

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO TÉRMICA - GGT

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA ENSAIOS DE FLUÊNCIA EM AMOSTRAS REDUZIDAS EM COMPONENTES DE USINAS TERMELÉTRICAS

ROBERTA MARTINS DE SANTANA(1);BRUNO REIS CARDOSO(1);HELOISA CUNHA FURTADO(1);ALESSANDRO WILLY GONÇALVES DA SILVA(2);LUIZ ALBERTO FERREIRA DA SILVA CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA CEPEL(1);TORRES ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA(2)

RESUMO

A literatura indica que resultados de ensaios de “small punch creep test” (SPCT) podem ser considerados como uma ferramenta para obtenção de propriedades de fluência. Os resultados deste tipo de ensaio podem ser correlacionados com os resultados de ensaios convencionais, embora ainda de forma empírica. O objetivo deste IT é apresentar o desenvolvimento de um dispositivo para realização de ensaios do tipo SPCT que funciona em uma máquina de ensaio convencional de fluência do fabricante Zwick//Roell, com célula de cargas de 50KN. Tal procedimento pretende reduzir os custos de inspeção e manutenção em equipamentos de geração termelétrica.

PALAVRAS-CHAVE: FLUÊNCIA, “SMALL PUNCH”, ENSAIO, MANUTENÇÃO

1.0 INTRODUÇÃO

De maneira clássica, fluência é definida como deformação plástica, dependente do tempo e termicamente assistida de componentes sob carregamento constante abaixo do limite de escoamento.

A forma tradicional de medir as propriedades de fluência nos materiais é um conjunto de testes usando corpos de prova convencionais, com carregamento uniaxial, em uma determinada faixa de tensão, a uma temperatura e deslocamento constantes. O registro se faz através do traçado de uma curva deformação x tempo. A principal limitação deste ensaio é a necessidade de um grande volume de material para a confecção dos corpos de prova. A Figura 1 apresenta um exemplo de modelo de corpo de prova de fluência com geometria convencional e suas dimensões.

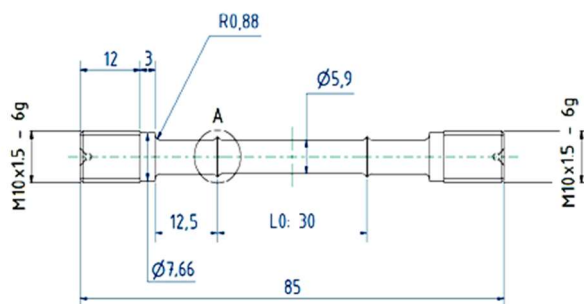


Figura 1 - Dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio de fluência convencional [1].

Para superar esta restrição, um conceito de amostragem não destrutiva foi originalmente concebido no início dos anos de 1980 nos Estados Unidos da América, quando foram publicados os primeiros trabalhos sobre esta técnica de ensaio. Existem relatos, na literatura, de que este mesmo teste estava sendo desenvolvido em paralelo no Japão, na mesma época.

1.1 Ensaio de Fluência em Amostras Reduzidas

As técnicas que utilizam amostras em tamanho reduzido permitem a caracterização das propriedades mecânicas usando um volume extremamente pequeno do material. Embora tenham sua origem em programas de desenvolvimento de materiais para a indústria nuclear, os ensaios feitos com amostras em miniatura encontram aplicações muito promissoras no campo da avaliação da vida remanescente, análise de falhas, avaliação de propriedade após soldagens, revestimentos, efeito da radiação em materiais utilizados para fins nucleares, etc [2]. Basicamente existem dois tipos de ensaios de fluência em corpos de prova reduzidos: ensaio de fluência uniaxial e o ensaio de fluência por “small punch”, também conhecido como “Small Punch Creep Test” (SPCT). Neste Informe Técnico trataremos apenas do tipo “SPCT”.

1.1.1 “Small Punch Creep Test” (SPCT)

O ensaio “small punch” é um método de teste em amostras reduzidas, usando uma amostra em forma de disco pequeno para determinar as propriedades mecânicas do material. É comparável a uma pequena estampagem profunda, na qual a amostra é deformada até a falha. Devido à pequena quantidade de material necessário, a aplicação deste método é particularmente adequada em situações onde a degradação do material provoca mudanças no comportamento mecânico do equipamento.

