

*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares*

Desenvolvimento de Dispositivo para Testes Mecânicos em Amostras Miniaturizadas objetivando a sua utilização em Células Quentes do Laboratório de Análise de Materiais Irrradiados (LAMI) do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB)

EDITAL INTERNO InterCentros DPDE/IPEN N2 5/2018

**PROJETO INTERCENTROS CCTM-CEN 2019-2020**

Julho de 2018

# Desenvolvimento de Dispositivo para Testes Mecânicos em Amostras Miniaturizadas objetivando a sua utilização em Células Quentes do Laboratório de Análise de Materiais Irradiados (LAMI) do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB)

## INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades mecânicas de materiais estruturais irradiados é uma necessidade inerente ao projeto e manutenção de centrais nucleares de potência e outras instalações similares. Isto porque a irradiação neutrônica afeta significativamente algumas destas propriedades. O risco na manipulação de amostras e corpos de prova de tais materiais é maior quanto maior for a massa envolvida e exige laboratórios especiais mesmo quando o volume do material ensaiado é da ordem de poucos  $\text{cm}^3$  (1).

Advém daí o forte interesse pelo uso de corpos de prova (CP) pequenos (volume  $< 10 \text{ mm}^3$ ) comparados com os CPs tradicionais, inclusive os de geometria Charpy ( $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$ ), por exemplo, o que tem ensejado estudos e propostas de ensaios iniciados a cerca de 30 anos atrás (2, 3) contando com um intenso e crescente desenvolvimento nos últimos dez anos, inclusive com a realização de encontros internacionais (4).

Assim, dentre as técnicas desenvolvidas para obter as propriedades mecânicas dos materiais, usando CPs reduzidos, inclusive no âmbito da mecânica da fratura, está o chamado Small Punch Test (SPT), descrito em diversos trabalhos (5, 6). Ressalte-se que este teste/ensaio é diferente do proposto da norma ASTM de conformabilidade de materiais (E643: *Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material*). No ensaio SPT uma pequena esfera ou semiesfera é empurrada contra a superfície de uma pequena chapa (circular ou retangular), do material a ser ensaiado, que tem os bordos fixos. Como ordem de grandeza das dimensões envolvidas, a esfera tem diâmetro  $d_e = 1 \text{ mm}$  e o disco tem diâmetro  $d_d = 3 \text{ mm}$  e espessura  $t_d = 0,25 \text{ mm}$  (Figura 1). Desta forma o dispositivo de teste é também bem pequeno tanto que das metades quebradas de um CP Charpy pós-teste de impacto é possível retirar diversos CPs para o ensaio SPT.

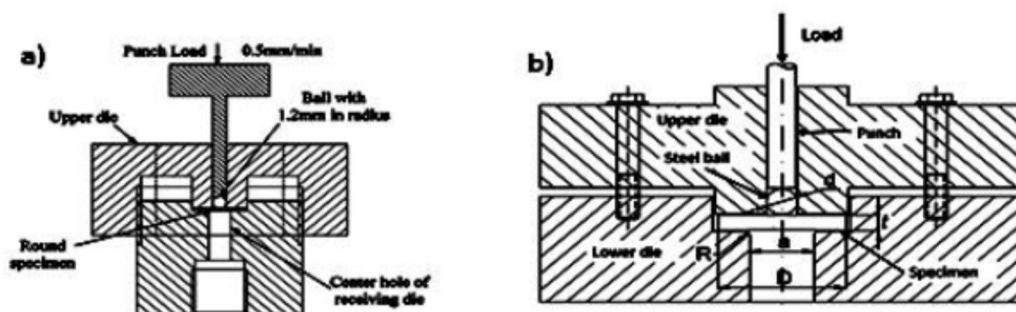


Figura 1: (a) Desenho esquemático do sistema de carregamento e da amostra para o ensaio SPT como descrito por Yang et al. (7) (b) Outra versão de dispositivo para SPT mostrado por Song et al. (8)

Basicamente o ensaio consiste em pressionar a esfera contra a chapa até rompê-la registrando-se a força aplicada ( $F$ ) e o deslocamento da esfera ( $d$ ) enquanto a chapa se deforma. Um resultado típico é apresentado na Figura 2, (1) apud (9). Da análise da curva  $F \times d$ , que apresenta determinadas características, e da análise da superfície de fratura da chapa rompida, e da forma da própria fratura macroscópica, é possível inferir diversas propriedades do material da chapa como, por exemplo, a tensão limite de escoamento, a tensão de ruptura além de propriedades inerentes da mecânica da fratura como a tenacidade do material.

