# EDITAL PIBIC/FAPEMIG CHAMADA nº 1/2022

# Projeto de Pesquisa

**“Comissionamento Mecânico, Elétrico, Pneumático e de Instrumentação da Máquina para Realizar Estudos de Fadiga Térmica”**

### Coordenador: Luiz Leite da Silva

### Instituição Executora: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN)

Maio 2022

# resumo

A Fadiga Térmica é um fenômeno que ocorre em componentes metálicos de centrais nucleares e da indústria convencional que são submetidos a frequentes flutuações de temperatura. Nas centrais nucleares, as flutuações de temperatura ocorrem principalmente devido ao escoamento do fluido refrigerante em baixas velocidades, tanto no circuito primário quanto no secundário. A combinação de escoamento a baixas velocidades e com fluidos em temperaturas diferentes nas tubulações causam o fenômeno de estratificação térmica. Este fenômeno provoca tensões e deformações devido à diferença de temperatura entre as regiões superior e inferior da seção transversal da tubulação, causando assim danos semelhantes a choques térmicos repetitivos. Em uma central nuclear as principais linhas de tubulações mais sensíveis ao fenômeno da estratificação térmica são: a linha do sistema de resfriamento do reator, a linha de surto e de spray do pressurizador, a linha de sistemas auxiliares e de remoção de calor residual. A estratificação térmica ocorre também em componentes como: bocais, carcaças de bombas, corpo de válvulas, e derivações onde há fluido estagnado.

A Fadiga Térmica é um dos mecanismos que gradualmente reduz a vida útil dos componentes, modificando suas propriedades e levando a abertura de trincas. Assim, o objetivo deste projeto é comissionar a máquina de fadiga térmica construída pelo CDTN para avaliar a velocidade de abertura da rede de trincas em corpos de prova feitos de aço inoxidável austenítico AISI 316L, de aço carbono A 108 e de corpos de prova (CP) feitos por soldagem dissimilar entre estes dois aços.

Para atingir tal objetivo, será necessário que os ensaios feitos na máquina de fadiga térmica sejam controlados e registrados para que se possa avaliar o comportamento do material submetido aos ensaios.

Para realizar este trabalho, será desenvolvida uma metodologia computacional que controle e monitore os esforços aplicados aos CP, a temperatura de aquecimento, a corrente elétrica para atingir a temperatura, o fluxo de ar de resfriamento e a contagem de ciclos.

# Introdução

Os fenômenos físicos envolvendo temperaturas são fenômenos desafiadores e merecedores da atenção de pesquisadores de diversas áreas do conhecimento. Isto porque a temperatura altera significativamente as propriedades dos materiais de que nos servimos no dia a dia. Os materiais, tanto sólidos quanto líquidos ou gasosos, sofrem a influência da temperatura e suas propriedades são dependentes deste fenômeno natural.

Este trabalho busca instrumentar e comissionar uma máquina para estudar a fadiga térmica a que os materiais estão sujeitos, quando estes estão submetidos a eventos industriais que envolvem alterações de temperaturas. Devido ao fenômeno estar presente em inúmeros eventos industriais, neste trabalho, estudar-se-á particularmente a fadiga térmica, evento muito frequente em importantes sistemas de centrais nucleares.

Em centrais nucleares, centrais térmicas convencionais e em muitos processos térmicos industriais, há a mistura de fluidos a diferentes temperaturas durante processos normais de operação. A mistura de fluidos quentes e frios, sob certas condições operacionais, pode levar à estratificação térmica e a frequentes flutuações ou oscilações locais de temperatura do fluido. A estratificação térmica ocorre em tubulações horizontais quando dois fluidos, a temperaturas diferentes, escoa a baixas velocidades. O fenômeno ocorre, dependendo do processo industrial, entre fluidos semelhantes ou diferentes. Nas centrais nucleares o fenômeno da estratificação térmica é normalmente monofásico, entre dois fluxos de água quente e fria (durante eventos de acidentes, ocorre o fenômeno bifásico). Em vários sistemas de tubulações das centrais nucleares, há a possibilidade de ocorrer estratificação térmica entre dois fluxos de água a diferentes temperaturas. Devido à diferença de temperatura, as densidades das camadas de água são diferentes levando a camada fria a se situar na região inferior do tubo e a quente na superior. A Figura 1 mostra uma ilustração para esta separação dos fluidos [da Silva et. all, 2012]. É importante também para a formação da estratificação térmica, que o escoamento se dê em baixa velocidade.



