Grupo de Estudo de Geração Térmica-GGT

Ensaios de fluência com amostras reduzidas

FERNANDA FIGUEIREDO MARTINS DOS SANTOS(1); ROBERTA MARTINS DE SANTANA(1); BRUNO REIS CARDOSO(1); HELOISA CUNHA FURTADO(1); LUIZ HERIQUE DE ALMEIDA(2);
CEPEL(1);UFRJ(2);

RESUMO

Usinas termelétricas estão operando em condições mais severas de operação resultando em maiores taxas de degradação dos materiais empregados. Uma avaliação precisa do material operando sob condições de fluência requer a retirada de amostras para realização de ensaios de fluência uniaxial. Todavia, reparos subseqüentes são necessários, o que pode gerar danos às propriedades mecânicas do componente. Ensaios com amostras de dimensões reduzidas vêm sendo desenvolvidos para avaliação das propriedades em fluência dos componentes enquanto estes ainda estão em serviço. Esse trabalho objetiva apresentar resultados de ensaios de fluência com amostras de tamanho reduzido e sua correlação com os ensaios convencionais.

PALAVRAS-CHAVE

Usinas termelétricas, Amostras reduzidas, fluência,smallpunchcreeptest

1.0 - INTRODUÇÃO

Usinas termelétricas estão operando com temperaturas e pressões mais elevadas para suprir o crescente aumento da demanda de energia elétrica. Condições mais severas de operação resultam em uma maior taxa de degradação dos materiais empregados.

A fluência, definida como a deformação progressiva dependente do tempo, de um material sob tensão ou carregamento constante, é um dos principais mecanismos de danos de componentes que operam em elevadas temperaturas. Estima-se que 10% das paradas das plantas térmicas são causadas por fraturas por fluência em componentes de caldeiras. Danos por fluência podem ser limitantes na vida útil de componentes como superaquecedores e linhas de vapor.

Uma avaliação precisa do material operando sob condições de fluência requer a retirada de amostras para realização de ensaios de fluência uniaxial em laboratório. Esses ensaios têm sido empregados há décadas pela comunidade cientifica para avaliação e estudo do fenômeno da fluência em materiais. A avaliação de amostras retiradas de campo é considerada a única técnica válida para análise quantitativa do dano em materiais que operam nessas condições.

Todavia, reparos subsequentes, como preenchimento por solda nas áreas onde foram retiradas essas amostras são necessários, o que pode gerar novos danos às propriedades mecânicas do componente avaliado, além de elevar o custo da avaliação. Outra limitação é que há casos em que apenas um pequeno volume de material está disponível para análise, o que inviabiliza a realização de ensaios de fluência convencionais.

Em resposta a essas limitações e à crescente demanda em qualidade, confiabilidade e segurança nos processos de produção, principalmente no setor elétrico, diversos centros de pesquisas do mundo têm se empenhado no

(*)Av. Horacio Macedo, 354, – sala 124 - DME – CEP 21.941-911 Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6070 – Fax: (+55 21) 2280-3537 – Email: nandafms@cepel.br

desenvolvimento de metodologias e estudos para aumentar a precisão e a credibilidadenametodologia de avaliação de integridade dos materiais sujeitos a danos por fluência.

Consoante com esse objetivo, alguns testes mecânicos vêm sendo desenvolvidos para avaliação direta das propriedades em fluência dos componentes enquanto estes ainda estão em serviço. Estes testes são realizados em amostras retiradas destes componentes. O grande diferencial é que a retirada destas amostras não tem influência na continuidade da operação dos componentes avaliados, uma vez que elas têm um tamanho reduzido. Este procedimento, apesar de se tratar de uma avaliação mecânica, com retirada de material do componente avaliado, ainda é classificado como um método não destrutivo de análise, já que não exige reparo da área de amostragem.

O *small punch test* foi originalmente concebido no inicio dos anos 1980 (1) e focava a avaliação do efeito da irradiação nas propriedades de materiais utilizados em reatores nucleares, onde eram necessárias amostras de tamanho reduzido devido ao volume restrito de material disponível para análise.O principio do ensaio é a penetração de um punção ou de uma esfera – que pode ser de material cerâmico ou metálico – em uma amostra com formato de um disco plano, conforme pode ser visto no desenho esquemático apresentado na Figura 1. A amostra é fixada entre as matrizes (superior e inferior) e o punção penetra até um deslocamento específico ou a falha. O deslocamento do punção e as forças de reação são registrados durante a execução do teste (2, 3).