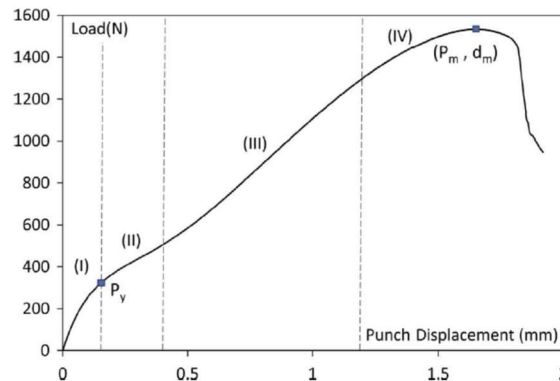


Figura 2: Curva Carga x Deslocamento do SPT mostrando diferentes zonas do teste (1)

Sofisticando-se um pouco mais o projeto do dispositivo e a metodologia de teste é possível realizar ensaios em diferentes temperaturas e, assim, obter uma curva tenacidade em função da temperatura e/ou a determinação da Temperatura DBTT (*Ductile to Brittle Transition Temperature*) (2, 5, 10). Há, ainda, propostas (6) de uso de disco pré-trincado no ensaio SPT para a determinação de propriedades de fratura e crescimento de trincas de fadiga dos materiais ensaiados.

Neste contexto, a simulação numérica do ensaio SPT utilizando o Método dos Elementos Finitos considerando, minimamente, grandes deslocamentos e grandes deformações bem como o atrito entre a esfera e o CP, é de grande ajuda no entendimento da influência de diversos fatores nos resultados. Os modelos podem ser (a) 3D (11), com o uso de dupla simetria, ou (b) modelos axissimétricos (12), isto é: com simetria radial (Figura 3).

Desta forma, uma vez que os parâmetros do modelo estejam ‘calibrados’ em confronto com os resultados experimentais (por exemplo, a quantidade/tamanho e os tipos de elementos da malha, o ajuste do valor do coeficiente de atrito nas partes em contato, mas com possível movimento relativo, etc.) é possível variar cada um dos outros parâmetros onde haja, por exemplo, alguma incerteza quanto ao seu valor correto/preciso, para estimar sua influência nos resultados.

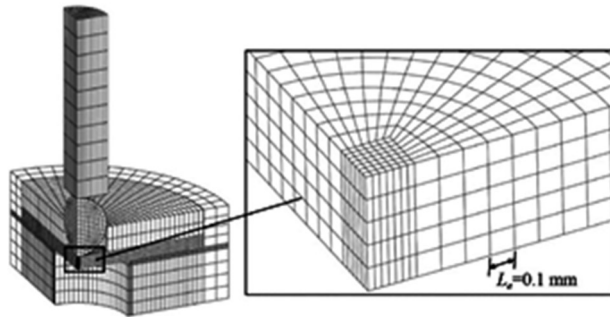


Figura 3 (a) – Modelo 3D (11)

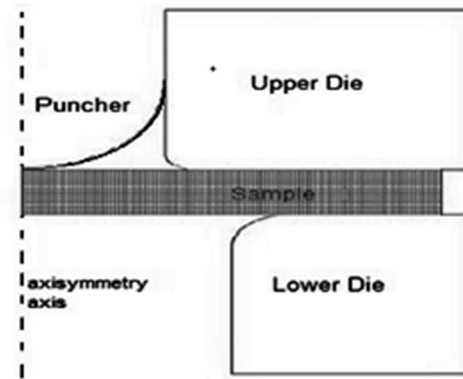


Figura 3 (b) – Modelo Axissimétrico (adaptado de (12))

Em uma segunda etapa pode-se incorporar ao modelo numérico um modelo de dano que possa reproduzir, na análise, como o CP se rompe (fratura) à medida que o carregamento aumente até o colapso do mesmo. Este procedimento implica o desenvolvimento de rotina própria a ser incorporada ao programa para desativar um determinado elemento onde a referida rotina encontre condições de tensão/deformação tais que se possa considerar que o material do elemento colapsou e uma trinca se formou no seu lugar (e/ou a mesma cresceu).

Desta forma fica evidente que a análise experimental e a análise numérica podem se harmonizar para potencializar os resultados almejados de forma ainda mais confiável. Ainda mais em uma área tão sensível quanto a área nuclear cujos requisitos de segurança são elevados, principalmente no uso/manuseio de materiais irradiados.