Figura 1 – Separação entre camadas de fluidos quente e frio na estratificação térmica

Quando o fenômeno da estratificação térmica ocorre, a tubulação fica solicitada por tensões que surgem devido à diferença de temperatura entre as regiões superior e inferior de sua seção transversal. A região superior do tubo tende a se alongar e a inferior tende a conter este alongamento, o que faz aparecer tensões longitudinais no tubo. Assim, surgirão tensões axiais na tubulação, resultantes da tendência ao encurvamento do tubo no sentido longitudinal (efeito banana). Este efeito está exageradamente exemplificado na Figura 2 [da Silva et. all, 2012].



Figura 2 – Deformação longitudinal da tubulação

Devido à parte superior do tubo estar a uma temperatura maior que a inferior, há a tendência de ocorrer deformações de sua seção transversal. Na interface de separação entre a camada fria e a camada quente do fluido, a seção transversal do tubo fica tracionada na parte inferior e comprimida na parte superior. Este fenômeno provoca o aparecimento de tensões circunferenciais que tendem a deformar a seção circular do tubo. A Figura 3 ilustra os efeitos deste tipo de solicitação na tubulação [da Silva et. all, 2012].



Figura 3 – Tensões na interface dos fluidos quente e frio

Na Figura 4 é mostrado o perfil de tensões que surgem na parede da tubulação devido à constante variação de temperatura, causada pelo fenômeno da estratificação térmica [Ware (Jack), 2003]. Este estado cíclico de solicitações térmicas e mecânicas combinado levam o material da tubulação a falhar tanto por fadiga térmica como mecânica. Este fenômeno de oscilações térmicas ocorre devido à mistura de fluidos quente e frio, sob determinadas condições de operação. Esta oscilação é exemplificada pelo ponto “P” na Figura 4, que ora está submetido a tensões trativas e ora a tensões compressivas. A ciclagem térmica assim estabelecida pode causar fadiga térmica de alto ciclo e mesmo trincas nas imediações da superfície interna da parede do tubo onde ela ocorre.

Nos experimentos planejados para este trabalho serão impostos aos corpos de prova carregamentos térmicos e mecânicos, para melhor representar a realidade dos carregamentos nas tubulações. Para controlar os carregamentos térmicos e mecânicos impostos aos CP é preciso instrumentar a máquina de fadiga térmica. Com esta instrumentação será possível controlar os ciclos de aquecimento e resfriamento, registrar a contagem destes ciclos e também registrar as cargas mecânicas impostas ao CP.

 

Figura 4 – Estado de tensões no material da tubulação durante a estratificação térmica

# Justificativa

A fadiga térmica é um importante mecanismo de falha que reduz significativamente a vida útil dos componentes mecânicos. A vida útil do componente será mais longa ou mais curta, dependendo da intensidade e da frequência da fadiga térmica presente. Uma definição possível para fadiga térmica pode ser dada como: “fadiga térmica é a deteriorização gradual e eventual quebra de um material por aquecimento e resfriamento alternados durante o qual a livre expansão térmica é parcial ou totalmente contida” [Merola, 1995, Spera e Mowbrey, 1976].

