmetros metalúrgicos</i>	<i>73</i>
6.2. <i>Microestrutura</i>	<i>73</i>
6.3. <i>Sensitização.....</i>	<i>77</i>
6.4. <i>Conteúdo de cromo</i>	<i>78</i>
6.5. <i>Carbono dissolvido</i>	<i>79</i>
7. INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS MECÂNICOS NA CST EM LIGA 600.....	80
7.1. <i>Tensão</i>	<i>80</i>
7.2. <i>Taxa de deformação</i>	<i>82</i>
7.2.1. <i>Fluência</i>	<i>83</i>
7.2.2. <i>Deslizamento intergranular</i>	<i>84</i>
7.3. <i>Encruamento.....</i>	<i>85</i>
7.4. <i>Fechamento de trinca</i>	<i>88</i>
8. MECANISMOS E MODELOS NA CST EM LIGA 600.....	89
8.1. <i>Mecanismo de dano por fluência</i>	<i>91</i>
8.2. <i>Mecanismo de dano por deslizamento intergranular</i>	<i>93</i>
8.3. <i>Modelo de dissolução localizada pela ruptura do filme passivo</i>	<i>94</i>
8.4. <i>Modelo semi-empírico de dano por taxa de deformação</i>	<i>102</i>
8.5. <i>Modelo de fratura acoplada ao ambiente</i>	<i>105</i>
8.6. <i>Mecanismo e modelo de oxidação interna</i>	<i>107</i>
8.7. <i>Mecanismos e modelos de trinca assistidos pelo hidrogênio</i>	<i>114</i>
8.7.1. <i>Fragilização por diminuição da energia de superfície</i>	<i>116</i>
8.7.2. <i>Fragilização por decoesão</i>	<i>117</i>
8.7.3. <i>Fragilização por hidrogênio.....</i>	<i>118</i>
8.8. <i>Mecanismo de formação de pressão interna de hidrogênio.....</i>	<i>120</i>
8.9. <i>Mecanismos e modelos de interação entre corrosão e deformação.....</i>	<i>121</i>
8.9.1. <i>Mecanismo de vacâncias.....</i>	<i>121</i>
8.9.2. <i>Modelo de corrosão assistida pela plasticidade.....</i>	<i>122</i>
8.10. <i>Modelos empíricos e numéricos</i>	<i>127</i>
8.10.1. <i>Modelo empírico-comparativo</i>	<i>127</i>
8.10.2. <i>Modelo semi-empírico-probabilístico.....</i>	<i>130</i>
8.10.3. <i>Modelo baseado na teoria da mobilidade acelerada.....</i>	<i>133</i>
8.10.4. <i>Modelo numérico de Rebak e Smialowska</i>	<i>138</i>
8.10.5. <i>Modelo numérico de Scott</i>	<i>141</i>
8.10.6. <i>Modelo numérico de Lee e Hwang</i>	<i>142</i>
8.10.7. <i>Comparação entre modelos.....</i>	<i>142</i>

9. SUPERPOSIÇÃO MODO COM AMBIENTE.....	149
9.1. <i>Construção do diagrama de Pourbaix para alta temperatura.....</i>	<i>150</i>
9.2. <i>Diagrama tridimensional de resistência à CST.....</i>	<i>153</i>
9.3. <i>Discussão das regiões de submodos.....</i>	<i>154</i>
9.4. <i>Discussão da topografia do diagrama tridimensional.....</i>	<i>158</i>
9.5. <i>Vantagens e limitações do uso do diagrama tridimensional.....</i>	<i>163</i>
10. TÉCNICAS DE MODELAGEM.....	165
10.1. <i>Técnica de modelagem aplicada ao modelo semi-empírico-probabilístico.....</i>	<i>166</i>
10.2. <i>Técnica de modelagem aplicada ao modelo semi-empírico de dano por taxa de deformação.....</i>	<i>169</i>
10.3. <i>Técnica de modelagem aplicada ao modelo de dano por taxa de deformação simplificado.....</i>	<i>180</i>
10.4. <i>Técnica de modelagem aplicada a ensaios de taxa de deformação lenta constante.....</i>	<i>186</i>
10.5. <i>Técnica de modelagem utilizando o diagrama mecânico-eletroquímico.....</i>	<i>194</i>
11. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS PROPOSTOS.....	196
11.1. <i>Domínio da aplicação dos modelos.....</i>	<i>196</i>
11.2. <i>Método e hipóteses para construção dos modelos.....</i>	<i>198</i>
12. PARTE EXPERIMENTAL.....	201
12.1. <i>Ensaio experimentais no CDTN.....</i>	<i>201</i>
12.2. <i>Materiais.....</i>	<i>204</i>
12.3. <i>Resumo dos resultados dos ensaios.....</i>	<i>206</i>
12.4. <i>Cálculo estimativo do potencial medido pelo CDTN em relação ao padrão de hidrogênio e observações sobre o valor encontrado.....</i>	<i>212</i>
12.5. <i>Dados da literatura utilizados para a representação gráfica de modelagem empírico-probabilística.....</i>	<i>217</i>
13. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	218
14. CONCLUSÕES.....	226
15. RECOMENDAÇÕES PARA PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA.....	228
16. APÊNDICES.....	232
16.1. <i>APÊNDICE 1: Distribuição de Weibull.....</i>	<i>233</i>
16.2. <i>APÊNDICE 2: Planilha para aplicação em modelagem.....</i>	<i>236</i>
17. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	237