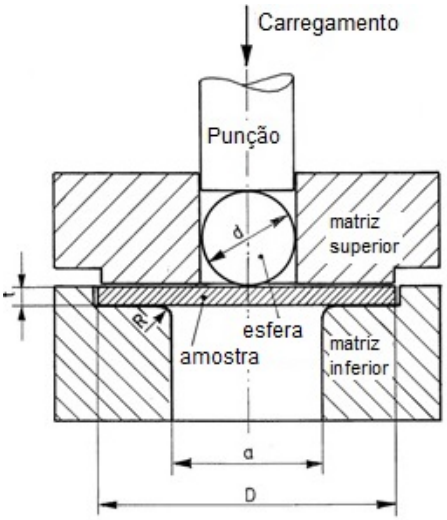

FIGURA 1 - Desenho esquemático do ensaio de *small punch*.

O emprego do ensaio de *small punch* é, na prática, criticamente dependente da existência de um procedimento confiável para comparação com os resultados dos ensaios de fluência convencionais. Em 2007 foi criado pelo Comitê Europeu de Normalização (CEN), o código de práticas *CEN Workshop Agreement* CWA 15627 (4), que fornece orientações para realização do ensaio de *small punch* em materiais metálicos e introduz metodologias para se estimar propriedades de tração, tenacidade à fratura e propriedades de fluência. Esse código recomenda a relação baseada na teoria de membrana descrita por CHAKRABARTY (5), conhecido como teoria de estiramento de membrana para correlacionar os resultados obtidos com os dos ensaios de fluência convencional.

Esse trabalho tem por objetivo apresentar os resultados iniciais obtidos com ensaios de fluência por *small punch* e sua correlação com os ensaios convencionais.

2.0 - METODOLOGIA

Para este trabalho empregou-se o aço 2,25Cr-1Mo, convencional de classe ferrítica, utilizado em aplicações que exigem resistência em elevadas temperaturas, com microestrutura ferrita-perlita, obtida por normalização e revenimento, seguidos de um tratamento de recozimento. O valor médio de dureza Vickers obtido foi de 139 ± 4HV, e está de acordo com a especificação nominal do aço em questão.

2.1 Ensaios de fluência uniaxial

Os ensaios de ruptura por fluência sob carga constante obedecem às recomendações contidas na norma ASTM E139 (2011). Ostestes de fluência foram realizados sob vácuo, para evitar os efeitos da oxidação nos resultados. Foram realizados 30 ensaios; 15 com corpos de prova convencionais (TP) e 15 corpos de prova de dimensões

reduzidas (TR), conforme mostrado na Figura 2. Os ensaios foram conduzidos com temperaturas variando entre 550ºC e 700ºC e tensões entre 40 e 200MPa.

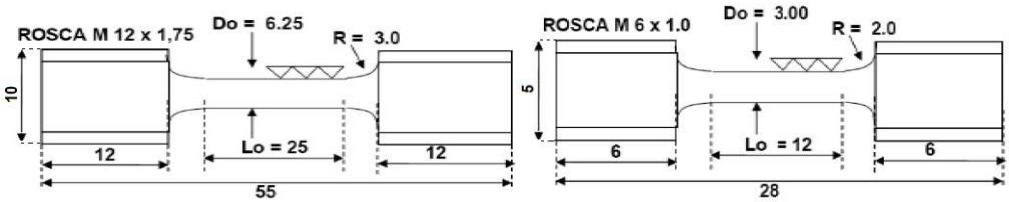

FIGURA 2 - Desenho dos corpos de prova de tração: (a) convencional - TP e (b) reduzido - TR. Dimensões em mm.

2.2 Ensaios de fluência por small punch

Os ensaios de fluência por *small punch* foram realizados seguindo as recomendações indicadas pelo código de práticas CWA 15627 (4). Os testes foram realizados em um equipamento desenvolvido pela *Kobe Material Laboratory* Co.,Ltd, do Japão, que engloba o sistema de aquisição de dados e o sistema de fornecimento de argônio, que mantém o fluxo de gás constante durante todo o ensaio. O corpo de prova utilizado possui 8mm de diâmetro e 0,5mm de espessura, Figura 3. A carga aplicada nos ensaios de *small punch* foi calculada com base na equivalência entre a força aplicada e a tensão dos ensaios de fluência uniaxial estabelecida pelo código de práticas CWA 15627 (2007), transcrita na equação 1.