A técnica de ensaios em corpos de prova miniaturizados, em particular o SPT, apesar de ainda estar em desenvolvimento, apresenta-se bastante promissora devido a, entre outros fatores: a pequena quantidade de material a ser manipulado; o tamanho reduzido dos equipamentos periféricos necessários; o conseqüente baixo custo e rapidez dos ensaios; a esperada alta confiabilidade dos resultados obtidos, a ser alcançada, em pouco tempo dada a grande quantidade de estudos sendo realizados neste assunto.

Um desenvolvimento adicional muito importante da presente proposta é a capacitação técnica para realização de alguns dos ensaios e análises requeridas para o programa de surveillance do material do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) onde amostras e/ou corpos de provas (incluindo aí amostras para SPT) dos diferentes materiais integrantes do núcleo do reator são posicionadas em regiões de fluxo elevados e removidas em intervalos regulares (5 anos ou mais) para avaliar as mudanças em suas propriedades com a irradiação.

## DETALHAMENTO DA PROPOSTA

### A. ÁREA DE ATUAÇÃO DA PROPOSTA

A área de atuação da presente proposta está inserida na Atividade 450, “Reator Multipropósito Brasileiro” do Programa 4, “Reatores Nucleares e Ciclo do Combustível”. A proposta visa desenvolver no Brasil alguns dos testes mecânicos necessários para o programa de surveillance de materiais do RMB.

### B. PRINCIPAL PROBLEMA A SER ABORDADO

Esta proposta está diretamente relacionada à necessidade de obtenção de propriedades mecânicas de materiais irradiados para utilização em projeto e manutenção de instalações nucleares do tipo reatores de pesquisa e de potência.

O levantamento de tais propriedades em componentes e/ou corpos-de-prova irradiados já constitui em si uma grande dificuldade pois depende muito da quantidade de massa a ser ensaiada visando a proteção do operador. Quanto menor a quantidade, mais seguro em termos de exposição do operador, se torna o ensaio. Também isto facilita a disposição final do material já ensaiado. Daí a necessidade de conduzir tais testes em amostras ou corpos-de-prova miniaturizados ou reduzidos. Além disso a própria irradiação de amostras e/ou corpos de prova nos reatores de pesquisa deve levar em conta o espaço reduzido disponibilizado para tais operações.

Estes tipos de ensaio em geral são realizados em instalações especialíssimas em alguns poucos laboratórios no mundo inteiro. O empreendimento RMB se propõe a construir e operar um destes laboratórios aqui no país e que presentemente está sendo denominado de Laboratório de Análises de Materiais Irradiados (LAMI).

Além disso o domínio de tais técnicas também permitirá atender não somente a demanda da área nuclear, como também necessidades de outras áreas onde a quantidade de amostras se torna um fator limitante, visto que os testes miniaturizados podem também ser olhados como um tipo especial de ensaio não destrutivo (“*quasi non destructive*”).

### C. OBJETIVOS A SEREM ALCANÇADOS

Os objetivos a serem alcançados são:

- Projeto e confecção de dispositivos mecânicos para realização de testes em amostras reduzidas (*small punch test* e outros)
- Realização preliminar de ensaios em materiais padronizados, não irradiados para correlação posterior com testes mecânicos convencionais.

- Seleção de materiais de aplicação nuclear para o levantamento de propriedades mecânicas na condição não irradiada. Preparo de um Banco de Dados.
- Projeto de engenharia de um dispositivo de testes miniaturizados com controle à distância visando a instalação do mesmo em células quente

#### **D. CENTROS DE PESQUISAS DO IPEN E RESPONSÁVEIS**

Centros de Pesquisas e Responsáveis:

- CCTM: Dr. Arnaldo H. Paes de Andrade
- CEN: Dr. Carlos Alexandre de J. Miranda

Os dois pesquisadores-responsáveis nos referidos centros comprovadamente vem apresentando, nos anos recentes, uma atuação conjunta na formação de pessoal através de cursos de pós-graduação no Ipen na área de Integridade Estrutural além de publicações científicas conjuntas com outros integrantes da equipe do projeto. Na presente proposta busca-se também a complementaridade das áreas de atuação de cada centro ou seja a abordagem experimental das propriedades dos materiais do CCTM com a abordagem numérica de modelagem de elementos finitos de componentes e estruturas do CEN.