As deformações que são produzidas a partir de tais testes estão relacionadas às dimensões do punção/amostra e ao comportamento elástico, plástico e de fluência do material de teste, sob condições de contato e grande deformação, em temperatura elevada [2].

As matrizes usadas no equipamento de ensaios “small punch” são mostradas esquematicamente na Figura 2. A amostra em forma de disco de diâmetro $(8 \pm 0,08)$ mm e espessura $(0,5 \pm 0,25)$ mm [3] é posicionado sobre o orifício da matriz inferior. As duas partes da ferramenta são apertadas, de modo que haja uma distância muito pequena entre o molde superior e o disco. Durante o ensaio, uma carga constante atua na amostra. Essa carga é transferida para a amostra por meio de um punção com um penetrador de raio entre 1mm e 1,25mm. Durante o carregamento, o disco se deforma para dentro do orifício da matriz inferior, devido ao efeito da fluência. A ferramenta, como descrita, é colocada num bloco de apoio, que está situado no interior de uma câmara de vácuo, ou em atmosfera de argônio, e um forno. A temperatura é monitorada por um termopar posicionado bem próximo ao disco. A deflexão da amostra é medida por meio de um dispositivo de medição digital com uma precisão de 0,1 mm, e é registrada continuamente por computador.

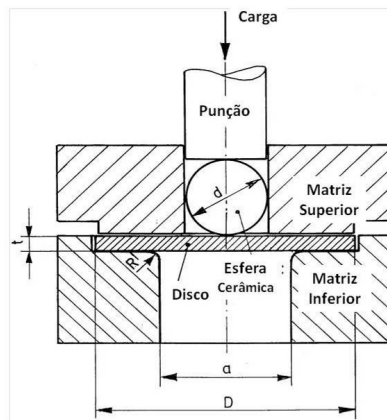


Figura 2 - Desenho esquemático do equipamento de ensaio para o “Small Punch Test”. [4]

Existem numerosos fatores que influenciam no resultado do “Small Punch Test”. Um deles é a atmosfera em que o ensaio é realizado. Uma série de ensaios de fluência por “small punch” foi realizada em ar e vácuo por Tabuchi [5] no Instituto Nacional de Ciência dos Materiais (NIMS) no Japão. Tabuchi [5-6] observou que o tempo de ruptura do ensaio de fluência por “small punch” ao ar foi a metade do tempo em vácuo, devido a um aumento na tensão na amostra. A Figura 3 mostra a relação entre a carga F aplicada e tempo de ruptura t_r obtidos por Tabuchi [5] nos ensaios de fluência por “small punch”. A comparação é feita usando círculos abertos (no vácuo) e os círculos sólidos (no ar). A comparação entre as máquinas de ensaio foi feita utilizando sólidos quadrados (máquina # 1) e os sólidos circulares (máquina # 2), ambos os ensaios foram conduzidos em ar mas com orifícios de raios distintos. O raio a que se refere a Figura 3 equivale a metade da dimensão a (ou seja, $a/2$) na Figura 2.

Na utilização do ensaio de “SPCT” para a avaliação de vida residual de caldeiras ou turbinas em serviço, é importante avaliar a relação entre o carregamento do “Small Punch Creep Test” e o carregamento da fluência uniaxial [4,7].

A configuração de carregamento no “SPCT” é tal que o material é testado em um estado de tensão predominantemente biaxial. Por consequência, o teste difere significativamente de um ensaio de tração ou de ruptura por fluência convencional, em que o estado de tensões é uniaxial, e difere de ensaios mecânicos de fratura padrão, por que no caso do “SPCT” o corpo de prova não se comporta como uma viga e sim como uma membrana; ou seja, não está apoiado sobre dois pontos. No caso do “small punch”, parte do corpo de prova – a borda de dimensões $(D-a/2)$ - é mantida apoiada em toda sua circunferência sobre a matriz inferior.