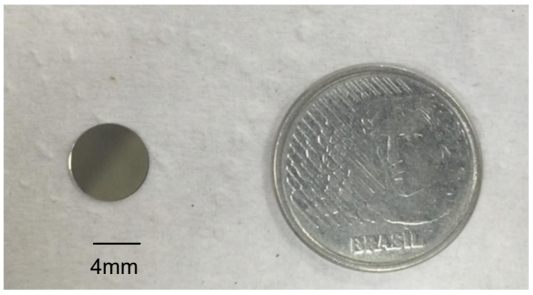

FIGURA 3 - Amostra do ensaio de fluência por *small punch.*

$$\frac{F}{\sigma} = 3{,}33 k_{SP} R^{-0{,}2} r^{1{,}2} h_0 \quad (1)$$

Foram realizados dois ensaios com temperatura de 600ºC, com as seguintes cargas: 190,5N e 247,5N.

2.3 Simulação numérica por elementos finitos

Com objetivo de avaliar o fenômeno de fluência e se obter uma melhor compreensão da relação entre o ensaio uniaxial e o ensaio de *smallpunch*, realizou-se uma simulação numérica por elementos finitos.

Para essa análise, o modelo de ajuste escolhido foi o de Norton (6) que é a função de tensão mais comumente utilizada, devido à simplicidade de cálculo. De acordo com a lei de Norton, a dependência da taxa mínima de fluência com a tensão mecânica aplicada pode ser expressa como:

$$\dot{\varepsilon}_S = A\sigma^n \quad (2)$$

$$A = A' exp(-Q_C/RT) \quad (3)$$

Onde n é o expoente da tensão, Q_C é a energia de ativação para fluência, R é a constante dos gases (8,314 J/mol.K) e T a temperatura absoluta. O parâmetro A' envolve variáveis microestruturais, como tamanho de grão, por exemplo.Para obtenção dos coeficientes são necessários dados de ensaios de fluência em diferentes condições de tensão e temperatura. Uma vez de posse dos valores de taxas de deformação no regime secundário e de tensões aplicadas, os coeficientes podem ser obtidos através de regressão linear num gráfico logσ x logε̇.

Para essa análise os dados levantados foram obtidos a partir dos resultados dos ensaios de fluência uniaxial, realizados a 600ºC, tanto para o corpo de prova convencional, quanto para o de dimensões reduzidas.

3.0 - RESULTADOS

3.1 Ensaios de fluência uniaxial

A Tabela 1 mostra os resultados dos ensaios de fluência uniaxial com os dois tipos de corpo de prova utilizados.

Conforme pode ser observado, os dois tipos de corpos de prova têm comportamentos similares, apresentando boa concordância nos resultados. A Figura 4 mostra comparativamente a variação dos parâmetros 'redução de área', 'alongamento na fratura' e 'tensão' *versus* o parâmetro de Larson-Miller (7) dos corpos de prova convencionais e de dimensões reduzidas.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de fluência uniaxial