Fadiga térmica é um modo de falha que origina danos e promove o crescimento destes em componentes estruturais e em peças de máquinas. A origem dos danos está nas variações da energia interna dos componentes e peças, causadas por múltiplos ciclos térmicos ou por oscilações de temperatura. Em consequência da fadiga térmica, um componente mecânico pode sofrer variações em sua geometria, o seu material pode sofrer variações de propriedades e trincas podem surgir. A fadiga térmica origina-se basicamente na ciclagem térmica ou em variações periódicas de temperatura, combinadas com a contenção parcial ou total da expansão térmica do componente. A contenção da expansão térmica pode ser devida a fatores externos e internos. As contenções externas produzem esforços que atuam alternadamente no componente quando ele for aquecido e resfriado. Já as contenções internas podem resultar de gradientes de temperaturas, de anisotropia do material e de diferentes coeficientes de expansão de grãos ou de fases adjacentes do material.

Um componente submetido à fadiga térmica deve ser projetado para prevenir danos inaceitáveis. Para assegurar esta característica, o número de ciclos de fadiga esperado deve ser menor do que o número máximo permitido de ciclos de fadiga determinado pelo código de projeto.

Em uma central nuclear, devido aos vários transientes operacionais, devido a anormalidades ou devido a paradas e partidas, ocorre em algumas de suas tubulações o fenômeno da estratificação térmica. Associadas a este fenômeno, surgem tensões térmicas, que têm suas origens na flutuação da interface entre as duas camadas de água a diferentes temperaturas. Nesta interface, dependendo das condições de escoamento, forma-se uma ondulação entre as duas camadas, causando a ciclagem térmica do material. A oscilação das ondulações tem uma frequência máxima de 1Hz [Ensel et. all, 1995] e a amplitude destas oscilações pode ser medida para a faixa de número de Froude de 0,02 a 0,2, seguindo-se a metodologia descrita por Uhlman [Uhlman et. all, 1991]. Ensel, [Ensel et. all, 1995] mostra que as oscilações da interface das camadas de água quente e fria são mais acentuadas na região próxima à parede do tubo do que em sua região central. Em função das vazões envolvidas, a interface entre a água fria e quente pode ocorrer em diferentes posições ao longo do diâmetro interno da tubulação. Ocorre também a alteração desta interface ao longo do tempo e, consequentemente, as oscilações térmicas devidas à estratificação térmica.

Em algumas centrais nucleares, os transientes operacionais têm sido menos severos e o número de ciclos menor do que o estimado para a vida da central e, em outras centrais, tem ocorrido o contrário. Assim, o monitoramento de fadiga justifica para que se possa garantir a continuidade operacional da planta, com fator de uso menor que 1.

Seguindo orientações dos códigos de projeto, código ASME, por exemplo, há duas maneiras de se conduzir um projeto: projeto por norma e projeto por análise. O projeto de componentes sujeitos a fadiga pode ser feito seguindo estas duas maneiras [Maneschy, 2001]. O projeto por análise consiste de uma análise de tensões com todas as condições de operação envolvidas e o projeto por norma considera as condições de projeto e cálculos com equações simples. Merola, [Merola, 1995] diz que o projeto considerando fadiga pode ser feito seguindo orientações de projeto por análise e por análise experimental. A análise experimental no projeto por fadiga consiste em submeter a carregamentos os modelos que representam o componente, para se determinar a margem de segurança em relação ao dano. É preciso considerar também, se e como os diferentes processos de fabricação influenciam o comportamento do componente sob tensão térmica de fadiga.

Uma maneira de simular a fadiga térmica por testes uniaxiais, conhecida como ciclagem termo-mecânica, consiste em aplicações simultâneas de temperaturas e de deformações mecânicas. Se os ciclos e o aumento de temperatura aplicados corresponderem a um tensionamento do material, então a ciclagem é dita em fase. Se por outro lado, a temperatura aplicada levar a uma compressão do material, então a ciclagem é dita fora de fase [Merola, 1995].

# Objetivo

Instrumentar e monitorar mecânica, pneumática e eletricamente a máquina de fadiga térmica para estudar o comportamento à fadiga térmica de CP feitos dos aços AISI 316L, A 108 e de ambos estes aços soldados pelo processo de soldagem dissimilar utilizando as ligas de inconel 82 e inconel 182, quando submetidos aos carregamentos de ciclagem térmica e de tensão de tração simultaneamente.