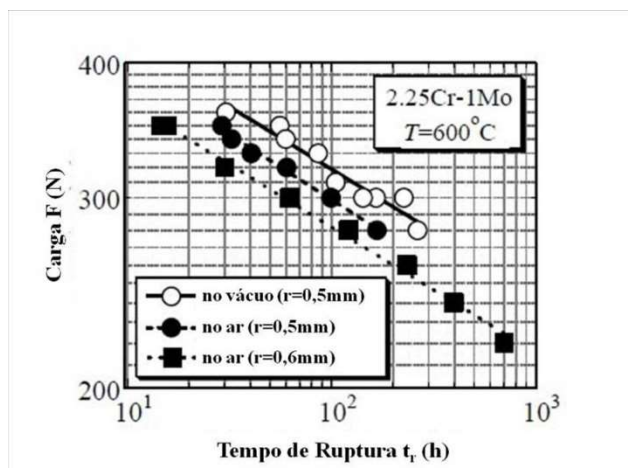


Figura 3 – Resultados do ensaio de fluência por SPCT do aço 2.25Cr-1Mo no vácuo e no ar [5].

Um pré-requisito importante para a aplicação prática de amostras reduzidas em forma de discos é o conhecimento de uma relação entre a força aplicada nestas amostras e a tensão no teste de fluência convencional. Vários trabalhos usando o método de elementos finitos têm sido propostos para encontrar uma relação entre testes convencionais e testes “small punch”. Em geral, certa concordância é encontrada entre a curva de carga-deflexão da amostra “small punch” e a curva de tensão-deformação obtida por testes de tração convencionais à temperatura ambiente usando um dos métodos de elementos finitos. Em fluência de alta temperatura, os cálculos são limitados para o estágio de fluência secundária, e carece de uma análise exata do comportamento de ruptura no teste “small punch”. Uma segunda forma de obter as relações entre os testes convencionais e os testes “small punch” consiste na comparação de resultados experimentais. Para a carga de escoamento e a carga final na variante de taxa constante do teste de “small punch” à temperatura ambiente, tal comparação foi feita por Norris e Parker em 1996. Em fluência de alta temperatura, a comparação pode ser baseada em testes “small punch” e testes convencionais de mesma duração, ou seja, de mesmo tempo para ruptura. A comparação dos resultados obtidos pelo Round Robin realizado no Conselho Europeu de Pesquisa de Equipamentos de Pressão (EPERC) [8] indica que a relação entre a carga no teste de “small punch” e a tensão mecânica na fluência uniaxial é constante.

Os resultados dos testes “small punch” são curvas de deflexão em função do tempo. A Figura 4(a) mostra a relação entre a deflexão no ponto de aplicação da carga e o tempo (curvas de fluência), que foi obtido por Kanaya [9-10] a partir do “Small Punch Creep Test”. A Figura 4 (b) mostra a relação entre a taxa de deflexão e a deflexão, também semelhante a curva de taxa de deformação em função da deformação obtida a partir do ensaio de fluência uniaxial convencional [8].

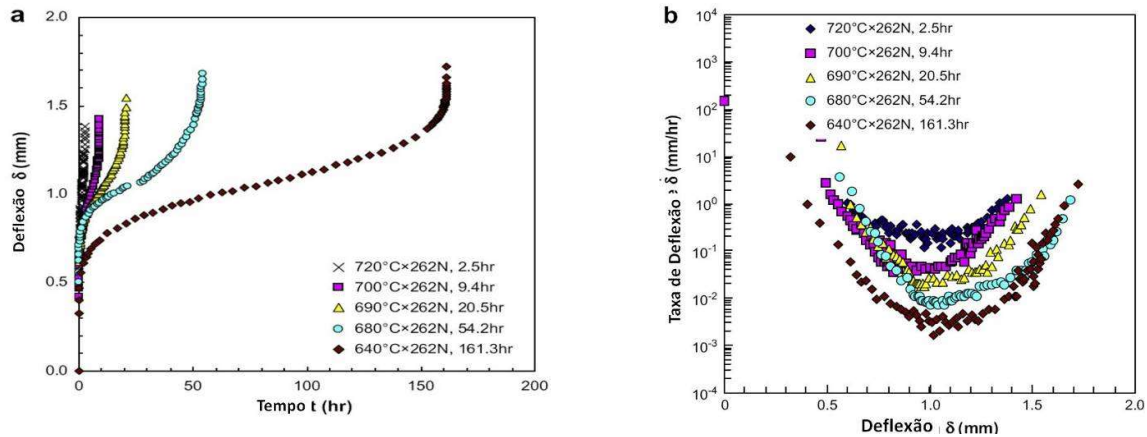


Figura 4 - (a) Curvas de fluência do aço 2,25Cr-1Mo ensaiado por "SPCT" (b) taxa de deflexão central em relação à deflexão do aço 2,25Cr-1Mo ensaiado por "SPCT" [11].