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1.1. Composição química dos materiais envolvidos.....	3
Tabela 1.2. Comparação entre propriedades mecânicas da liga 600 e do aço inoxidável 304	3
Tabela 2.1. Íons específicos e substâncias que causam CST	18
Tabela 8.1. D_s (m^2/s) para os óxidos da liga 600	135
Tabela 8.2. Vantagens e limitações dos principais modelos.....	143
Tabela 10.1. Características microestruturais e propriedades de quatro condições de material da liga 600.....	183
Tabela 10.2. Avaliação da dependência com a temperatura derivada dos tempos de falha através do modelo DTDC para as falhas por CSTAP da liga 600	185
Tabela 12.1. Composição química do Inconel 600 MA	204
Tabela 12.2. Propriedades mecânicas do Inconel 600 MA.....	205
Tabela 12.3. Resultados obtidos nos ensaios SSRT do Inconel 600 MA em ambiente de reator nuclear. Taxa de deformação: $3 \times 10^{-7} s^{-1}$	209
Tabela 12.4. Valores do parâmetro de escala de Weibull baseado em inspeção para inclinação de Weibull $b=1,5$	217
Tabela 13.1. Parâmetros de avaliação semi-quantitativa da CSTAP de acordo com ensaios do CDTN	218

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1.1.	Estrutura metalográfica da liga 600 de tubo gerador de vapor, com ataque eletrolítico no ácido ortofosfórico a 10%	2
Figura 1.2.	Perda de massa a 980 ⁰ C da liga 600 comparativamente ao AISI 304.	4
Figura 1.3.	Seção de corpo de prova de Inconel 600 trincado após ensaios de tensão em água a 350 ⁰ C	5
Figura 1.4.	Bocal do mecanismo de acionamento das barras de controle num reator tipo RAP fabricado pela Westinghouse	6
Figura 1.5.	Dano por corrosão generalizada causado pelo ácido bórico depositado através de vazamento por CSTAP através de bocal do MAB da Usina D. Besse	9
Figura 1.6.	Diagramas potencial x pH para a liga 600 na faixa de 300 ⁰ C para a condição de tratamento laminado e recozido (“mill annealed”).	15
Figura 2.1.	Esquema indicando no diagrama tensão x deformação, a região de CSTAP, para o Inconel 600	16
Figura 2.2.	Esquema indicando no diagrama tensão x deformação, a região de CSF	17
Figura 2.3.	Ilustração dos processos de CST do mais químico ao mais mecânico	20
Figura 2.4.	Esquema ilustrativo da relação entre CST, CSF e FPH.	23
Figura 2.5.	Diagrama de diferentes caminhos de trinca como função do nível de tensões	24
Figura 2.6.	Variação na velocidade de crescimento de trinca por CST com o fator de intensidade de tensões	26
Figura 2.7.	Esquema de cinco modos intrínsecos de corrosão	26
Figura 2.8.	Esquema das regiões de CST em função do potencial relacionado com uma curva de polarização ativa-passiva	28
Figura 2.9.	Esquema do (a)diagrama de modo de corrosão; (b) diagrama da definição do meio; (c) sobreposição de (a) e (b)	29
Figura 2.10.	Nos diagramas são ilustrados o diagrama de fase e as curvas TTT São mostrados também o diagrama de Pourbaix e as curvas de polarização	30
Figura 2.11.	Esquema da concentração versus distância dos contornos de grão para circunstâncias onde os precipitados são formados	33
Figura 2.12.	Esquema mostrando a profundidade de uma trinca por CST como uma mistura de processos determinísticos e estocásticos	35
Figura 2.13.	Função densidade de probabilidade para a distribuição de Weibull	37
Figura 2.14.	Distribuição acumulativa linearizada de Weibull	38
Figura 2.15.	Efeito da tensão na taxa de falha cumulativa do Zircaloy-2 em iodo gasoso	39
Figura 2.16.	(a) Gráfico esquemático da probabilidade acumulativa de curvas para altas temperaturas e para temperatura de referência (b) 1/T versus tempo	40
Figura 2.17.	Exemplo de adição de distribuições acumulativas para os casos distintos de falhas numa usina nuclear	42
Figura 2.18.	Equipamento especial de inspeção para os bocais do mecanismo de	43

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