**Objetivos Específicos:**

Desenvolver um aplicativo de computador que possa monitorar o crescimento de rede de trincas decorrentes dos carregamentos térmico e mecânico aplicados simultaneamente nos corpos de prova.

Capacitação do grupo de pesquisa em estudo e análise do fenômeno de fadiga térmica.

# Revisão da Literatura

Define-se a fadiga como sendo o processo de degradação localizada, progressiva e permanente, que ocorre em material sujeito a variações de tensões e deformações e que produzem a nucleação de trincas ou a completa fratura depois de um número suficiente de ciclos [ASTM-E 823-96, 2000]. Para se estudar o fenômeno de fadiga em laboratório utilizando CP, é preciso que se tenha uma metodologia adequada e confiável de realizar os ciclos de carregamentos e de registrar a contagem destes ciclos. Para se ter esta metodologia é que será desenvolvido um aplicativo que comunique com a instrumentação da máquina de fadiga térmica. Para desenvolver este tipo de aplicativo existem alguns softwares e neste trabalho será utilizado o LabVIEW [National, 2009]. O controle dos parâmetros de ensaio precisa ser planejado e realizado com precisão, para que não haja prejuízo dos resultados. É necessário que se faça um projeto do sistema de leitura, de aquisição de dados e da interface de operação do aplicativo [Dorf e Bishop, 2001]

Em um componente submetido a ciclos térmicos, quando ocorrem flutuações locais de temperaturas, as faixas de deformações são dadas por [Talja e Hansjosten, 1988]:

 (1)

A faixa de tensões é dada por:

 (2)

Nas Equações (1) e (2), *E*, é o módulo de elasticidade do material da tubulação, *β* é o coeficiente de dilatação do material, *ΔT* é a diferença de temperatura entre o fluido frio e o quente, *ʋ* é o coeficiente de Poison do material e *Δσ* é a faixa de tensão à qual o material está submetido.

Conforme Talja, [Talja e Hansjosten, 1988] a faixa de tensão das tensões axiais devidas à variação da posição da camada de mistura é por volta de 0,7*EβΔT* e que as tensões circunferenciais são menores em comparação a elas. As Equações (1) e (2) devem fazer parte do aplicativo desenvolvido para que se possa avaliar as deformações e calcular as tensões no CP dos ensaios de fadiga térmica.

Existem muitos trabalhos de fadiga térmica que inspiraram a realização dos estudos deste trabalho. Tunstall e colegas apresentaram uma modelagem numérica para melhorar a previsão das flutuações de temperaturas em joelhos de 90o e em junções em “T” de tubulações de centrais nucleares [Tunstall et al, 2016]. Estes componentes falham devido à fadiga térmica e a metodologia numérica apresentada pelos autores foi bem consistente com resultados experimentais, estabelecendo uma programação confiável para manutenção e reparos destes componentes.

Sharifi e seu grupo de trabalho apresentam um estudo de fadiga térmica feito na cabeça de um cilindro de um de motor de combustão [Sharifi et. all, 2016]. Os autores fazem um estudo experimental e numérico de vida à fadiga em um componente, submetendo-o a carregamentos térmicos e mecânicos. Os esforços mecânicos foram oriundos de ensaios feitos a diferentes rotações de trabalho.

Vetriselvan e seus colegas apresentam estudos experimentais e numéricos de fadiga térmica feitos em tubulação de trocador de calor [Vetriselvan et. all, 2018]. Os autores desenvolveram um dispositivo de testes para simular as condições de carregamentos na parede interna da tubulação. O dispositivo faz o aquecimento da parede externa do corpo de prova que simula o tubo da caldeira e, ao mesmo tempo, um fluxo de água é esguichado em seu interior.

Dewa e colegas estudaram o comportamento à fadiga de baixo ciclo de CP feitos a partir de chapas soldadas da liga 617 (Alloy 617 similar a ASTM B166 e a UNS N06617) [Dewa et. all, 2018]. Os autores utilizaram esta liga devido às suas excelentes propriedades mecânicas a altas temperaturas. Além do mais é uma das ligas consideradas para a fabricação de componentes do primário dos reatores de alta temperatura refrigerados a gás (Very High Temperature gas-cooled Reactor – VHTR). Os ensaios de fadiga foram realizados à impressionante temperatura de 9500C.

# Materiais e Métodos

O aplicativo de computador será feito utilizando a infraestrutura computacional do laboratório de END e softwares apropriados, como LabVIEW e outros, para a criação de aplicativos de controle e aquisição de dados. Para desenvolver este trabalho as seguintes etapas se fazem necessárias:

## 6.1 Revisão bibliográfica

Três meses de pesquisa em artigos de revistas, de congressos, em livros e em normas. A biblioteca do CDTN é provida de vários livros sobre informática e merecem uma pesquisa cuidadosa. Esta pesquisa está relacionada ao projeto 0614.01 – Caracterização mecânica e estrutural de materiais e componentes em curso no CDTN.

## 6.2 Análises de erros e calibrações

Para se conseguir confiabilidade metrológica, será feita uma verificação da calibração dos instrumentos de medição e análise de erros de cada um deles em separado e uma análise da combinação destes erros individuais nos resultados finais dos ensaios de fadiga. Desta forma, os resultados obtidos nas medições experimentais, expressarão clara e objetivamente a incerteza e a confiabilidade existentes.

## 6.3 Planejamento e desenvolvimento do aplicativo de automação e controle

Primeiramente será planejada e pensada a interface do aplicativo de automação e controle. Depois, utilizando softwares adequados, será criado o aplicativo.

## 6.4 Instrumentar a máquina de fadiga térmica

Instalar os instrumentos de medição de temperatura, de fluxo de ar, de corrente elétrica e de esforços mecânicos na máquina de fadiga térmica. O CDTN já dispõe destes instrumentos.

## 6.5 Realizar a conexão do aplicativo com os instrumentos da máquina de fadiga

Fazer a conexão dos instrumentos da máquina de fadiga térmica com o aplicativo desenvolvido para que se possa controlar os ensaios de fadiga térmica. O aplicativo deverá controlar a corrente elétrica para aquecimento do CP, o fluxo de ar para o seu resfriamento, verificar e registrar o esforço mecânico durante os ensaios e registrar o número de ciclos térmicos aplicados ao CP.

## 6.6 Realizar testes para a comprovação da funcionalidade do aplicativo desenvolvido

Após fazer a conexão do aplicativo desenvolvido é preciso comprovar que ele funcionam corretamente realizando alguns testes de fadiga térmica. Após realizar estes testes o comissionamento da máquina de fadiga térmica estará concluído e a mesma pronta para realizar os ensaios de fadiga térmica.

## 6.7 Análises dos resultados, elaboração de relatórios e publicações

Os resultados serão apresentados e avaliados após cada etapa do trabalho realizado. Serão emitidos dois relatórios, um no meio do projeto e outro no término do projeto.

# Infraestrutura Disponível

A infraestrutura do CDTN para desenvolver as atividades deste trabalho é a seguinte:

* Laboratório de ensaios mecânicos

Será utilizada a máquina de fadiga térmica, e o sistema de ensaio universal marca Instron. Aqui serão realizados ensaios para a calibração das tensões mecânicas aplicadas aos CP que serão utilizados nos ensaios de fadiga térmica. A máquina de fadiga térmica será monitorada pelo aplicativo desenvolvido.

* Laboratório de ensaios não destrutivos

Criação do aplicativo de computador que fará o controle dos ciclos térmicos e a aquisição de dados dos ensaios de fadiga térmica, utilizando a infraestrutura computacional do laboratório de END.

* Laboratório de ensaios experimentais de tensões

Serão utilizados os equipamentos e componentes necessários à medição de esforços e deformações.

