

# CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE TESTES DE CHOQUE TÉRMICO PRESSURIZADO PARA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE VASOS DE PRESSÃO DE REATOR NUCLEAR DO TIPO PWR

Paulo T. Vida Gomes<sup>1</sup>; Julio R. Barreto Cruz<sup>1</sup>, Tanius R. Mansur<sup>1</sup>, Denis H. B. Scaldaferrri<sup>1</sup>  
Miguel Mattar Neto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rua Prof. Mário Werneck s/n; Cidade Universitária; Belo Horizonte/MG; CEP: 31270-010  
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear  
gomespt@cdtn.br

<sup>2</sup>Travessa R, 400; Cidade Universitária, São Paulo/SP; CEP: 05508-900  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
mmattar@ipen.br

## RESUMO

Em uma usina nuclear do tipo PWR, o vaso de pressão (VPR) trabalha como a contenção do núcleo do reator e do refrigerante do sistema primário de refrigeração [1]. Para a extensão de vida destas usinas, a vida residual de seus componentes deve ser avaliada durante todo o seu tempo de operação. Com relação ao vaso de pressão do reator, o choque térmico pressurizado (PTS), é um evento muito importante a ser considerado. Toda a comunidade científica tem investido tempo e dinheiro, conduzindo diversos experimentos, para melhor entender os efeitos deste tipo de evento. O experimento de choque térmico pressurizado consiste na construção de um modelo simplificado do vaso de pressão do reator [2], em escala, contendo um determinado número de trincas com geometria e localizações controladas, e submetê-lo à condições de temperatura e pressão de operação induzindo um choque térmico por meio de um fluxo de água na sua superfície externa. Para realizar tais experimentos, o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN, tem conduzido diversos estudos relacionados ao evento de PTS e construiu uma seção de testes que possibilita a simulação das condições de carregamento causadas por um choque térmico pressurizado. Apresenta-se neste trabalho a construção do sistema de testes de choque térmico pressurizado.

## 1. INTRODUÇÃO

Uma etapa importante na definição de uma metodologia para avaliação de PTS é a simulação de um transiente de choque térmico para validação dos cálculos desenvolvidos por meio de códigos computacionais, com o objetivo de prever o comportamento do vaso de pressão com relação ao crescimento de trincas em sua parede, quando submetido aos carregamentos oriundos de uma queda brusca de temperatura [3]. Este é um trabalho experimental árduo que engloba toda a caracterização mecânica e metalográfica do material de construção do modelo do vaso de pressão do reator, a construção e instrumentação do mesmo e a montagem de uma seção de testes capaz de simular, em tempo real, um transiente de choque térmico pressurizado.

O transiente de choque térmico pressurizado é um evento controlado, no qual, o vaso de pressão, aquecido a uma temperatura em torno de 300°C (temperatura de operação de um reator nuclear do tipo PWR), com uma pressão interna em torno de 150 MPa, é resfriado por um volume de 10 m<sup>3</sup> de água à temperatura de 8°C.

O aquecimento até a temperatura de teste é obtido por meio de oito resistências elétricas de 4000 W cada, totalizando 32000 W de potência. A pressão interna é obtida pela vaporização da água contida no interior do vaso de pressão durante o aquecimento.

A água de refrigeração, à temperatura de 8°C, em dois reservatórios posicionados em uma altura de 5 metros acima do vaso de pressão desce por gravidade por dois tubos de 250 mm de diâmetro. Para aumentar a velocidade da água, o diâmetro de 250 mm é então reduzido para 70 mm, forçando a água a passar em uma região estreita entre a superfície externa do vaso de pressão e uma placa que o envolve, denominada placa defletora (ver Fig. 2 e Fig. 3). As pressões, temperaturas e deformações são monitoradas e gravadas durante todo o evento por meio de equipamento próprio para aquisição dinâmica de dados.

## 2. SEÇÃO DE TESTE DE CHOQUE TÉRMICO PRESSURIZADO

Para a execução do teste de choque térmico pressurizado foi necessário construir uma seção de testes capaz de armazenar 10m<sup>3</sup> de água de refrigeração a uma temperatura de 8°C e de liberá-la automaticamente no momento do teste. Deste modo, construiu-se uma estrutura em aço carbono de 5 metros de altura, a qual sustenta dois reservatórios de água de 5 m<sup>3</sup> cada. De cada reservatório sai um tubo de PVC de 10 polegadas de diâmetro, o qual desce verticalmente (Fig. 1) e, após redução do diâmetro para 70 mm, termina horizontalmente na placa defletora, conforme mostrado na Fig. 2 e na Fig. 3. Estes dois tubos têm o objetivo de injetar água vinda dos reservatórios no espaço entre a placa defletora e a superfície externa do vaso de pressão, a partir do acionamento semi automático das válvulas de descarga, posicionadas no fundo de cada reservatório.