Para determinar a carga a ser aplicada no ensaio de fluência por "small punch" deve-se responder à questão: "Qual o valor da carga para obter o mesmo tempo de ruptura que em um ensaio de fluência uniaxial?". Entretanto, essa pergunta não é fácil de ser respondida, pois a tensão não é constante durante a deformação por fluência. Após o carregamento, as deflexões são muito pequenas, e o balanço de carga ocorre, principalmente, através de tensões de cisalhamento induzidas por momentos de flexão. À medida que a deflexão prossegue, o aumento do balanço de carga ocorre, principalmente, através da tensão de membrana, que varia com a deflexão e a espessura.

A carga aplicada em qualquer ensaio deve ser determinada a partir de fatores geométricos e das propriedades do material, de modo que a falha por fluência no ensaio de "small punch" ocorra no mesmo tempo que no ensaio de fluência uniaxial convencional à mesma temperatura. Para o caso em que não há nenhuma informação prévia sobre o comportamento esperado, a razão da carga do "Small Punch Creep Test" (F) para a tensão de fluência uniaxial (σ), é dada por [6]:

$$F/\sigma = 3,33KSP R-0,2 r1,2 h \quad (1)$$

onde:

F – Força do punção do "Small Punch Test" (N)
 σ – Tensão axial do ensaio de fluência (MPa)
 r – Raio do punção (penetrador)(mm)
 t – Espessura da amostra teste (μ m)
 $a/2$ – Raio do orifício que recebe o punção. (mm)
 Kps – Fator de correlação do "Small Punch Creep Test"
 R – raio do corpo de prova

Este Informe Técnico (IT) tem por objetivo apresentar o desenvolvimento inicial de um dispositivo para realização de ensaios do tipo "SPCT", que funciona em uma máquina de ensaio convencional de fluência em atmosfera de argônio – atmosfera inerte. Pretende-se com este equipamento realizar ensaios de fluência em corpos de provas muito reduzidos (8 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura) de componentes de alto valor financeiro, como turbinas e geradores, sem que os mesmos sejam retirados de serviço. Portanto, os ensaios passam a ser classificados como não destrutivos. Tal procedimento reduz os custos de inspeção e manutenção em equipamentos trabalham sob regime de fluência.

A máquina de fluência convencional a ser adaptada neste Informe Técnico é uma máquina do tipo braço de alavanca com sistema de molas e célula de cargas de 50kN e temperatura máxima de trabalho de 1000°C. O modelo de máquina utilizado, Zwick/Roell® Kappa 50 LA, permite realizar ensaios convencionais de fluência, relaxação de tensão, compressão e cisalhamento. A Figura 5 apresenta a máquina de fluência a ser adaptada no Laboratório de Fluência do Cepel.



Figura 5 – Máquina de Fluência Convencional Zwick/Roel modelo Kappa 50 LA.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Construção do Dispositivo de Adaptação

A construção do dispositivo de adaptação da máquina de fluência convencional Zwick//Roel modelo Kappa 50 LA para realizar ensaios de fluência do tipo “small punch” foi baseado no artigo publicado por Singh *et al* em 2014 [10]. Neste artigo, o modelo de máquina convencional de fluência usado é o Kappa 50SS de mesmo fabricante e semelhante ao equipamento que está no laboratório de fluência do Cepel. A similaridade mais importante entre as duas máquinas é o avanço a partir de um fuso central, permitindo um deslocamento na direção vertical e ascendente, o que permite que o corpo de prova seja pressionado, neste sentido, contra o punção. O modelo Kappa 50 LA, usada neste projeto, possui célula de cargas que garante aplicação suave do carregamento.