# Resultados Esperados

Os principais resultados previstos são:

* Ter a máquina de fadiga térmica do CDTN instrumentada, o que possibilitará realizar estudos de fadiga térmica.
* Criar um aplicativo de computador para realizar e controlar os ciclos térmicos, para avaliar as tensões mecânicas aplicadas e para registrar o número de ciclos de experimentos.
* Comissionar a máquina de fadiga térmica realizando a comunicação do aplicativo de computador com os instrumentos utilizados na máquina de fadiga térmica.
* Adquirir competência do grupo de trabalho na área de instrumentação e controle de experimentos.
* Adquirir e ampliar a competência do grupo de trabalho na área de fadiga térmica utilizada no gerenciamento de envelhecimento de componentes e estruturas.
* Buscar fortalecer a interação da indústria nuclear e convencional, centro de pesquisa e universidade.
* Publicar resultados em revistas, congressos e no seminário de IC do CDTN.

# Referências Bibliográficas

ASTM E 823-96. (2000), Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture testing.

[da Silva, L. L.](http://lattes.cnpq.br/0565792069634747); [Cimini Junior, C. A.](http://lattes.cnpq.br/6773795080923981); [Mansur, Tanius Rodrigues](http://lattes.cnpq.br/6105432559020189). Thermal Fatigue Analysis of a NPP Steam Generator Injection Nozzle Model Subjected to Thermal Stratification. Journal of Materials Science and Engineering, v. A, p. 391-401, 2012.

Dewa, R. T., Kim, S.-J., Kim, W.-G., Kim, E.-S. Evaluation of the low cycle fatigue failure properties for GTAW weldments of Alloy 617 at 950 °C Engineering Failure Analysis, 90, 202-214, 2018.

Dorf, C. Richard e Bishop, H. Robert, Sistemas de Controle Modernos, LTC Editora, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

Ensel, C.; Colas, A. e Barthez, M. Stress analysis of a 900 MW pressurizer surge line including stratification effects. Nuclear Engineering Design, v. 153, p. 197-203, 1995.

National Instruments Corporation, Manual de Treinamento do LabVIEW, 11.500 Noth Mopac, Austin, Texas, USA, Edição 2009.

Merola, M. Normative issues in thermal fatigue design of nuclear components. Nuclear Engineering Design, p. 351-361, 1995.

Maneschy, Eduardo. Fadiga em Componentes de Plantas Nucleares, CNEN – CDTN, Belo Horizonte, MG – Brasil, 10 a 14 de dezembro de 2001.

Spera, D. A. and Mowbray, D. F. Thermal Fatigue of Materials and Components, ASTM STP 612, Philadelphia, Pa, 17-18 November, 1975.

Sharifi, S. M. H., Googarchin, H. S., Forouzesh, F. Three dimensional analysis of low cycle fatigue failure in engine part subjected to multi-axial variable amplitude thermo mechanical load. Engineering Failure Analisys, 62, pag. 128-141, 2016.

Talja, A.; e Hansjosten E. Stress in a horizontal pipe line due to thermal stratification. KFK/PHDR Nuclear Research Centre, Karlsrule, July 1988.

Tunstall, R., Laurence, D., Prosser, R. and Skillen, A. Benchmarking LES with wall-functions and RANS for fatigue problems in thermal–hydraulics systems. Nuclear Engineering and Design 308 (2016) 170–181.

Uhlmann, D.; DIEM, H.; HUNGER, H. Untersuchung zum zyklischen Riβwachstum eines Umfangsrisses in einem geraden Rohrabschnitt DN 425 bei langsam wechselnder Biegelast und periodisch wiederholter thermischer Schichtung. Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe, Alemanha, 15. Statusbericht PHDR, v. 04, p. 371 – 408, December 1991.

Vetriselvana, R., Sathiyab, P., Ravichandranc, G. Experimental and numerical investigation on thermal fatigue behaviour of 9Cr 1Mo steel tubes Engineering Failure Analysis, 84, 139-150, 2018.

Ware (jack), A. G. RCS Degradation Mechanisms (1) thermal Fatigue, International Atomic Energy Agency – Mission on Piping Integrity – CNEN – CDTN, Belo Horizonte, MG, Brazil, February, 2003.