#### **E. METODOLOGIA A SER SEGUIDA**

- Utilização de aplicativo CAD Solid Edge 3D e/ou CAD Solid Works 3D para projeto de dispositivos mecânicos de alta precisão
- Escolha de oficina especializada para a confecção destes dispositivos
- Aquisição de material básico (ligas metálicas) para testes mecânicos
- Realização de ensaios mecânicos em diferentes materiais
- Simulação Numérica destes ensaios pelo Método dos Elementos Finitos utilizando-se modelos 3D e/ou axissimétricos e considerando-se grandes deslocamentos e grandes deformações além do atrito entre as partes em contato
- Análise dos resultados obtidos e comparação com testes convencionais

#### **F. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICO/TECNOLÓGICAS DA PROPOSTA**

- Desenvolvimento de dispositivos protótipos para realização de ensaios mecânicos em amostras miniaturizadas
- Capacitação para a Realização de Testes Mecânicos em Materiais Irradiados com Nêutrons (Metais e Ligas Metálicas)
- Possibilitar a construção futura de um Banco de Dados de Propriedades Mecânicas de Materiais Irradiados

- Correlacionar as Propriedades Mecânicas medidas em corpos-de-prova miniaturizados com aqueles CPs de dimensões convencionais que já estão normalizados.
- Desenvolver projeto de dispositivo de ensaios mecânicos em amostras reduzidas com controle à distância (remoto) que possibilite a instalação do mesmo em células quentes.
- “Pavimentar” o caminho para a realização e análises de testes mecânicos de um programa de surveillance de reatores nucleares (em especial do RMB) utilizando corpos de prova miniaturizados.
- Desenvolvimento de Metodologia *in-house* de análise por Elementos Finitos da simulação de ensaios de Amostras Miniaturizadas.

#### G. ORÇAMENTO DETALHADO DA PROPOSTA

Ver Anexo 1.

#### H. CRONOGRAMA FÍSICO

Ver Anexo 2.

#### I. EQUIPE TÉCNICA INTERCENTROS

| Nome                       | Formação   | Vínculo                    | Obs                |
|----------------------------|------------|----------------------------|--------------------|
| <b>CCTM</b>                |            |                            |                    |
| Arnaldo H P Andrade        | Doutor     | Funcionário (Pesquisador)  | Coordenador        |
| Raquel M Lobo              | Doutora    | Funcionária (Tecnologista) |                    |
| Mariano Castagnet          | Mestre     | Funcionário (Técnico NM)   |                    |
| Marcelo Oliveira           | Técnico    | Funcionário (Técnico NM)   |                    |
| <b>CEN</b>                 |            |                            |                    |
| Carlos Alexandre J Miranda | Doutor     | Funcionário (Tecnologista) | Responsável no CEN |
| Miguel Mattar Neto         | Doutor     | Funcionário (Tecnologista) |                    |
| Altair A. Faloppa          | Engenheiro | Funcionário (Tecnologista) |                    |
| José Rodrigues de Lima     | Mestre     | Funcionário (Técnico NM)   |                    |

|                            |        |                   |  |
|----------------------------|--------|-------------------|--|
| Letícia dos Santos Pereira | Mestre | Aluna (Doutorado) |  |
| <b>EXTERNOS</b>            |        |                   |  |
| Aparecido E Morcelli       | Doutor | IC - SP           |  |
|                            |        |                   |  |

## J. DISPONIBILIDADE DE ESTRUTURA E APOIO TÉCNICO

### - Laboratório de Comportamento Mecânico (LCM) do CCTM

- Principais Equipamentos:
- Máquina de Ensaio Dinâmicos Instron 8800 (Servo-Hidráulica) Capacidade: 50 toneladas
  - Máquina Universal de Ensaio Mecânicos Instron 4400 (Eletro Mecânica) Capacidade 10 toneladas
  - Pendulo de Impacto Charpy Wolpert Capacidade 300 J
  - Durômetro Escala Rockwell C e B Wolpert

### - Infraestrutura Laboratorial do CCTM

### - Laboratório de Mecânica Computacional (LMC) do CEN

- Software:
- CAD Solid Edge 3D
  - CAD Solid Works 3D
  - ANSYS v18.2 (Inclui os Módulos Mechanical, LS-Dyna e CFD)
- Hardware:
- Workstation com processador Intel Xeon RAM 42Gb, HD 2x2Tb, Placa de Vídeo dedicada 4Gb
  - Plotter HP Designjet T770
  - Tamanho do Papel: A0
  - Computador com processador Intel Xeon CPU E5-2640 @ 2.0GHz
  - Windows 8.1 Pro, 64bits, RAM 48Gb, HD 2x2Tb, Placa de vídeo Nvidia K2000-2GB-DDR5-128bits
  - Computador com processador Intel Xeon CPU X5690 @ 3.5GHz
  - Windows 10 Pro, 64bits, RAM 40Gb, HD 1Tb

### - Laboratórios do Núcleo de Física do Instituto de Criminalística

- Facilidades:
- Análise microestrutural em ligas metálicas;
  - Análise por Difração de Raios X (DRX);
  - Microanálise qualitativa e semiquantitativa por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
  - Ensaio de tração em materiais;
  - Análise por instrumentos ópticos.



## K. QUANTIDADE PREVISTA DE PRODUÇÃO DE C&T

| Publicações                    | Tecnologias | Patentes | Congressos       |
|--------------------------------|-------------|----------|------------------|
| 10 Congressos<br>03 Periódicos | 02          | 01       | 08 Participações |

## L. DISPONIBILIZAÇÃO PARA MERCADO/SOCIEDADE

- . Um dos spin-offs da presente proposta é o domínio do procedimento de ensaios mecânicos em corpos-de-provas reduzidos ou miniaturizados.
- . Este tipo de teste pode ser disponibilizado para o mercado/sociedade como uma forma de prestação de serviços do Ipen.

## M. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Small Specimen Technique for Accessing the Mechanical Properties of Metallic Components, R. M. Lobo, A. H. P. Andrade, and A. E. Morcelli; International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2017 Belo Horizonte, MG, Brazil, October (2017)
- (2) Small Punch Test Evaluation of Intergranular Embrittlement of an Alloy Steel, Jai-Man Baik, J. Kameda, O. Buck. Scripta Metallurgica, Vol. 17, pp. 1443-1447, (1983).
- (3) The Use of Small-scale Specimens for Testing Irradiated Material, ASTM-STP 888, W.R. Corwin, G.E. Lucas (Eds.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (1986).
- (4) Small specimen test techniques for evaluation of tensile flow properties - Evolution and developmental activities at IGCAR, Kalpakkam. V. Karthik, K. V. Kasiviswanathan, P. Visweswaran, A. Vijayaragavan, K. Laha, T. Jayakumar, Baldev Raj. Nuclear Engineering and Design 330 538–549, (2018) .
- (5) Small punch testing for assessing the fracture properties of the reactor vessel steel with different thicknesses. Wang Zhaoxi; Shi Huiji; Lu Jian; Shi Pan, Ma Xianfeng. Nuclear Engineering and Design; v. 238 (12), p. 3186-3193 (2008).
- (6) Determination of the fracture properties of metallic materials using pre-cracked small punch tests. J. M. Alegre, I. I. Cuesta, H. L. Barbachano. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 2015, 38, 104–112. (2014).
- (7) Assessment of mechanical properties of Incoloy800H by means of small punch test and inverse analysis. S.Yang, Y. Cao, X. Ling, Y. Qian, Journal of Alloys and Compounds, 695, pp.2499-2505 (2017).

- (8) Deciphering deviation in mechanical properties of differently processed AISI 316L austenitic stainless steel using the small punch test. M. Song, N. P. Gurao, W. Qin, J. A. Szpunar, K. S. Guan, *Materials Science & Engineering A*, 628, pp.116-123 (2015).
- (9) Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test. T. E. Garcia, C. Rodríguez, F. J. Belzunce, C. Suárez, *Journal of Alloys and Compounds*, **582**, pp.708-717 (2014).
- (10) Quantification of brittle-ductile failure behavior of ferritic reactor pressure vessel steels using the Small-Punch-Test and micromechanical damage models. T. Linse, M. Kuna, H.-W. Viehrig. *Materials Science & Engineering A* 614 136–147, (2014).
- (11) Fracture toughness prediction of aged CF8M using small punch test. J.-Y. JEON, Y.-J. KIM, M.-Y. LEE, J.-W. KIM. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 2015, 38, 1456–1465. (2015).
- (12) Assessment of the constitutive properties from small ball punch test: experiment and modeling, E.N. Campitelli, P. Spatig, R. Bonade, W. Hoffelner, M. Victoria. *Journal of Nuclear Materials* 335 366–378, (2004).