O dispositivo de adaptação é constituído por um conjunto de matrizes superior e inferior, suporte de matrizes e punção com ponta hemisférica de 2,5mm. Todas as peças foram fabricadas em aço inox 316, uma vez que este aço é destinado a trabalhos em alta temperatura. A Figura 6 apresenta o conjunto de peças que constituem o dispositivo de adaptação da máquina de fluência convencional.

2.2. Montagem do Dispositivo

A amostra em forma de disco com 8 mm de diâmetro e 500µm de espessura é fixada rigidamente entre o conjunto de matriz superior e inferior. As matrizes são fixadas no suporte de matrizes e este conjunto, matrizes superior e inferior e suporte de matrizes, são rosqueadas a uma haste bipartida inferior, conforme Figura 7. O punção é rosqueado em uma garra fixada por rosca a uma haste superior. Punção e amostra são aproximados pela movimentação do fuso central. Três termopares são distribuídos ao longo do dispositivo de forma a garantir que a amostra alcance a temperatura desejada antes de começar o ensaio. Os extensômetros são fixados por forquilha ao punção.

(C)



(D)



Figura 7 - Montagem do dispositivo. (A), (B) vista geral da montagem, (C) matrizes superior e inferior e (D) punção.

2.3 Funcionamento do Dispositivo

A amostra é carregada maneira compressiva contra um punção de ponta hemisférica. Um ambiente de gás argônio envolve o entorno da amostra e a ponta do punção para evitar a oxidação de ambos durante o teste. No caso da amostra, esta oxidação faria a vida em fluência diminuir por redução de espessura em função do crescimento da camada de óxido e não por degradação microestrutural. O espaço de purga de argônio é muito pequeno e bem controlado, resultando em um consumo muito baixo de gás inerte – um cilindro de gás argônio de 10m³ tem duração superior a 1000h de ensaio. Todo o conjunto é, então, aquecido até a temperatura de ensaio e um tempo de “encharque” de 1h é aguardado. Ao final do tempo de encharque, uma pequena pré-carga de ensaio é aplicada e esta se mantém por 10s. Após passado o tempo da pré-carga, esta é retirada e a carga total de ensaio é então aplicada a uma velocidade de 0,5 mm/s. A carga total se mantém aplicada até a fratura da amostra e a deformação do corpo de prova (amostra) é registrado ao longo de todo o ensaio. O *software* da máquina é capaz de determinar automaticamente - baseado em uma rotina de checagem pré-estabelecida - a ruptura do corpo de prova e então parar o ensaio

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como forma de validar o dispositivo de adaptação e o ensaio, uma fase inicial de testes sem registro de curvas foi realizada, de modo a verificar se a máquina seria capaz de aplicar a carga na velocidade desejada e mantê-la por um período razoável de tempo. Esta fase inicial de testes foi concluída com sucesso.

Terminada a sequência de testes iniciais, uma segunda fase com 3 testes em alta temperatura e sem atmosfera de argônio foi realizada em amostras de aço 2,25Cr-1Mo, porém estes com registro das curvas. Todos os ensaios de validação foram realizados utilizando carga constante de 400N e temperatura de 600°C. Os ensaios da segunda fase se comportaram de forma positiva, com durabilidade dentro da faixa de tempo estimada, respeitando a dispersão inerente ao ensaio e com curva deformação x tempo apresentando os três estágios típicos de fluência, conforme mostra a Figura 8.

Uma vez encerrada a segunda fase, iniciou-se a terceira fase de ensaios, mantendo as mesmas condições de ensaio da etapa anterior, porém agora com a atmosfera de gás inerte. Até o momento da emissão deste informe técnico, o primeiro ensaio desta terceira fase, iniciado no dia 21/04/2021, ainda não terminou, conforme mostra a Figura 8. Este resultado indica que a atmosfera de argônio – gás inerte utilizado no ensaio - tem atuado positivamente na proteção da amostra contra a oxidação e evitando a perda de espessura por tal motivo. Este ensaio está extrapolando em mais de 500h, até o momento, o resultado médio dos 3 (três) ensaios realizados nas mesmas condições e sem a atmosfera de gás inerte.