CP nº	Temp (ºC)	Tensão (MPa)	Tempo ruptura (h)	Alongamento (%)	Redução de área (%)	Taxa min fluência (%/h)
TR/38	550	145	2767,91	29,4	83	0,0025656
TP/35	550	145	2654,61	26,2	81,3	0,0015667
TR/13	550	175	421,79	34,0	82,9	0,01801
TP/13	550	175	456,68	27,9	80,5	0,013044
TR/25	550	200	105,80	36,9	79,1	0,065647
TP/23	550	200	51,97	33,1	85,9	0,117538
TR/12	575	160	226,43	40,1	83,5	0,042424
TP/12	575	160	144,45	31,9	83,6	0,055875
TR/39	600	90	3151,6	42,5	91,5	0,0015646
TP/36	600	90	2182,27	27	81,9	0,0018989
TR/21	600	100	1406,02	36,5	86,5	0,004666
TP/24	600	100	1121,81	34	89,6	0,005731
TR/29	600	130	136,10	48,5	92,2	0,080162
TP/17	600	130	166,05	26,3	83,0	0,052145
TR/27	600	175	18,71	47,7	91,0	0,772396
TP/25	600	175	4,72	27,7	87,5	2,515108
TR/24	625	100	285,12	37,7	87,9	0,015575
TP/22	625	100	245,90	37,2	90,1	0,033337
TR/17	625	130	15,12	39,1	89,4	0,69572
TP/16	625	130	21,80	34,0	89,5	0,473862
TR/40	650	40	3327,18	39,4	91,0	0,0011428
TP/37	650	40	2773,09	26,6	90,9	0,00067073
TR/19	650	100	38,20	33,0	89,6	0,218516
TP/18	650	100	14,82	33,5	91,4	0,589785
TR/15	650	130	3,09	50,6	85,8	4,09587
TP/26	650	130	1,83	42,3	92,9	7,992254
TR/23	700	70	16,52	49,9	89,4	0,455146
TP/19	700	70	18,87	36,8	93,9	0,180074
TP/21	700	100	0,92	33,5	94,5	7,616926
TR/20	700	100	0,68	41,9	88,6	11,679173

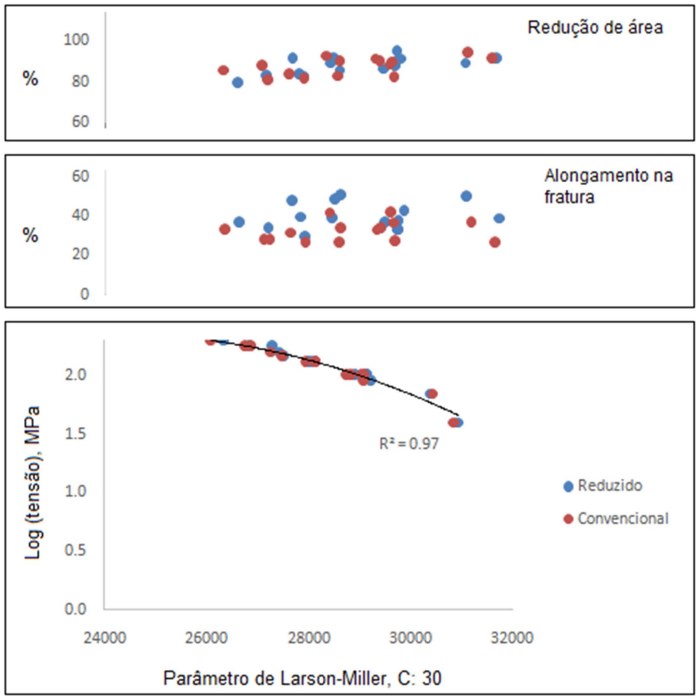

FIGURA 4 – Dados de ruptura por fluência dos corpos de prova convencional e de dimensões reduzidas.

O ponto no qual a ruptura ocorre é caracterizado por dois valores, o tempo de ruptura e o alongamento. Analisando os resultados dos corpos de prova de dimensões reduzidas, observa-se que eles seguem a clássica tendência em que maiores carregamentos e maiores temperaturas levam a menores tempos de ruptura.

3.2 Ensaios de fluência por *small punch*

A Tabela 2 mostra os resultados dos ensaios de fluência por *small punch*. Estão também apresentados os resultados dos ensaios equivalentes de fluência uniaxial – corpo de prova convencional e de dimensões reduzidas. A Figura 4 apresenta as curvas de fluência obtidas nos ensaios.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de fluência por *small punch*

CP	Temp (ºC)	Carga / Tensão	Taxa min fluência	Tempo ruptura (h)
SPT190,5	600	190,5 N	0,0003176 (mm/h)	406,2
TR/21		100MPa	0,004666 (%/h)	1406,02
TP/24		100MPa	0,005731 (%/h)	1121,81
SPT247,5	600	247,5 N	0,001255 (mm/h)	208,8
TR/29		130MPa	0,080162 (%/h)	136,10
TP/17		130MPa	0,052145 (%/h)	166,05