**Figura 1 - Seção de testes de Choque Térmico Pressurizado.**



**Figura 2 – Redução dos diâmetros dos tubos de injeção de água na placa defletora.**



**Figura 3 – Vista do piso da seção de testes antes da instrumentação do vaso.**

## **2.1. Construção do vaso de pressão**

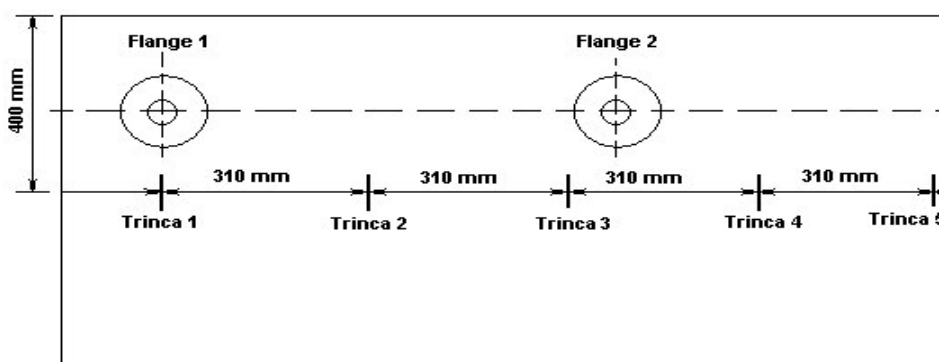
O modelo de vaso de pressão de reator (VPR) foi construído a partir de um tarugo de aço SAE 8620, no estado bruto de forja, com diâmetro de 500 mm e comprimento de 1300 mm. Este modelo, apresentado na Fig. 4, foi usinado com diâmetro externo de 495 mm, altura de 1100 mm (incluindo a tampa) e espessura de parede de 85 mm. As dimensões e o material utilizado na construção do modelo foram indicadas por Barroso [2]. Foram soldados dois flanges diametralmente opostos na altura de 760 mm, os quais foram usados para passagem de cabos de extensômetros e termopares.



**Figura 4 – Vaso de Pressão.**

## **2.2. Localização das trincas na parede do vaso de pressão**

Foram feitas cinco trincas longitudinais na parede do modelo do vaso de pressão, utilizando-se a metodologia desenvolvida especialmente para tal fim. Os entalhes nos quais se iniciam as trincas foram usinados a 400 mm da borda superior do vaso, espaçados igualmente na direção circunferencial do mesmo. Apresenta-se na Fig. 5 a localização das trincas na parede do vaso de pressão.



**Figura 5 – Esquema de localização das trincas no vaso de pressão.**

## **2.3. Instrumentação do vaso de pressão**

O modelo de vaso de pressão foi instrumentado de modo a registrar as temperaturas e as tensões circunferenciais e axiais em pontos previamente escolhidos. A pressão interna foi registrada durante todo o evento por meio de um transdutor de pressão especialmente

projetado para tal fim. O vaso foi aquecido por resistências elétricas, as quais foram controladas por controlador elétrico.

#### **2.4. Medição de temperatura**

O vaso foi instrumentado com 12 termopares com os seguintes objetivos:

- medir a distribuição de temperaturas na parede do vaso durante o choque térmico;
- determinar as diferenças de temperaturas externas entre a parte superior e a inferior do vaso;
- os termopares para medição da distribuição de temperaturas na parede do vaso são do tipo K, encapsulados em aço inoxidável de diâmetro de 0,5 mm, e foram calibrados para temperaturas de 100°C, 200°C e 300°C. Os termopares usados para medição das temperaturas externas nas partes inferior e superior do vaso são do tipo J.

Para a medição da distribuição de temperaturas na parede do vaso, foram colocados 10 termopares arranjados horizontalmente na altura do centro dos entalhes das trincas.

Nos reservatórios de água foi colocado um termopar do tipo K para medir a temperatura inicial da água de refrigeração. A Fig. 6 apresenta um flange lateral por onde saem 5 termopares para medição de temperaturas no interior do modelo.



**Figura 6 - Flange lateral com termopares para medição de temperatura interna do modelo.**

Cinco termopares foram instalados nas profundidade de 0 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm e 40 mm a partir da superfície interna. Outros cinco termopares foram instalados nas profundidades de 0 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm e 30 mm a partir da superfície externa do modelo.

## 2.5. Aquecimento e controle da temperatura

O aquecimento do vaso foi feito por meio de 8 resistências elétricas de 4000 W cada. A temperatura foi controlada por meio de um termopar fixado à superfície externa do vaso e um controlador automático de temperaturas. Para diminuir a perda de calor para o ambiente durante o aquecimento, foi construída uma estufa em alumínio, a qual envolve todo o vaso foi retirada antes da execução do choque térmico. Apresenta-se na Fig. 7 a parte superior do vaso de pressão onde se vê as resistências elétricas durante e depois da montagem.



**Figura 7 - Montagem das resistências elétricas no modelo.**

Apresenta-se na Fig. 8 o modelo do vaso de pressão isolado termicamente para diminuir as perdas de calor para o ambiente durante o aquecimento.



**Figura 8 - Modelo do vaso de pressão isolado termicamente.**

## 2.6. Medição de tensões e detecção de crescimento de trinca

Devido ao alto preço dos extensômetros encapsulados para alta temperatura, optou-se por usar extensômetros sem encapsulamento e desenvolver proteções específicas que substituam o encapsulamento. Foram feitos testes para se determinar o comportamento destes extensômetros, sob carregamento, durante o aquecimento e resfriamento à temperatura de

300°C. A partir destes testes concluiu-se que os extensômetros poderiam ser usados na temperatura de teste desde que protegidos superficialmente por cola cerâmica própria para instalações extensiométricas. A instalação de extensômetros sobre as trincas visou determinar qualquer crescimento de trinca que pudesse ocorrer durante o choque térmico.

Foram instalados um total de 22 extensômetros no modelo. Internamente foram instalados 7 extensômetros sendo um extensômetro na direção circunferencial para cada trinca, um extensômetro na direção longitudinal e um extensômetro inativo (dummy). Estes extensômetros, por estarem sujeitos a pressão e imersos em água, foram envolvidos por uma proteção de aço inoxidável e por borracha de silicone para altas temperaturas. Os cabos elétricos foram protegidos até o exterior do vaso de pressão por tubos de aço inoxidável de 6 mm de diâmetro. Todos foram localizados a 400 mm abaixo da borda superior do modelo, exatamente abaixo do centro do entalhe das trincas.

Apresenta-se na Fig. 9 um extensômetro dentro da proteção de aço inoxidável e toda a instalação protegida por borracha de silicone.



Extensômetro dentro da proteção de aço inoxidável



Instalação protegida por borracha de silicone

**Figura 9 - Detalhe da instalação extensométrica no interior do modelo.**

Apresenta-se na Fig. 10 vista de toda a instalação extensométrica interna, antes e depois da proteção com borracha de silicone.



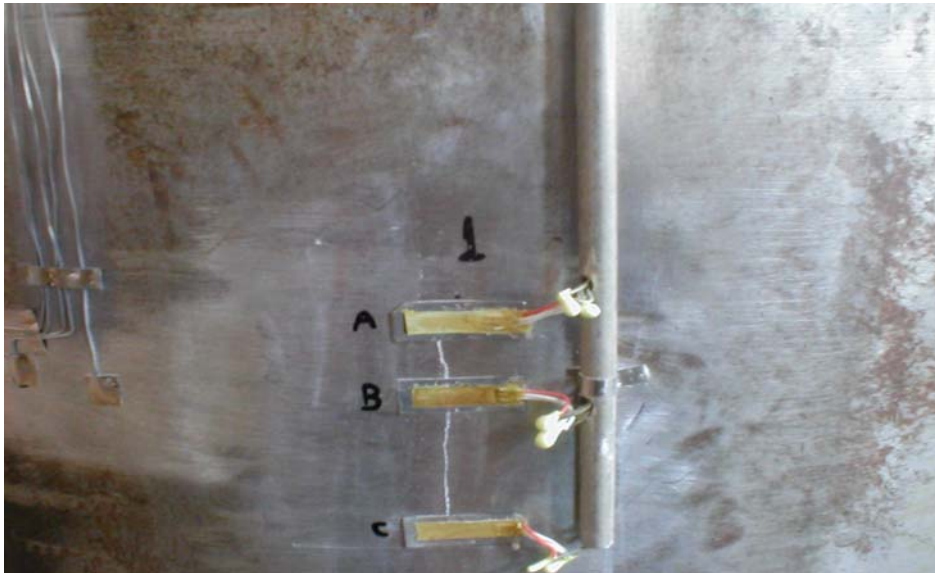
Após instalação dos extensômetros



Após proteção com silicone

**Figura 10 - Vista da instalação extensométrica interna.**

A instalação extensométrica externa foi feita utilizando-se 3 extensômetros para cada trinca. Assim, foi instalado um extensômetro em cada extremidade e um no centro de cada trinca. Os cabos elétricos também foram protegidos por um tubo de aço inoxidável de 6 mm de diâmetro e por borracha de silicone para altas temperaturas. A Fig. 11 apresenta a instalação extensométrica externa sobre uma trinca. Nota-se 3 extensômetros sobre a trinca, cujo perfil é realçado em cor branca por partículas magnéticas.