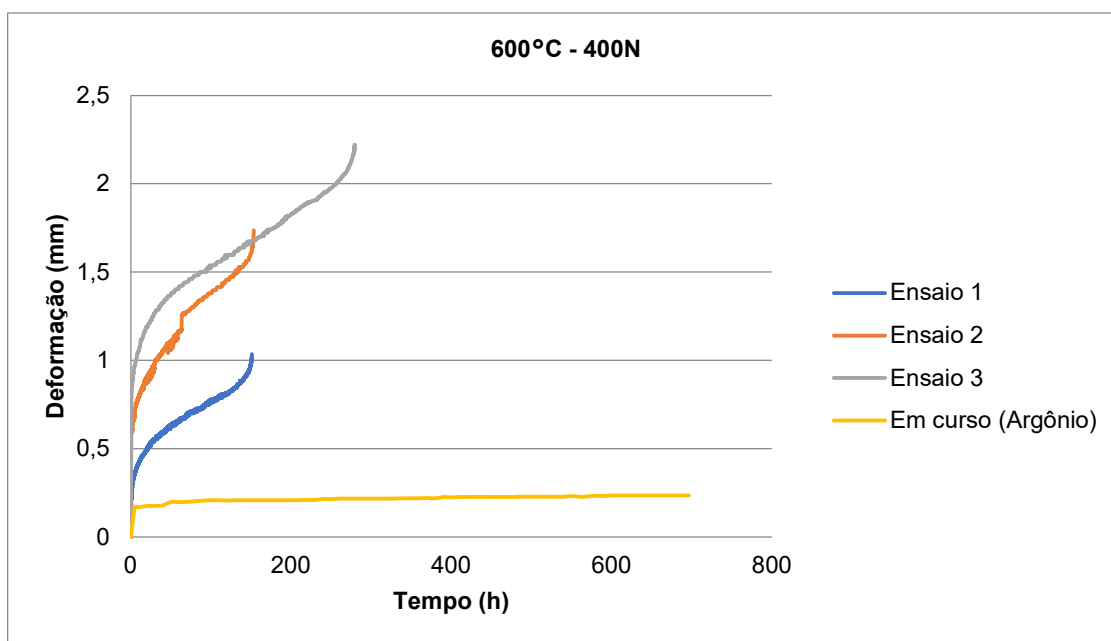


Figura 8 – Curvas de fluência “small punch” obtidas utilizando o dispositivo de adaptação.

4 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados conclui-se que o dispositivo proposto neste informe técnico é funcional e gera curvas de fluência satisfatórias que entregam dados confiáveis para as solicitações exigidas. Todas as curvas apresentadas foram obtidas a partir das mesmas condições de ensaio e as diferenças entre elas estão dentro do padrão de dispersão estabelecido para a fluência. Entretanto, a equipe de desenvolvimento acredita que mais ensaios devam ser realizados, com outros tipos de solicitações, até que se alcance a configuração máxima possível para realizar ensaios em atmosfera de vácuo, objetivo final deste projeto.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. DIN ISO 2768 m – “General tolerances; geometrical tolerances for features without individual tolerances indications”, DIN, Germany, 1989.
2. European Commision Joint Research Centre - Institute for Energy and Transport Safety of Future Nuclear Reactors Unit, Annex I to Contract 108798, “NL-Petten: the supply, installation and warranty of 2 small punch creep test rigs at the JRC-IET”, Technical Specifications; TS-C108798.
3. Blagoeva, D., Hurst, R. “Application of the CEN (European Committee for Standardization) small punch creep testing code of practice to a representative repair welded P91 pipe”, Materials Science and Engineering A, 2009, v.510-511, pp.219-223.
4. Kanaya A, Kusumoto J, Nagae M, Kobayashi T, Miyamoto T, Takubo K., “The development of boiler on-site sampling device for small punch creep tests”. Mechanics Engineering Congress JSME MECJ-05 ;5(1), pp:333–4, 2005.

5. Kobayashi, K.; Kaneko, M.; Koyama H.; Stratford, G.C. and Tabuchi, H., "The influence of both testing environment and fillet radius of the die holder on the rupture life of small punch creep test"; Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, vol. 6, no 8, pp. 925 – 933, 2012.
6. Yang, Z. and Wang, Z.-W., "Relationship between strain and central deflection in small punch creep specimens". Int. J. Press. Vess. Piping, 80,397–404, 2003.
7. Kanaya A, Kusumoto J, Nagae M, Kobayashi T., "Residual creep life evaluation by small punch creep test". Mechanics Engineering Congress JSME MECJ-05; 5(1), pp.331–2, 2005.
8. European Pressure Equipment Research Council - Inspection European Approach to Pressure Equipment Inspection EPERC Bulletin Nr 2 Petten, October 1999 Ed. Jean-Bernard Veyret, Guy Baylac.
9. Furtado, H., "Avaliação de danos em aços ferríticos Cr-Mo operando em regime de fluência", PhD thesis, COPPE/UFRJ, Brazil, 2004.
10. Hyde T. H., Stoyanov M., Sun W. and Hyde, C.J., "On the interpretation of results from small punch creep tests", J. Strain Analysis, Vol. 45 pp. 141-164, 2009.
11. Izaki T, Kobayashi T, Kusumoto J, Kanaya A, "A creep life assessment method for boiler pipes using small punch creep test", International Journal of pressure Vessels and Piping 86, pp. 637-642, 2009.

DADOS BIOGRÁFICOS



Formada em Licenciatura em Matemática pela Unigranrio e Mestra em Ciências, em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela UFRJ. Atualmente cursando o Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela UFRJ. Técnica em Mecânica Industrial pelo CEFET-RJ atuando na área desde 1998. Trabalha desde 2006 no área de metalografia e análise de falhas no CEPEL – Ilha do Fundão. Experiência em Microscopia Eletrônica, Preparação Metalográfica de Amostras e Preparação de Amostras para Microscopia Eletrônica, Análise de Falhas, Ensaio de Fluência e Fluência Small Punch e Inspeção em Caldeiras Termelétricas. Trabalhou de 2000 a 2001 na GE Aircraft Engines - Petrópolis/RJ

(2) BRUNO REIS CARDOSO

Possui graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (2004), mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (2007) e doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2017). Atualmente é pesquisador II do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Engenharia de Materiais e Metalúrgica, atuando principalmente nos seguintes temas: alta temperatura, avaliação de integridade, fluência, estimativa de vida residual.

(3) HELOISA CUNHA FURTADO

Engenheira metalúrgica e de materiais formada pela UFRJ, tendo concluiu o mestrado e o doutorado na COPPE/UFRJ na mesma área. Realizou curso d MBA em Energia no IBMEC e pós-doutorado no Instituto Técnico de Lisboa na área de materiais para usinas termelétricas. Trabalha desde 1986 no CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) atuando na área de Avaliação de Integridade Estrutural em Plantas Térmicas. É membro da ABRAGE desde a sua fundação, atuando no grupo de Trabalho de manutenção de Usinas termelétricas (GTMT). É coordenadora da Comissão de Inspeção de equipamentos do Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP).

(4) ALESSANDRO WILLY GONÇALVES DA SILVA

Técnico em mecânica industrial pelo (Centro Tecnológico Fluminense). Técnico em eletrotécnica e automação industrial pela escola (Electra) além de outros cursos de aperfeiçoamento. Onze anos de experiência na área de mecânica e controle operacional. Atualmente atua como técnico em mecânica para o laboratório de Metalografia no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica CEPEL- Eletrobrás.

(5) LUIZ ALBERTO FERREIRA DA SILVA

Graduação em Bacharel e Licenciatura em Química pela Faculdade de Humanidades do Colégio Pedro II _RJ (1994) e Técnico em Química pela Escola Técnica Federal de Química-RJ (1986). Atua desde 1987 colaborando nas pesquisas e atividades desenvolvidas pela Área de Análises Químicas com ênfase em fluidos isolantes, nanomateriais, ligas metálicas, polímeros, compósitos, tintas, solos. Participa na Comissão de Estudos ABNT/CE-003:010.001 – óleos Minerais Isolantes, ABNT/CE-003:010.002 – Outros Óleos isolantes (sintéticos e naturais) e ABNT/CE-003:010.003 – Isolantes Gasosos. Diretor do CRQ/RJ no período 2009 a 2014, atualmente integra também o Conselho do CRQ-RJ (2014-2023).