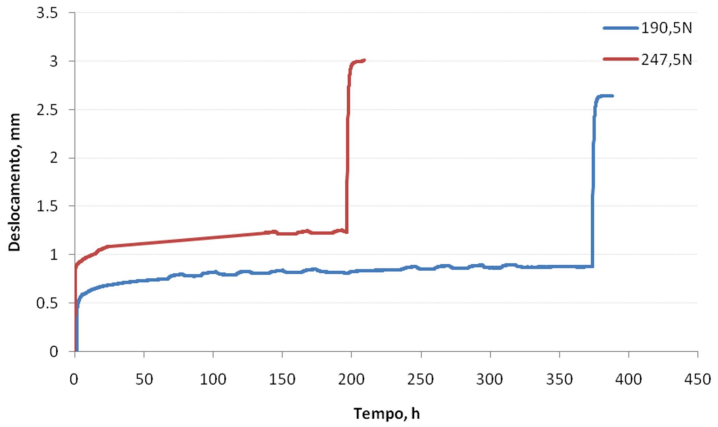

FIGURA 5 – Curvas de fluência obtidas nos ensaios de *small punch*

Os ensaios apresentaram curvas típicas de fluência, onde se podem identificar os três estágios bem definidos.

A comparação entre os resultados obtidos na primeira condição de ensaio (190,5N / 100MPa) mostra pouca ou nenhuma equivalência entre os parâmetros obtidos. O ensaio de fluência por *small punch* se mostrou bem mais conservativo, apresentando tempo de ruptura quase três vezes menor do que os obtidos nos ensaios uniaxiais. Por ter sido realizado um único ensaio, pouco se pode concluir acerca disso. Esse resultado pode estar relacionado à oxidação excessiva do corpo de prova, por exemplo. Novos ensaios devem ser realizados, a fim de se obter reprodutibilidade nos resultados.

O resultado obtido na condição de maior tensão / carga (130MPa e 247,5N) mostrou maior equivalência, com tempos de ruptura na mesma ordem de grandeza.

A taxa mínima de fluência para as duas condições de ensaio resultou em valores com uma ordem de grandeza menor para os ensaios de fluência por *small punch*, quando comparados com os ensaios convencionais.

3.3 Simulação por elementos finitos

A Tabela 3 apresenta os coeficientes da lei de Norton obtidos a partir dos ensaios de fluência uniaxial a 600ºC, cujos resultados estão expostos na Tabela 1. As Figuras 6 e 7 mostram os resultados de deslocamento obtidos nos ensaios de fluência por *small punch* com carga de 190,5N e 247,5N, respectivamente. Nos mesmos gráficos estão apresentados também os resultados da simulação numerica do ensaio de *small punch* utilizando os coeficientes obtidos a partir dos ensaios uniaxiais realizados, considerando os dois tipos de corpos de prova empregados. Conforme pode ser observado nas figuras, há uma boa relação entre os resultados experimentais e o simulado, validando o modelo utilizado.

Tabela 3 – Coeficientes da Lei de Norton

Corpo de prova uniaxial	**A**	**n**
Convencional	8,0233 x 10-30	10,6256
Reduzido	2,007 x 10-27	9,4113

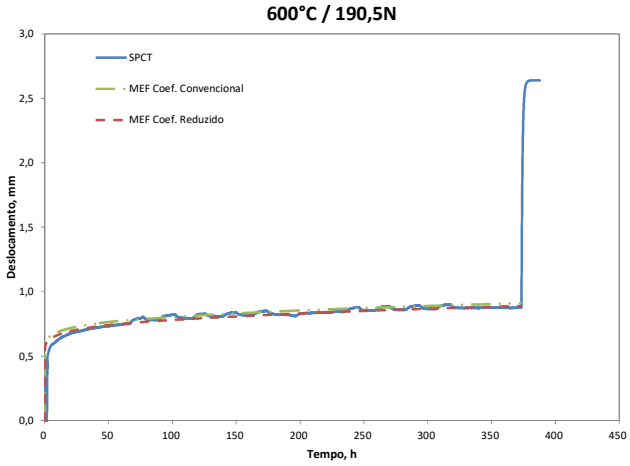

FIGURA 6 – Deslocamentos do ensaio de fluência por small punch e dos modelos de elementos finitos. Ensaio realizado a 600º e carga de 190,5N.