**Figura 11 - Instalação extensométrica externa.**

Foram feitos testes preliminares de emissão acústica com o intuito de determinar os ruídos devidos à vibração causada pelo fluxo de água durante o choque térmico. A partir destes testes pôde-se determinar a viabilidade do uso da técnica de emissão acústica para determinação de crescimento de trincas durante o choque térmico.

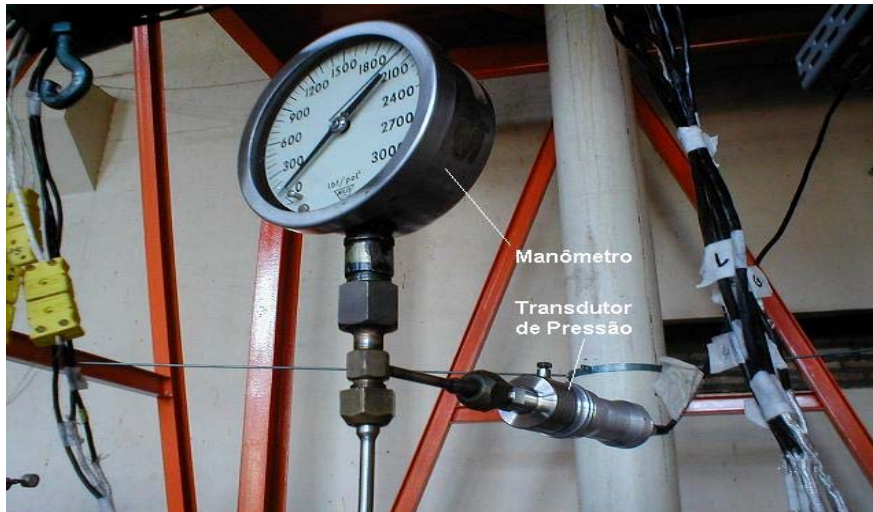
Antes da usinagem do vaso, o material foi inspecionado com ultra-som com o objetivo de determinar possíveis descontinuidades nele existentes.

Depois de pré-trincado, o vaso foi novamente submetido a exame por ultra-som para a determinação da geometria e localizações das trincas nas paredes do vaso. Foi executado também exame por partículas magnéticas para a determinação da forma e localização das trincas na superfície do vaso.

## **2.7. Medição de pressão**

Para a medição de pressão foram usados um manômetro comercial para pressão máxima de 20 MPa e um transdutor de pressão especialmente projetado para pressões até 15 MPa, mostrados na Fig. 12, abaixo.





**Figura 12 - Manômetro e transdutor de pressão.**

## **2.8. Controle de pressão durante o teste**

O controle da pressão foi feito através de uma válvula de alívio de pressão, a qual foi projetada e construída especialmente para este fim, devido á dificuldade de se encontrar no mercado válvulas de baixa vazão e alta pressão. Ela é uma válvula de agulha acionada semi-automaticamente por um moto-reductor. Utilizou-se também uma válvula de segurança para despressurização em caso de emergência.

Apresenta-se na Fig. 13 as válvulas de alívio de pressão e de segurança montadas na tampa do vaso de pressão.



**Figura 13 – Válvulas de segurança e de alívio de pressão.**

## **2.9. Montagem e verificação final**

Após a instrumentação e conexão de todos os cabos elétricos o vaso foi submetido a teste hidrostático à temperatura ambiente para verificação do funcionamento da instrumentação. Mostra-se na Fig. 14 o vaso de pressão instrumentado e isolado termicamente.



**Figura 14 – Vaso de pressão instrumentado.**

### **3. CONCLUSÕES**

Com relação à montagem do sistema de teste de choque térmico pressurizado, pode-se dizer que:

- O vaso foi submetido a teste hidrostático até a pressão de trabalho e não apresentou vazamentos;
- a instalação extensométrica e o transdutor de pressão estão funcionando como esperado;
- o manômetro apresentou medidas equivalentes àquelas apresentadas pelo transdutor de pressão;
- a válvula de alívio semi-automática apresentou problemas os quais foram resolvidos com algumas mudanças no projeto inicial;
- o VPR já pode ser submetido ao teste de choque térmico pressurizado.

### **REFERÊNCIAS**

1-Bass, R., Wintle, J. e Hurst, R.C.; Structural Integrity Assessment: How Safe Is it? – An Evaluation of the Integrated Approach Through the Results of the NESC-1 Case Study, In: NESC-1 Seminar, 27-28 March, Petten, (2000).

2-Barroso, S.P. Análise de Tensão no Circuito Primário de Reator Nuclear. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, (1996).

3-Keim, E., Schmidt, C., Schopper, A. and Hertlein, R., Life Management of Reactor Pressure Vessels Under Pressurized Thermal Shock Loading - Deterministic Procedure and Application to Western and Eastern Type of Reactors, *IAEA Specialists Meeting on Methodology and Supporting Research for PTS Evaluation*, Rockville, 18-20 July, (2000).