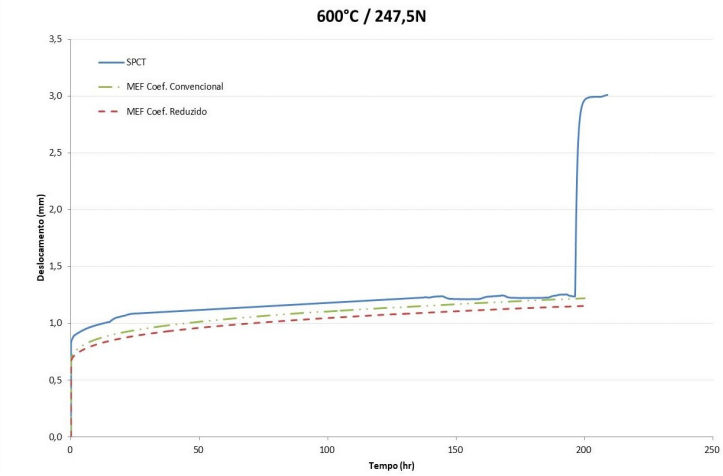

FIGURA 7 – Deslocamentos do ensaio de fluência por small punch e dos modelos de elementos finitos. Ensaio realizado a 600º e carga de 247,5N.

3.0 - CONCLUSÃO

- Os resultados dos ensaios de fluência uniaxial com corpos de prova convencionais e de dimensões reuzidas mostras ótima correlação. Estes resultados mostram que os ensaios com amostra reduzidas podemsubstituir o ensaio convencional. Esse fato é particularmente importante quando se pretende avaliar componentes em que há pouco material disponível para análise.

- Os resultados dos ensaios de fluência por *small punch* apresentaram curvas típicas de fluência, com os três estágios bem definidos.

- Em uma das condiçoes de ensaio, o valor obtido de tempo de ruptura foi menor, quando comparado aos resultados dos ensaios uniaxiais. O número reduzido de amostra não permite conclusões fidedígnas, mas esse comportamento pode estar associado à oxidação do corpo de prova. Novos ensaios deverão ser realizados.

- De acordo com os resultados da simulação numérica, pode-se concluir que o ensaio de fluência por *small punch* pode ser modelado utilizando leis de fluência relativamentes simples, como a Lei de Norton. Os resultados mostraram que há uma estreita correlação, em relação ao comportamento em fluência, entre o ensaio de *small punch* e o ensio uniaxial

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) MANAHAN, M., ARGON, A., HARLING, O., 1981, "The development of a miniaturized disk bend test for the determination of post-irradiation mechanical properties", *Journal of Nuclear Mat.*, v.103-104, pp.1545-1550.

(2) BLAGOEVA, D., HURST, R., 2009, "*The Small Punch Test for Creep and Fracture Prediction – Development of Lifetime Prediction Methodology for Creep and Fracture Behaviour of Ferritic-Martensitic Steels using Small Punch Testing Technique",* Editora VDM VerlagDr Müller

(3)HULKA, J., KUBIK, P., PETRUSKA, J., 2012, "Sensitivity analysis of small punch test", *in 18th International Conference Engineering Mechanics 2012*, Srratka, Czech Republic paper 128, pp.461-468

(4) CWA 15627, 2007, "Small Punch Test Method for Metallic Materials", CEN Workshop Agreement, European Committee for Satndardization

(5) CHAKRABARTY, J., 1970, "A theory of stretch forming over hemispherical punch heads", *International Journal of Machanical Sciences*, v.12, issue 4, pp.315-325

(6) NORTON, F.H., 1929, The Creep of Steel at High Temperature. McGraw-Hill, New York.

(7) LARSON, F.R., AND MILLER, J., 1952, "A Time-Temperature relationship for Rupture and Creep Stress''. Trans ASME, v.74, pp. 765

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Fernanda Figueiredo Martins dos Santos

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2006) e é mestre em Ciências em Engenharia Metalurgica e de Materiais pela COPPE/UFRJ (2011). Trabalha como Pesquisadora II na ELETROBRAS CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, onde desenvolve trabalhos nas áreas de Avaliação de Integridade Estrutural em Plantas Térmicas, Análise de Falhas, Extensometria, Prognóstico e Monitoração. É autora de 3 capítulos dos livros; Análise de Falhas em Materiais Utilizados em Equipamentos Elétricos; - Volumes 2 e 3; além de diversos trabalhos técnicos em sua área de atuação. Atualmente é aluna do curso de doutorado do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ.