INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Análise mecânico-estrutural de uma vareta de combustível de aço
inoxidável sob condições de ensaio de arrebentamento**

DANILO PINHEIRO FARIA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores

Orientador:
Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva

São Paulo
2020

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Análise mecânico-estrutural de uma vareta de combustível de aço
inoxidável sob condições de ensaio de arrebentamento**

Versão corrigida

Versão original disponível no IPEN

DANILO PINHEIRO FARIA

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

**Orientador:
Prof. Dr. Antonio Teixeira e Silva**

**São Paulo
2020**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

PINHEIRO FARIA, D. Análise Mecânico-Estrutural de uma Vareta de Combustível de Aço Inoxidável sob Condições de Ensaio de Arrebentamento. 2020. 82 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br>>. Acesso em: 15/02/2020)

Pinheiro Faria, Danilo

Análise Mecânico-Estrutural de uma Vareta de Combustível de Aço Inoxidável sob Condições de Ensaio de Arrebentamento / Danilo Pinheiro Faria; orientador Antonio Teixeira e Silva. -- São Paulo, 2020.

82 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2020.

1. Análise estrutural. 2. Aço inoxidável. 3. Ensaio de arrebentamento. 4. Simulação computacional. I. Teixeira e Silva, Antonio, orient. II. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico meu trabalho de mestrado à estrutura que meus pais sempre me proporcionaram. Sem uma base familiar e educacional sólidas eu não teria condições de galgar este degrau.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer inicialmente à Dra Claudia Giovedi pela oportunidade e por me confiar esse desafio desde o início. Em seguida ela me apresentou ao meu orientador Prof Dr Antonio Teixeira e Silva que também me orientou e apoiou sempre com muita atenção.

Agradeço aos colegas de trabalho Douglas Francis, Vinicios Marono, Leonardo Lima, José Berretta, Tiago Turcarelli e todo o pessoal do setor de fabricação pelos auxílios no desenvolvimento dos corpos de prova e realização dos testes experimentais.

Agradeço à atenção da colaboradora do IPEN Bruna Roque da Silva, que sempre esteve disposta a ajudar em todos os momentos do curso, muito obrigado.

Agradeço à minha esposa Yara, pelos incentivos e pelas motivações que me forneceu durante o período do curso.

Reconheço também o incentivo e o apoio da instituição Marinha do Brasil, em especial ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo por disponibilizar todos os insumos necessários para o desenvolvimento do trabalho. E por fim, agradeço aos professores do IPEN/CNEN-SP, que tive a oportunidade de conhecer e contribuíram para o meu aprendizado durante as disciplinas do curso de mestrado.

RESUMO

Faria, Danilo P. **Análise mecânico-estrutural de uma vareta de combustível de aço inoxidável sob condições de ensaio de arrebentamento.** 2020.81 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo.

Após o acidente nuclear de Fukushima em 2011, a comunidade científica intensificou as pesquisas para desenvolver combustíveis com tecnologia avançada. Nesse contexto, ligas à base de ferro surgiram como uma boa alternativa para ligas à base de zircônio. Para que a substituição do material do revestimento seja possível, são necessários estudos relacionados a suas propriedades mecânicas. Dessa forma, o presente trabalho realizou avaliações mecânico-estruturais a partir das propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 348, especificamente sob condições do ensaio de arrebentamento. Os ensaios de arrebentamento foram projetados para o intervalo de temperatura de 32°C a 450°. Em seguida, um modelo computacional foi criado baseado no corpo de prova do ensaio experimental. A simulação numérica foi realizada considerando as propriedades mecânicas do material específicas para o intervalo de temperatura de interesse. Os resultados numéricos foram comparados aos experimentais e o modelo foi validado. Como os aços inoxidáveis austeníticos possuem estabilidade estrutural para baixas e altas temperaturas, os resultados puderam ser extrapolados para temperaturas além daquelas fixadas no ensaio de arrebentamento. Após a validação do modelo computacional, foram realizadas simulações para temperaturas superiores a 450°C, e então foi obtida uma correlação entre a pressão de arrebentamento e a temperatura para o aço inoxidável AISI 348. A função encontrada pode então ser implementada em códigos de desempenho de combustível, como o FRAPTRAN e o TRANSURANUS, para que seja possível avaliar o comportamento de varetas de combustível com revestimento em aço inoxidável AISI 348 sob condições de acidente.

Palavras chave: Análise estrutural; aço inoxidável 348; ensaio de arrebentamento

ABSTRACT

Faria, Danilo P. **Mechanical-structural analysis of a stainless steel fuel rod under burst test conditions.** 2020.81 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo

After the Fukushima nuclear accident in 2011, the nuclear research community has initiated research into the development of advanced technology fuels. In this context, iron-based alloys have emerged as a good alternative to zirconium-based alloys. In order to make possible the cladding material replacement, studies related to their mechanical properties are necessary. Thus, the present study carried out a mechanical-structural evaluation from the literature available data regarding the mechanical properties of stainless steel AISI 348, specifically in the conditions of burst test. Burst tests were performed in a temperature range from 32°C up to 450 °C. Then, a computational model was created based on the specimen of the burst test. Numerical simulations were performed considering the tensile tests of stainless steel at various temperatures. The numerical results were compared with the results of the burst test. Test and simulations were comparable leading to computational model validation. As austenitic stainless steels have structural stability for low and high temperatures, the results could be extrapolated to temperatures higher than those applied in the burst test. After the validation of the computational model, simulations were performed for temperatures higher than 450°C, thus obtaining a burst pressure curve as a function of the temperature for stainless steel AISI 348. The correlation of burst data as function of temperature could be implemented in FRAPTRAN or TRANSURANUS codes, in order to make possible the evaluation of the behavior of a fuel rod using stainless steel AISI 348 as cladding material under postulated accident conditions.

Key words: mechanical analysis, stainless steel 348, burst test.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Representação esquemática de um EC tipo vareta.	13
Figura 2 - Modelo esquemático da distribuição de temperatura na VC utilizado pelo código.	17
Figura 3 -Representação do modelo de <i>ballooning</i> utilizado pelo FRAPTRAN.	18
Figura 4 - Comparação entre o resultado numérico do código TRANSURANUS e cálculos analíticos da distribuição radial de temperatura da VC.	19
Figura 5 - Levantamento de dados de ensaio de arrebentamento de diferentes tipos de ligas à base de zircônia.	23
Figura 6 - Sistema de aquisição da primeira série de testes.	24
Figura 7 - Aparato experimental da terceira série de ensaios.	25
Figura 8 - Representação esquemática da sessão de testes do aparato experimental da série de testes IFA - 650.	26
Figura 9 - Medidas de Pressão da VC em função do tempo nos ensaios de Halden-IFA-650.4.	27
Figura 10 - Modelo esquemático da realocação do combustível.	28
Figura 11 - Comparação entre as medidas de deformação do revestimento e as predições do modelo desenvolvido no FRAPTRAN.	28
Figura 12 - Componente tangencial da deformação logarítmica obtida por meio do modelo computacional.	29
Figura 13 - Representação esquemática da microestrutura do revestimento de zircaloy quando submetido à altas temperaturas de oxidação.	31
Figura 14 - Representação esquemática do desenvolvimento da fragilização do revestimento até a ruptura.	32
Figura 15 - Correlações para o ganho de massa de oxigênio em função da temperatura para ligas à base de zircônio com 1% de nióbio.	33
Figura 16 - Representação esquemática do ensaio completo de LOCA com apenas um CP.	33
Figura 17 - Detalhe do CP utilizado no ensaio integral de LOCA.	34
Figura 18 - Conceito de revestimento de liga à base de molibdênio com 3 camadas.	35
Figura 19 - Gap entre pastilha e revestimento da VC de aço inoxidável e zircaloy.	36
Figura 20 - Diâmetro externo da VC de aço inoxidável e VC de zircaloy ao longo do tempo.	36
Figura 21 - Variação da pressão interna de VC de aço inoxidável e zircaloy.	37

Figura 22 - Aparato experimental para teste de arrebentamento.	38
Figura 23 - Comparação das propriedades dos materiais em função da temperatura. a) análise da tensão circunferencial. b) análise da pressão interna do CP.	38
Figura 24 - Resultados de teste de arrebentamento de ligas à base de ferro em diferentes temperaturas.	39
Figura 25 - Micrografia da seção transversal de diversos revestimentos após o ensaio de arrebentamento.	40
Figura 26 - Aparato experimental disponível para o ensaio de arrebentamento.	42
Figura 27 - Detalhe da montagem do ensaio de arrebentamento. a) Corpo de prova. b) Local de encaixe do CP no final da linha de pressão.	43
Figura 28 - Aparato experimental disponível para o ensaio de tração.	45
Figura 29 - Detalhe da montagem do CP na INSTRON.	45
Figura 30 - Montagem do CP. a) peças separadas. b) CP montado.	46
Figura 31 - CP para teste de tração. a) medida de alongamento em CP após o ensaio a 150°C. b) medida de alongamento em CP após o ensaio a 450°C.	47
Figura 32 - Final do ensaio de tração a 800°C.	48
Figura 33 - Concepção do modelo computacional.	49
Figura 34 - Exemplo de aplicação de carregamento no modelo computacional. A) Pressão na direção normal às superfícies internas. B) incremento de pressão ao longo do tempo.	50
Figura 35 - Modelo computacional discretizado em MEF. A) modelo completo. B) Detalhe do tampão do CP. C) Detalhe do tubo do CP.	52
Figura 36 - Exemplo de inserção das propriedades mecânicas no software ANSYS.	53
Figura 37 - Perfil de arrebentamento para ensaios em temperaturas inferiores a 370°C.	56
Figura 38 - Perfil de arrebentamento do CP na temperatura de 450°C.	56
Figura 39 - Exemplo de resultado de simulação numérica a 150°C.	58
Figura 40 – Análise dos resultados. A) Exemplo de incremento do carregamento de pressão. B) Resposta de tensão equivalente no modelo.	59
Figura 41 – Compilação dos resultados.	61

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Compilação dos resultados numérico e experimentais da referência [32].	30
Tabela 2 - Verificação de malha de elementos finitos.	51
Tabela 3 - Resultados obtidos no ensaio de arrebentamento a diferentes temperaturas	55
Tabela 4 – Valores médios das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração a diferentes temperaturas	57
Tabela 5 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais a diferentes temperaturas.	59
Tabela 6 - Resultados numéricos da pressão de arrebentamento.	60

Abreviaturas e Siglas

- Along: Alongamento do CP;
- ASME: *American Society of Mechanical Engineers*;
- ASTM: *American Society for Testing and Materials*;
- ATF: *Advanced Technology Fuel*;
- CP: Corpo(s) de Prova;
- E: Módulo de Elasticidade;
- EC: Elemento de Combustível;
- EUA: Estados Unidos da América;
- LOCA: *Loss of Coolant Accident*;
- LWR: *Light Water Reactor*;
- MEF: Método de Elementos Finitos;
- nº Elem.: Número de elemento finitos ao longo da espessura do modelo computacional;
- NUREG: *Nuclear Regulatory Guide*;
- P: Pressão de arrebentamento;
- P_exp: Pressão de arrebentamento experimental;
- P_num: Pressão de arrebentamento numérica;
- PWR: *Pressurized Water Reactor*;
- RBC: Rede Brasileira de Calibração;
- RIA: *Reactivity-Initiated Accident*;
- S_esc: Limite de Escoamento;
- S_max: Limite de Resistência;
- SRP: *Standard Review Plan*;
- T: Temperatura;
- U.S.NRC: *United States Nuclear Regulatory Commission*;
- VC: Vareta de Combustível; e
- Zircaloy: Liga metálica à base de zircônio.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3	METODOLOGIA	41
3.1	Testes experimentais	41
3.1.1	Ensaio de arrebentamento	42
3.1.2	Ensaio de tração	44
3.2	Simulação computacional	48
3.2.1	Método de Elementos Finitos	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	Metodologia de análise em códigos de desempenho do combustível.	61
5	CONCLUSÕES	65
6	ATIVIDADES FUTURAS	67
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
8	ANEXOS	73

1 Introdução

O combustível nuclear em reatores PWR pode estar encapsulado na forma de varetas ou placas. As varetas de combustível (VC) são introduzidas entre as grades espaçadoras da estrutura do Elemento de Combustível (EC), garantindo-se assim o espaçamento geométrico adequado e a formação dos canais de refrigeração (Figura 1).

Figura 1 – Representação esquemática de um EC tipo vareta.

Fonte: referência [1].

No projeto do EC para um reator do tipo *Pressurized Water Reactor* (PWR) devem ser consideradas as condições de operação do EC, tais como pressão, temperatura, radiação e possíveis carregamentos hidráulicos [2].

Os requisitos básicos aplicados ao projeto de um EC são:

- Acomodar efeitos químicos, térmicos, mecânicos e de irradiação dos materiais;
- Manter a barreira de separação do combustível e produtos de fissão com o refrigerante;

- Manter geometria aceitável;
- Permitir a inserção de barras de controle;
- Permitir expansões diferenciais;
- Permitir fluxo de refrigerante e transferência de calor aceitáveis;
- Permitir manuseio, transporte, carregamento etc;
- Permitir o posicionamento da instrumentação;
- Resistir a forças de escoamento do fluido;
- Ter suporte próprio.

As principais normas aplicáveis ao projeto de um EC são:

- ANS/ANSI [2];
- CNEN [3] [4];
- IAEA [5];
- NUREG-0800, capítulo 4.2. [6];
- ASME [7].

A comissão regulatória nuclear dos Estados Unidos (U.S.NRC), a partir da experiência no estabelecimento de requisitos de segurança e da prática de seu pessoal na avaliação de segurança de diversos projetos nucleares, criou, em 1975, o primeiro plano de revisão padrão (SRP). Foi determinado que ele fosse utilizado como ferramenta de rotina pelas equipes de trabalho durante o licenciamento dos projetos de reatores nucleares de potência [8].

Em 1981, foi realizado um extenso programa de revisão, por meio do qual a U.S.NRC identificou todos os requisitos pertinentes para cada tópico do projeto e reformatou os SRP em um Guia Regulatório Nuclear (NUREG-0800). Além disso, descreveu os requisitos de segurança que seriam determinantes em cada tipo de revisão e incorporou novos quesitos baseados no acidente nuclear de *Three Mile Island*, Pensilvânia, EUA, ocorrido em março de 1979.

Em 1991, foi criado um programa de desenvolvimento e atualização do SRP, para que a NUREG-0800 continuasse sendo utilizada nos futuros projetos de reatores nucleares.

Atualmente, a NUREG-0800 é subdividida em dezenove capítulos com inúmeros SRP. O principal objetivo do documento é garantir a qualidade e

a uniformidade da equipe de trabalho nas revisões de segurança de cada projeto nuclear. Dessa forma, é possível que as equipes realizem avaliações de segurança em todas as etapas da vida de uma planta nuclear, como por exemplo, aprovação de projeto base, permissões de construção, licenças de operação, certificação de projetos, dentre outros [8].

A NUREG-0800 capítulo 4.2 [6] trata especificamente sobre o EC. A norma é explícita em ressaltar que a revisão de segurança do sistema combustível deve garantir os seguintes pontos:

- O sistema combustível não pode ser danificado em condições de operação normal e em ocorrências operacionais antecipadas;
- Nenhum dano no EC poderá ser tão severo a ponto de inviabilizar a inserção das varetas de controle;
- Em condições de acidente, sempre deverá ser realizada uma análise conservadora; e
- A refrigeração do sistema sempre será mantida.

Em face disso, durante a realização dos cálculos estruturais, inerentes ao projeto do EC, é de fundamental importância conhecer as propriedades mecânicas de cada material que será utilizado, bem como seu comportamento frente a variações de temperatura, pressão e sob a incidência de radiação.

Atualmente, os materiais mais utilizados como revestimento nos EC dos reatores comerciais são as ligas à base de zircônio (*zircaloy*). Essas ligas, que contém aproximadamente 2,5% de estanho, possuem propriedades como: boa resistência mecânica, elevada resistência à corrosão a altas temperaturas e baixa seção de choque de captura de nêutrons térmicos [9].

A avaliação do desempenho da VC é fundamental para o licenciamento de plantas nucleares. Isso é feito por meio de experimentos e de códigos computacionais que consideram os diferentes fenômenos que ocorrem ao longo da irradiação.

Nesse sentido, estudos que objetivam aprofundar os conhecimentos em relação às propriedades mecânicas relacionadas a ensaios de arrebentamento sempre foram de interesse da comunidade científica para conhecer o comportamento de diferentes materiais sob condições de acidentes postulados, como por exemplo o *Loss of Coolant Accident* (LOCA) [10].

Um dos parâmetros que pode ser verificado visualmente no ensaio de arrebentamento é o inchamento localizado do CP (Corpo de Prova), chamado de *ballooning*, fenômeno este que ocorre devido à rápida incursão de temperatura decorrente da perda de refrigeração. A principal consequência da ocorrência do *ballooning* na vareta de combustível é a redução ou bloqueio total do fluxo de refrigerante no EC, podendo resultar na fusão da VC [10].

Em função da baixa utilização do aço inoxidável em reatores comerciais, as pesquisas e dados de literatura disponíveis são consideravelmente inferiores em relação àqueles disponíveis para as ligas à base de zircônio.

Dentre os principais códigos de desempenho do combustível utilizados para o licenciamento de plantas nucleares destacam-se os códigos FRAPCON [11] e FRAPTRAN [12] desenvolvidos nos EUA, e TRANSURANUS, europeu.

O FRAPCON é um código computacional desenvolvido na linguagem FORTRAN [11] que calcula, durante o estado estacionário, a resposta de varetas de combustível ao longo da queima do combustível de reatores do tipo *Light Water Reactor* (LWR). Dentre as respostas do programa pode-se citar a tensão e deformação do combustível e do revestimento, evolução da temperatura do combustível e da VC, evolução da pressão interna da VC em função das condições de contorno de potência e de refrigeração do reator. Para a modelagem fenômenos envolvidos, são consideradas informações como:

- Taxa de transferência de calor entre pastilha/revestimento e entre revestimento /refrigerante;

FRAPTRAN calcula parâmetros como o histórico da temperatura e deformação da VC em função das condições de contorno de potência e refrigeração do reator, durante transientes, ou seja, em uma curta escala de tempo. Na Figura 3 pode-se observar um exemplo esquemático da representação do *ballooning* pelo código. Para cada variável da Figura 3, é inserida no código uma correlação em função da temperatura.

Figura 3 - representação do modelo de *ballooning* utilizado pelo FRAPTRAN.

Fonte: referência [11].

Ambos os códigos de desempenho utilizam as correlações de propriedades de materiais do banco de dados MATPRO [13]. O MATPRO é uma compilação das correlações das propriedades dos materiais do combustível e do revestimento desenvolvidas ao longo do tempo para verificar o desempenho da VC nas diversas condições de operação do reator.

Contudo, devido ao fato desses códigos terem sido desenvolvidos a partir da década de 1970, quando as ligas à base de zircônio passaram a ser amplamente utilizadas como material de revestimento, a base de dados utilizada pelos códigos contempla primordialmente essas ligas como material de

revestimento. Dessa maneira, os códigos FRATRAN/FRAPCON e TRANSURANUS, em suas versões originais, contemplam apenas análises de desempenho de combustível para VC com material de ligas à base de zircônio [14].

Outro código de desempenho de combustível bastante difundido é o TRANSURANUS. Desenvolvido pelo instituto europeu de elementos transurânicos, ele aparece no cenário mundial como alternativa aos códigos norte-americanos FRAPTRAN e FRAPCON. O código consiste em uma rede de correlações mecânico-matemáticas onde os modelos físicos podem ser incorporados com facilidade [15].

A maior vantagem do código TRANSURANUS é a flexibilidade, visto que ele pode trabalhar com diferentes projetos de VC em diversas situações, como por exemplo condições normais de operação, transientes e de acidente do reator. Além disso, os tempos de simulações podem variar desde milissegundos até anos, ou seja, o código produz resultados tanto no regime estacionário quanto em transientes operacionais [15].

A Figura 4, por exemplo, apresenta os resultados analíticos e numéricos do TRANSURANUS relacionados à distribuição radial de temperatura da VC.

Figura 4 - Comparação entre o resultado numérico do código TRANSURANUS e cálculos analíticos da distribuição radial de temperatura da VC.

Fonte: referência [15].

A Figura 4 é um exemplo de verificação e validação a que os códigos computacionais são submetidos. Pode-se observar o alto nível de precisão dos resultados numéricos com os analíticos.

Após o acidente nuclear de Fukushima em 2011, a comunidade científica da área nuclear deu início a pesquisas para o desenvolvimento de combustíveis com tecnologia avançada (ATF) visando tanto à substituição das ligas à base de zircônio como material de revestimento quanto ao aumento da condutividade térmica da pastilha de combustível, melhorando assim o desempenho do combustível em condições de acidente. Nesse contexto, as ligas à base de ferro surgiram como uma boa alternativa às ligas à base de zircônio, visto que apresentam boas propriedades mecânicas e têm processos de produção comercial altamente consolidados e de baixo custo. Dentre as ligas à base de ferro, especial atenção tem sido dada aos aços inoxidáveis austeníticos da série 300, principalmente ao 348, pois esse foi o material de revestimento utilizado nos primeiros PWR e apresentou bom desempenho sob irradiação [16 - 18].

Em função das pesquisas para o desenvolvimento de ATF, os códigos de desempenho de combustível já consolidados para a análise de varetas com revestimento de ligas à base de zircônio, como o FRAPCON, FRAPTRAN e TRANSURANUS, vêm sendo modificados com a introdução de propriedades de outros materiais, de modo a poderem ser utilizados como ferramentas na avaliação dos possíveis candidatos a ATF [19].

No caso do revestimento, a adaptação dos referidos códigos aos novos materiais consiste na substituição das propriedades mecânicas das ligas à base de zircônio pelas das ligas à base de ferro nas sub-rotinas dos códigos. Entretanto, como a biblioteca da base de dados MATPRO [13] para ligas à base de ferro não é tão rica como para as ligas à base de zircônio, pesquisas para se determinar o comportamento dos novos materiais a altas temperaturas e sob condições ambientais similares às do interior do reator em funcionamento são fundamentais para a correta inserção de dados nos códigos. Dentre as propriedades de interesse, pode-se citar o comportamento no tocante à corrosão

[20] e a resistência ao arrebentamento [21] das ligas à base de ferro a altas temperaturas.

1.1 Objetivos

O presente trabalho objetiva a avaliação do comportamento mecânico-estrutural quanto ao arrebentamento de tubos de revestimento de aço inoxidável 348, a serem utilizados como material de revestimento da VC em PWR, por meio de experimentos e da validação de modelo computacional (via *software* ANSYS [22]) utilizando resultados experimentais obtidos em diferentes temperaturas. Após a validação do modelo computacional, a análise poderá ser extrapolada para temperaturas que vão além da temperatura máxima suportada pelo aparato experimental disponível.

Assim, esse trabalho propõe criar um modelo computacional baseado na dinâmica do ensaio de arrebentamento, validar o modelo computacional a partir de resultados experimentais, avaliar o comportamento do aço inoxidável 348 sob condições de ensaio de arrebentamento em diversas temperaturas e propor uma curva da pressão de arrebentamento em função da temperatura para o material estudado.

A extrapolação dos resultados para altas temperaturas por meio da ferramenta computacional permitirá conhecer o comportamento do material em condições extremas, gerando potencial para embasar estudos de reatores PWR com VC utilizando como material de revestimento aço inoxidável AISI 348.

Além disso, esse trabalho objetiva sugerir uma metodologia de utilização e inserção dos resultados obtidos em códigos de desempenho do combustível.

2 Revisão Bibliográfica

Os primeiros reatores do tipo PWR utilizavam como material de revestimento da VC ligas de aço inoxidável austenítico. No entanto, a partir da década de 1960, os reatores comerciais PWR começaram a utilizar ligas à base de zircônio como revestimento das varetas de combustível. Os principais motivos para a mudança de material foram que, quando comparado aos aços inoxidáveis austeníticos, as ligas à base de zircônio possuíam [16]:

- Maior ponto de fusão; e
- Menor seção de choque de absorção de nêutrons.

Dessa maneira, os reatores que possuíam VC de ligas à base de zircônio eram mais eficientes, visto que a perda de nêutrons durante a reação em cadeia de fissão era menor do que aquelas que utilizavam aço inoxidável como material base da VC.

Assim, a partir da década de 1970, VC fabricadas com *zircaloy* (ligas à base de zircônio) passaram a ser largamente utilizadas nos reatores PWR comerciais e, desde então, esse é o material mais estudado pela comunidade científica nuclear [16].

Sob o aspecto de acidente de perda de refrigeração (LOCA), o artigo da referência [23] analisa as ligas à base de zircônio e pondera que o comportamento do revestimento de zircaloy é governado por uma transformação de fase levando à deformação e à consequente ruptura do material em um curto espaço de tempo. Dessa forma, o documento objetiva identificar um critério de aplicação dos dados de arrebentamento, por meio do levantamento bibliográfico dos vários programas experimentais em condição de LOCA catalogados ao longo do tempo visando à aquisição de dados para a biblioteca do código FRAPTRAN.

A Figura 5, por exemplo, apresenta a compilação dos resultados de diversas configurações de ensaio de arrebentamento realizados para ligas à base de zircônio.

Figura 5 - Levantamento de dados de ensaio de arrebentamento de diferentes tipos de ligas à base de zircônia.

Fonte: Referência [23].

Os círculos em vermelho da Figura 5 representam tubos de revestimento de ligas à base de zircônio que foram testados no reator de Halden, na Noruega, sob condições de LOCA [24].

O Instituto de Pesquisa de Energia Atômica da Academia de Ciências da Hungria, entre os anos de 1994 e 2004, realizou diversos testes e experimentos para obter dados a respeito de ligas à base de zircônio. A referência [25] compilou todos esses resultados e os catalogou em cinco grupos, descritos abaixo:

- Testes de arrebentamento do revestimento;
- Ensaios de tração do material;
- Testes de oxidação;
- Ensaios de compressão radial; e
- Investigações pós-testes, as quais se resumiram em:
 - Observações visuais;
 - Análises metalográficas; e
 - Varreduras com microscópio eletrônico.

Em relação aos testes de arrebentamento nos tubos de revestimento, os testes foram divididos em três séries:

- Primeira série de testes:

Nessa etapa, iniciada em 1995, 54 CP de ligas à base zircônio foram aquecidos em um forno de resistência capaz de prover condições isotérmicas de temperaturas que variaram de 650-1200°C. Após a estabilização da temperatura, iniciava o aumento linear da pressão interna do CP até seu arrebentamento. Um sistema de aquisição computadorizado captava o histórico de pressão do ensaio. O aparato experimental utilizado nessa série de ensaios pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Sistema de aquisição da primeira série de testes.

Fonte: referência [25].

- Segunda série de ensaios:

Foram ensaiados 31 CP de *zircaloy-4* no mesmo aparato experimental da Figura 6 para se produzir uma análise comparativa com resultados de experimentos similares realizados na época [26, 27].

- Terceira série de ensaios:

A terceira série de ensaios teve início no ano 2000, nessa fase 21 amostras foram testadas com o objetivo de investigar os efeitos da pressurização e da taxa de aumento da temperatura sobre a pressão de arrebentamento em CP de ligas à base de zircônio. Para se obter altas pressurizações e vapor atmosférico, foi necessário o desenvolvimento do aparato experimental da Figura 7.

Figura 7 - Aparato experimental da terceira série de ensaios.

Fonte: Referência [25].

Somando-se a isso, há publicações que confrontaram resultados numéricos com resultados experimentais provenientes de testes no reator de Halden, localizado na Noruega, como no caso das referências [28, 29].

Na publicação [28] foi desenvolvido um modelo computacional para a ruptura da VC em condições de LOCA e implementado no código de desempenho de transiente da vareta de combustível, o FRAPTRAN-1.4. O modelo foi baseado em ligas de zircônio e considerou, dentre outros aspectos, as fases sólidas de transformação cinética, oxidação e deformação do revestimento. Os resultados numéricos foram comparados com os dados

experimentais de teste realizados no reator de Halden. Foram verificados os seguintes aspectos:

- Máxima deformação circunferencial na ruptura;
- Incremento do diâmetro do revestimento em função da posição axial;
- Evolução da pressão interna da VC ao longo do tempo;
- Pico de temperatura no revestimento no momento da ruptura; e
- Análise da espessura do revestimento após os ensaios.

Ainda na da referência [28], foram observados dois tipos de LOCA para a análise computacional. No primeiro tipo, foi considerado o transiente de arrebentamento de uma única VC, realizado no laboratório alemão *Kernforschungszentrum Karlsruhe*, cujo CP foi aquecido indiretamente por resistência elétrica. Já no segundo caso, o experimentos fazem referência às series de testes de LOCA realizadas no reator de Halden (IFA - 650), cujo CP de teste foi uma única VC com pastilhas de UO_2 [24].

Em maio de 2003, na cidade de Halden - Noruega, foi iniciada a série de testes IFA - 650 [30], cujo objetivo era simular varetas de combustível com revestimento em ligas à base de zircônio sob condições de LOCA [31]. O aparato experimental genérico da série de testes IFA - 650 pode ser observado da Figura 8.

Figura 8 - Representação esquemática da sessão de testes do aparato experimental da série de testes IFA-650.

Fonte: referência [31].

Na segunda série de ensaios (IFA - 650.2) foi ensaiada uma VC com combustível novo, sem que a vareta tenha previamente sido submetida à irradiação, com as características da VC de um reator do tipo PWR. Já nas séries 3 e 4, as VC testadas foram irradiadas em um reator PWR com queima entre 82 e 92 MWd/kgU, respectivamente. Em todos os testes realizados, as VC arrebentaram durante o teste de LOCA em temperaturas inferiores a 800°C [31].

Durante a análise dos ensaios da série 4 (IFA-650.4), foi observado o fenômeno da realocação das pastilhas. Esse fenômeno é consequência da fragmentação das pastilhas de combustível e, durante o ensaio de arrebentamento, esses fragmentos se realocaram para a região do *ballooning* [31]. A Figura 9 apresenta os resultados de evolução da pressão da VC da série 4.

Figura 9 - Medidas de pressão da VC em função do tempo nos ensaios de Halden-IFA-650.4.

Fonte: referência [31].

A série de ensaios IFA - 650 do reator de Halden motivou muitos estudos *a posteriori*, como, por exemplo, o da referência [29]. Esse trabalho objetivou a construção de modelos computacionais, com o código FRAPTRAN, para avaliar o *ballooning* e o fenômeno da realocação no revestimento em picos de temperatura verificados nos ensaios do relatório [24]. Na Figura 10, pode ser

visualizado o modelo esquemático da realocação das pastilhas implementado no código FRAPTRAN.

Figura 10 - Modelo esquemático da realocação do combustível.

Fonte: extrato da referência [29].

A Figura 11 relaciona os resultados numéricos do modelo com os resultados de deformação e deslocamento axial da VC testada na série de ensaios de IFA - 650 do reator de Halden.

Figura 11 –Comparação entre as medidas de deformação do revestimento e as previsões do modelo desenvolvido no FRAPTRAN.

Fonte: referência [29].

Ainda com relação às ligas à base de zircônio, além das publicações já citadas, pode-se elencar os documentos [32, 33].

O documento [32] busca desenvolver um modelo numérico para estimar o comportamento termomecânico do revestimento de zircaloy durante o LOCA. O modelo numérico utilizado eventualmente também é capaz de prever o *ballooning* do revestimento e o comportamento do arrebentamento em função da realocação dos fragmentos de pastilhas de combustível.

O autor utilizou o programa computacional ABAQUS para discretizar o modelo em elementos finitos, o qual considerou singularidades como o *balloning* e as consequências da realocação dos fragmentos do combustível. A validação do modelo computacional foi realizada por meio da comparação com resultados dos testes realizados no reator de Halden [31]. A Figura 12 exemplifica um resultado numérico obtido com o modelo computacional desenvolvido.

Figura 12- Componente tangencial da deformação logarítmica obtida por meio do modelo computacional.

Fonte: referência [32].

A Tabela 1, o autor da referência [32], apresenta a compilação dos dados experimentais e numéricos.

Tabela 1 - Compilação dos resultados numérico e experimentais da referência [32].

Testes/Parâmetros	Experimento IFA 650-2	Cálculo com FRAPTRAN 1.4	Modelo utilizado	Variação em relação ao experimento [%]
Temperatura de ruptura [°C]	800,0	773,0 - 806,0	788,0	1,5
Max deformação radial [%]	90,0	82,0 - 76,0	84,1	6,5
Pressão interna na ruptura [MPa]	5,6	5,7 - 5,8	5,9	5,4
Camada de óxido na espessura[μm]	40,0 - 50,0	35,00	0	---
Localização axial da ruptura [mm]	195, 0 - 230,0	---	236,0	2,5

Fonte: referência [32].

O documento [33] também trata de VC com revestimento de ligas à base de zircônio e faz, inicialmente, uma discussão relacionando os seguintes tópicos:

- Critério de aceitação para o LOCA;
- Fenômenos envolvidos na fragilização do revestimento;
- Critérios para a fragilização do revestimento (leia-se limitações de máxima oxidação e picos de temperatura na VC); e
- Bases experimentais utilizadas para definir cada critério.

A Figura 13, por exemplo, representa a microestrutura de revestimento quando submetido a condições de oxidação.

Figura 13 - Representação esquemática da microestrutura do revestimento de *zircaloy* quando submetido a altas temperaturas de oxidação.

Fonte: referência [33].

Na Figura 13, pode-se observar comportamento da oxidação do revestimento de *zircaloy* sob altas temperaturas. Verifica-se, na face externa, uma camada de óxidos e a presença de trincas. Em seguida, nota-se a fase alfa e, por fim, a fase beta com a presença de hidretos.

A principal consequência dessas alterações na microestrutura no material são alterações em suas propriedades mecânicas. O que pode comprometer o desempenho do revestimento.

Já na imagem reproduzida na Figura 14, o autor apresenta a evolução da redução da espessura do revestimento até a ruptura. Em ambas as situações (Figura 13 e Figura 14) o artigo, a partir de seu levantamento bibliográfico, ressalta a preocupação da comunidade científica com a fragilização do revestimento de ligas à base de zircônio a altas temperaturas.

Figura 14 - Representação esquemática do desenvolvimento da fragilização do revestimento até a ruptura.

Fonte: referência [33].

Em seguida, ainda na referência [33], foram realizados dois tipos de ensaios relacionados às condições de LOCA:

1. Ensaio de oxidação do revestimento, deformação e ruptura da VC e fases alotrópicas de transição de ligas à base de zircônio, sendo que cada efeito foi estudado separadamente; e
2. Testes integrais de LOCA, cuja sequência de acontecimentos relacionada ao acidente, com todos os fenômenos acontecendo simultaneamente, foi ensaiada em VC isoladas e em arranjos de múltiplas varetas de combustível.

Os resultados dos ensaios dos efeitos separados foram úteis para gerar correlações do material para cada propriedade de interesse, como pode ser observado, por exemplo, na Figura 15.

Figura 15 - Correlações para o ganho de massa de oxigênio em função da temperatura para ligas à base de zircônio com 1% de nióbio.

Fonte: referência [33].

Nos ensaios completos de LOCA utilizando uma VC apenas, o CP foi envolvido por um forno infravermelho e posicionado em uma máquina de tração, assim como pode ser verificado na Figura 16.

Figura 16 - Representação esquemática do ensaio completo de LOCA com apenas um CP.

Fonte: referência [33].

O CP testado no aparato apresentado na Figura 16 é um tubo de *zircaloy-4* que simula uma VC de 800mm de comprimento. A amostra foi vedada em ambas as extremidades com tampões de *zircaloy-4*. No entanto, as pastilhas de combustível foram substituídas por pastilhas de alumina, assim como apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Detalhe do CP utilizado no ensaio integral de LOCA.

Fonte: referência [33].

Os ensaios integrais de LOCA com arranjo de múltiplas VC foram realizados no reator NRU, localizado na cidade de *Chalk River* – Canadá. Os testes foram conduzidos com o objetivo de estudar a deformação localizada da VC (*ballooning*) e o consequente bloqueio do fluxo de refrigerante entre as VC [33].

Em função da baixa utilização do aço inoxidável em reatores comerciais, as pesquisas e dados de literatura são consideravelmente inferiores aos disponíveis para as ligas de zircônio. Contudo, após o acidente de Fukushima (2011), as atenções se voltaram para o desenvolvimento de combustíveis de tecnologia avançada, os quais objetivam suprimir os problemas

detectados como precursores do acidente nuclear da planta nuclear japonesa em 2011 [16-17].

O trabalho [17] argumenta que, após o acidente, a nova geração de reatores deve almejar os seguintes tópicos:

- Aumento da queima do combustível, objetivando minimizar os rejeitos nucleares;
- Aumentar a densidade do combustível, trazendo aumento na potência do reator; e
- Aumentar a confiabilidade da VC.

No intuito de aumentar a confiabilidade da VC, o autor sugere um conceito de um revestimento de ligas à base de molibdênio subdividido em 3 camadas, como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 - Conceito de revestimento de liga à base de molibdênio com 3 camadas.

Fonte: referência [17].

Objetivando apresentar alternativas para o revestimento de *zircaloy*, o artigo [16] sugere o retorno da utilização do aço inoxidável como material da VC. Para isso, o trabalho comparou o desempenho do aço inoxidável e do *zircaloy* sob irradiação em estado estacionário.

Foi utilizado, para a análise em questão, o código de desempenho de combustível FRAPCON-3.4. Assim, foi possível avaliar as seguintes características dos materiais ao longo do tempo de operação do reator:

- Temperaturas do revestimento e da pastilha de combustível;
- Tensão e deformação no revestimento;
- Oxidação do revestimento;
- Taxa de liberação dos gases de fissão;
- Pressão interna da VC; e
- Inchamento do revestimento.

Como exemplo dos resultados obtidos, a Figura 19 e a Figura 20 apresentam a variação da folga (*gap*) existente entre a pastilha e o revestimento e os diâmetros externos das VC de aço inoxidável e *zircaloy*, respectivamente.

Figura 19 – Folga (*gap*) entre pastilha e revestimento da VC de aço inoxidável e *zircaloy*.

Fonte: referência [16].

Figura 20 - Diâmetro externo da VC de aço inoxidável e VC de *zircaloy* ao longo do tempo.

Fonte: referência [16].

Além das comparações dos diâmetros externos e folgas entre as pastilhas e o revestimento, pode-se avaliar também a variação da pressão interna de cada material ao longo do tempo, como apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Variação da pressão interna de VC de aço inoxidável e *zircaloy*.

Fonte: referência [16].

Ainda no intuito de aprofundar os conhecimentos sobre tais combustíveis, a referência [21] estudou ligas à base de ferro como material alternativo ao *zircaloy* no revestimento. Foram analisados, o aço inoxidável austenítico 304 e ligas de ferro-cromo-alumínio.

O trabalho buscou, a partir do teste de arrebentamento, caracterizar o comportamento do revestimento de ligas à base de ferro submetido a temperaturas que variaram de 300 a 1200°C. Paralelamente, foi feita uma revisão dos resultados de teste de arrebentamento de ligas à base de zircônio para comparação.

O aparato experimental utilizado pode ser observado na Figura 22.

Figura 22 - Aparato experimental para teste de arrebentamento.

Fonte: referência [21].

Na Figura 22, nota-se que foi utilizado vapor de água para o incremento da pressão interna do CP. Os resultados experimentais foram comparados com os dados da literatura para o *zircaloy* [34], como mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Comparação das propriedades dos materiais em função da temperatura. a) análise da tensão circunferencial. b) análise da pressão interna do CP.

Fonte: referência [21].

A Figura 24 apresenta imagens da situação dos CP de ligas à base ferro, após o ensaio de arrebentamento, em diferentes condições de temperatura.

Figura 24 - Resultados de teste de arrebentamento de ligas à base de ferro em diferentes temperaturas.

Fonte: referência [21]

Pode-se observar, na Figura 24, uma tendência da pressão de arrebentamento e da tensão circunferencial diminuírem em função do aumento da temperatura do ensaio, o que é esperado para materiais metálicos à base de ferro.

Além disso, na Figura 25, verifica-se o perfil da seção transversal da VC após o arrebentamento.

Figura 25 - Micrografia da seção transversal de diversos revestimentos após o ensaio de arrebentamento.

Fonte: referência [21].

Dentre as conclusões, o documento ressalta, que o efeito do *ballooning* em ligas à base de ferro é desprezível, quando comparado ao *zircaloy* (vide Figura 25). E por fim, sugere a hipótese de que, para ligas à base de ferro, a pressão de arrebentamento, em diferentes temperaturas, esteja relacionada ao limite de resistência do material em cada temperatura [21].

3 Metodologia

Em consonância com o item 1.1, este trabalho tem por objetivo o estudo das propriedades mecânicas, em especial, a do arrebentamento do aço inoxidável 348 em temperaturas que variam de 25 a 1000°C. Para tanto, foi necessário a fragmentação do trabalho em 3 etapas.

Inicialmente, foi realizado o ensaio de arrebentamento em diferentes temperaturas. No entanto, verificou-se a impossibilidade de continuar os ensaios para temperaturas superiores a 450°C, por limitação do fluido utilizado no aparato experimental. Em seguida, o modelo computacional foi concebido e buscou-se a sua validação a partir do confronto com os resultados experimentais.

Para a correta concepção do modelo computacional, é necessário que seja fornecido ao programa, as propriedades mecânicas específicas do material utilizado para cada temperatura de interesse. Dessa maneira, foi realizado ensaio de tração no material em diferentes temperaturas, desde a temperatura ambiente até 800°C.

Assim, num terceiro momento, os resultados numéricos foram analisados frente aos experimentais e concluiu-se que o modelo computacional é válido. Dessa forma, os resultados computacionais foram extrapolados até a temperatura de 1000°C e foi construída a curva característica da pressão de arrebentamento em função da temperatura para o aço inoxidável 348.

3.1 Testes experimentais

No desenvolvimento desse trabalho, foram realizados ensaios de arrebentamento e ensaios de tração.

O ensaio de arrebentamento teve como objetivo mapear a pressão de arrebentamento do CP quando submetido a diferentes temperaturas. Inicialmente o sistema era levemente pressurizado e verificada a existência de vazamentos. Em seguida, com o forno de resistência, o CP era aquecido até se

estabilizar na temperatura de interesse. Após o sistema atingir o equilíbrio térmico, com o auxílio da máquina INSTRON, a pressão interna do CP era incrementada até a ruptura.

O ensaio de tração foi realizado com o intuito de subsidiar a simulação numérica no tocante às propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 348. Foi desenvolvido um dispositivo de encaixe para que a máquina INSTRON pudesse efetuar o ensaio à quente com um CP do tipo tubo. Para cada temperatura de interesse foram extraídas as propriedades mecânicas, limite de escoamento, limite de ruptura, módulo de elasticidade e percentual de alongação do CP. A inserção de propriedades específicas do material analisado é fundamental para a confiabilidade dos resultados numéricos.

3.1.1 Ensaio de arrebentamento

O aparato experimental disponível para o ensaio de arrebentamento pode ser observado na Figura 26. O atuador da máquina INSTRON utiliza óleo para pressurizar a linha de pressão. O fluido introduzido na linha de pressão é o óleo mobiltherm 605, indicado para uso em temperaturas de -7 a 315°C em sistemas fechados, conforme especificado no manual de instruções do equipamento. O aparato experimental disponível para o ensaio de arrebentamento pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 - Aparato experimental disponível para o ensaio de arrebentamento.

Fonte: autor da dissertação.

O forno da Figura 26, que tem capacidade de aquecimento até 1000°C, é controlado por 3 termopares localizados nas partes inferior, intermediária e superior do componente. Um quarto termopar foi instalado em contato direto com o CP, para que pudesse ser verificada, com precisão, a temperatura da amostra.

A calibração do manômetro da Figura 26 foi realizada a partir da comparação de medidas com um manômetro digital certificado pela Rede Brasileira de Calibração (RBC). O equipamento a ser calibrado foi posicionado verticalmente em uma bomba de pressão e verificada a estanqueidade da bomba a partir da aplicação de uma pré-carga.

Em seguida, foram aplicadas no mínimo dois ciclos de carregamento e descarregamento, e os valores obtidos foram comparados com o manômetro padrão (vide ANEXO A)

O teste de arrebetamento e a preparação do CP obedeceram a norma específica da ASTM [35]. A velocidade do atuador foi de 4,9 mm/min, calculada de acordo com a norma. O CP e o seu encaixe na linha de pressão podem ser vistos em detalhe na Figura 27.

Figura 27 - Detalhe da montagem do ensaio de arrebetamento: a) Corpo de prova, b) Local de encaixe do CP no final da linha de pressão.

(A)

(B)

Fonte: Autor da dissertação.

Como pode ser observado na Figura 27, o encaixe do CP na linha de pressão é do tipo rosca, sendo necessária a verificação de vazamentos na região. Assim, o sistema era levemente pressurizado e, caso não fosse observada fuga de óleo, o forno iniciava o aquecimento do CP. Após a estabilidade térmica do sistema em cada temperatura de interesse, o atuador iniciava seu deslocamento aumentando a pressão interna do CP até o arrebetamento.

Os ensaios de arrebetamento foram realizados em quatro temperaturas. O maior limitante do ensaio foi a temperatura de utilização do fluido, inerente ao aparato experimental disponível. Não foi possível continuar os ensaios a temperaturas acima de 450°C, por exceder os limites de segurança do ensaio. Assim, foram realizados ensaios nas temperaturas ambiente (25°C), 150°C, 370°C e 450°C, com 5 CP analisados em cada nível térmico. Cada CP possui 160 mm de comprimento, 10 mm de diâmetro e 0,6 mm de espessura.

Ressalta-se a impossibilidade de substituição do fluido compressão do sistema, visto que, no aparato experimental disponível, apenas poderia ser utilizado o óleo especificado pelo fabricante.

3.1.2 Ensaio de tração

Inicialmente as simulações com o software ANSYS foram realizadas com propriedades mecânicas genéricas do aço inoxidável austenítico da série 300 disponíveis na literatura. Porém, visando a eliminar essa potencial fonte de divergência entre os resultados numéricos e experimentais, optou-se pela realização de ensaios de tração para subsidiar as simulações computacionais.

Dessa maneira, para cada temperatura de interesse, foram obtidas as propriedades mecânicas limite de resistência, módulo de elasticidade, limite de escoamento e elongação máxima específicas para o aço inoxidável AISI 348 utilizado nos testes de arrebetamento. Assim, após a inserção das propriedades encontradas no software ANSYS, maior precisão e confiabilidade foram creditados aos resultados numéricos.

O aparato experimental disponível para o teste de tração está evidenciado na Figura 28 e na Figura 29.

Figura 28 - Aparato experimental para o ensaio de tração.

Fonte: autor da dissertação.

O atuador da Figura 28 foi calibrado de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma ASTM E2309 [36] (vide ANEXO B).

Figura 29- Detalhe da montagem do CP na INSTRON.

Fonte: autor da dissertação.

O procedimento experimental do ensaio de tração obedeceu diretrizes da norma ASTM específica [37]. A forma de fixação do CP na máquina INSTRON é a partir de uma rosca. Dessa maneira, foi necessário o desenvolvimento das peças bala e fuso para que o tubo ensaiado se mantivesse fixo ao fuso por atrito, como observado na Figura 30.

O tubo foi dimensionado para possuir um comprimento útil para o teste de 100mm, conforme especificado em norma [37]. Os diâmetros da bala e o interno do fuso foram projetados de forma que o tubo se mantivesse fixo nas garras da INSTRON devido à interferência de montagem dos componentes (vide Figura 29 e Figura 30). Os materiais do fuso e bala foram especificados em aço inoxidável para que a interferência da montagem não fosse prejudicada em função da dilatação térmica do CP.

Figura 30 - Montagem do CP: a) peças separadas, b) CP montado.

Fonte: autor da dissertação.

Foram especificadas 6 temperaturas para o ensaio, 25°C, 150°, 370°, 450°C, 650°C e 800°C, sendo que para cada uma delas foram ensaiados 5 CP.

A referência [37] determina que a amostra deve ser marcada longitudinalmente e seu alongamento deve ser medido na distância de 50 mm correspondente à marcação inicial do CP.

Dessa forma, o CP da Figura 30 (b) foi pintado com tinta de marcação apropriada e posicionado na castanha de um torno mecânico para a realização das marcações. Houve o cuidado para que cada marcação fosse espaçada de 10 mm, conforme mostrado na Figura 31 (a).

Porém, durante a realização dos ensaios verificou-se que a tinta de marcação evaporava a temperaturas superiores a 370°C, inviabilizando a medição do alongamento a 50 mm. Assim, optou-se, a partir da temperatura de 450°C, medir o percentual de alongamento em função das distâncias inicial e final dos fusos, como pode ser observado na Figura 31 (b).

Figura 31 - CP para teste de tração: a) medida de alongamento em CP após o ensaio a 150°C, b) medida de alongamento em CP após o ensaio a 450°C.

Fonte: autor da dissertação.

A imagem da Figura 32 apresenta em detalhes o final do ensaio de um dos CP a 800°C, ilustrando uma situação extrema do equipamento, com o CP e as garras da INSTRON incandescentes.

Figura 32 - Final do ensaio de tração a 800°C.

Fonte: autor da dissertação.

3.2 Simulação computacional

Segundo a norma ASME V&V [38], durante a concepção de um modelo computacional os conceitos de verificação e validação devem ser observados.

A validação é o processo que determina o grau de precisão em comparação com o caso real, considerando a perspectiva de uso pretendida com o modelo.

Já a verificação está relacionada aos modelos matemáticos envolvidos, é o processo que analisa se as implementações do modelo matemático utilizado, assim como se sua solução, estão corretas [38].

Assim, a partir dos direcionamentos da referência [38], a geometria do modelo computacional, construído no programa SOLIDWORKS [39], foi idealizada de forma a reproduzir, em linhas gerais, a geometria do CP da *Figura 27 (a)*, com pode ser observado na *Figura 33*.

Figura 33 - Concepção do modelo computacional.

Fonte: autor da dissertação.

Observando a dinâmica de funcionamento do ensaio de arrebetamento, na qual o CP é fixado no final da linha pressão e a pressão do fluido é aumentada uniformemente no interior do CP a partir do deslocamento do atuador (vide Figura 26 e Figura 27), foram determinadas condições de contorno do modelo.

O modelo computacional da Figura 33 teve restringido apenas seu deslocamento na direção “z” a partir da base. Dessa forma, foi permitido somente o deslocamento nas direções radial e tangencial.

As solicitações mecânicas foram aplicadas em todas as superfícies internas, a partir de um carregamento linear crescente de pressão na direção normal à cada superfície, como pode ser visto na Figura 34. A taxa de incremento linear da pressão objetivou representar a velocidade constante de deslocamento do atuador durante os ensaios de arrebetamento.

Figura 34 - Exemplo de aplicação de carregamento no modelo computacional: a) Pressão na direção normal às superfícies internas, b) incremento de pressão ao longo do tempo.

(A)

(B)

Fonte: autor da dissertação.

3.2.1 Método de Elementos Finitos

O programa ANSYS utiliza o Método de Elementos Finitos (MEF) para a realização das simulações computacionais [22]. O MEF utiliza funções de convergência para solucionar problemas de continuidade física, e sua convergência é aproximada ao real quanto mais elementos forem considerados na análise [40].

O refinamento é uma ferramenta que define a subdivisão de elementos, o que influencia diretamente na qualidade da malha. O desempenho dos diversos tipos de refinamento pode ser analisada pela relação da taxa de convergência do elemento finito e a estimativa de erro dos resultados [41].

Para o modelo analisado, optou-se pelos elementos do tipo tetraédricos para o tampão e elementos hexaédricos (tipo placa) para o tubo (vide Figura 35). O processo de refino foi baseado no aumento do número de elementos tipo placa ao longo da espessura do tubo, visto que a informação de interesse é a tensão na direção radial do modelo.

O ANSYS [22] disponibiliza diversas métricas para análise da qualidade da malha, as quais verificam aspectos geométricos do elemento, como relação entre arestas, distorções e variação de volumes. Dentre os diferentes recursos de análise de malha pode-se citar: *element quality*, *aspect ratio*,

jacobian ratio, *warping factor*, *parallel devitation*, *maximum corner angle*, entre outros, sendo que a escolha da métrica está relacionada ao tipo de elemento utilizado.

Para o elemento hexaédrico, com faces planas bem definidas, a métrica que melhor se adequa é a *aspect ratio*, a qual realiza uma razão entre o maior e o menor lado do elemento. O programa enfatiza que o índice ideal nessa análise é 1, resultado de um cubo, no entanto, reconhecendo as particularidades de cada simulação, há a sugestão para que essa métrica não exceda 20, ou seja, que a máxima dimensão do elemento seja no máximo vinte vezes maior que a dimensão mínima.

3.2.1.1 Verificação de Malha

Sabe-se que a quantidade de elemento finitos é diretamente proporcional à precisão da resposta. Em contrapartida, em casos específicos, o refino exagerado da malha em determinada direção pode gerar aumento da distorção do elemento, ocasionando potenciais desvios de resposta localmente no modelo.

Para o modelo da Figura 33, na verificação da malha, foram utilizados dois métodos em paralelo, a convergência de resultados baseada na estimativa de erros [41] e o parâmetro geométrico *aspect ratio* para o controle das distorções do elemento.

Como referência para a estimativa de erros foram utilizados os resultados experimentais na temperatura de 370°C. Com exceção do número de elementos na espessura do modelo, todos os demais parâmetros foram mantidos constantes, e os resultados foram comparados aos da pressão de arrebentamento a 370°C, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Verificação de malha de elementos finitos.

nº Elem.	1	2	3	4	5	6	7
P_num [MPa]	51,97	51,57	51,45	51,38	51,34	51,31	51,29
Erro %	1,50%	0,73%	0,48%	0,34%	0,27%	0,22%	0,18%
<i>aspect ratio</i>	2,38	3,95	6,31	7,88	9,65	11,6	13,5

Fonte: autor da dissertação.

Observando as sugestões do programa [22] relacionada ao parâmetro *aspect ratio*, optou-se por um valor próximo ao intermediário, ou seja, em torno de 10. Na Tabela 2, verificou-se que o modelo com cinco elementos na espessura foi o que melhor atendeu aos requisitos de erro em relação ao resultado experimental e ao nível de distorção do elemento.

Assim a discretização do modelo computacional foi definida com 5 elementos hexaédricos na espessura do tubo e elementos tetraédricos no tampão, como pode ser observado na Figura 35.

Figura 35 - Modelo computacional discretizado em MEF: a) modelo completo, b) Detalhe do tampão do CP, c) Detalhe do tubo do CP.

Fonte: autor da dissertação.

A partir do nível de discretização definido (Figura 35), o modelo contou com 18463 elementos, dispersos entre hexaédricos e tetraédricos, e 11960 nós.

O contato tubo/tampão foi especificado como *bonded* para representar a solda existente no CP.

Sob o ponto de vista de dados dos materiais, sabe-se que a confiabilidade da simulação numérica está diretamente relacionada à veracidade das propriedades mecânicas do material selecionado para cada componente do modelo.

Dessa maneira, como os dados de literatura do limite de escoamento, alongamento máximo, módulo de elasticidade e limite de resistência se mostraram levemente divergentes das propriedades mecânicas do aço inoxidável 348, optou-se pela realização de ensaios de tração em cada temperatura de interesse para fornecer os dados do material para o programa (vide item 3.1.2).

Para a simulação numérica foi criado um novo material na biblioteca do programa e utilizou-se como aproximação para o comportamento elastoplástico do material o modelo bi linear. Em seguida, foram inseridas as propriedades mecânicas para cada temperatura de interesse (vide Figura 36)

Figura 36 - Exemplo de inserção das propriedades mecânicas no software ANSYS.

Fonte: autor da dissertação.

A simulação numérica se desenvolveu no módulo *explicit dynamics* do programa ANSYS. Nessa metodologia os cálculos são realizados de forma explícita a partir de incrementos de carregamento ao longo do tempo.

Foi estipulado o tempo de simulação de 10^{-4} s, sendo que o incremento de tempo para realização dos cálculos é definido automaticamente pelo programa de acordo com tipo de carregamento. Dessa maneira, o carregamento de pressão interna foi aplicado de forma crescente e linear ao longo do tempo de simulação. O programa realizou cálculos com o incremento de tempo de $3,67 \cdot 10^{-9}$ s.

O critério utilizado para determinar a pressão de arrebentamento do modelo foi relacionado ao limite de resistência, conforme sugerido na referência [21]. Assim, foi considerada como pressão de arrebentamento aquela que gerou uma tensão equivalente ao limite de resistência do material a dada temperatura. Foram realizadas simulações numéricas para as seguintes temperaturas: 25°C, 150°, 370°, 450°C, 650°C e 800°C.

4 Resultados e discussão

Conforme explicado no item 3.1.1, a máxima temperatura possível no ensaio de arrebentamento foi de 450°C. Os resultados obtidos nos experimentos realizados estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados obtidos no ensaio de arrebentamento a diferentes temperaturas

CP	P_25°C [MPa]	P_150°C [MPa]	P_370°C [MPa]	P_450°C [MPa]
1	71,3	55,9	50,3	48,6
2	69,5	55,8	52,6	48,8
3	69,1	55,9	50,5	48,9
4	70,9	56,8	51,6	47,9
5	70,5	53,7	51,0	49,1
Média [MPa]:	70,3	55,6	51,2	48,7
Desvio padrão: [MPa]	0,9	1,1	0,9	0,5

Fonte: autor da dissertação.

Devido à limitação do fluido para compressão do sistema, não foi possível a realização do ensaio em temperaturas superiores a 450°C, por risco de comprometer a segurança do ensaio.

Reitera-se a impossibilidade de troca do fluido compressivo em função do aparato experimental disponível. O manual de instruções do equipamento veda a possibilidade de utilização de gás ou outro fluido com maior resistência a altas temperaturas sob pena de comprometer o funcionamento da máquina.

O perfil de arrebentamento dos CP pode ser observado na Figura 37 e na Figura 38.

Figura 37 - Perfil de arrebetamento para ensaios em temperaturas inferiores a 370°C.

Fonte: autor da dissertação.

Figura 38 - Perfil de arrebetamento do CP na temperatura de 450°C.

Fonte: autor da dissertação.

Verifica-se que até a temperatura de 370°C, o perfil de arrebentamento foi similar (Figura 37). No entanto, na temperatura de 450°C (Figura 38), nota-se, em função da dimensão da avaria causada no CP, uma ruptura mais intensa. Esse fato pode ser explicado pelas tensões trativas, propriedades mecânicas e pressão de arrebentamento na comparação entre as temperaturas de 450 e 370°C.

Quando comparado com os resultados do ensaio de tração e pressão de arrebentamento a 370°C, a pressão de arrebentamento reduziu 4,8% (Tabela 3), enquanto que as propriedades mecânicas (Tabela 4) reduziram, em média, 11,4% quando o CP foi submetido à temperatura de 450°C. Dessa maneira, imagina-se que, instantes antes do arrebentamento, as tensões trativas no CP a 450°C eram proporcionalmente maiores do que a 370°C, o que ocasionou em maiores avarias no momento do rompimento da amostra.

Consoante com o item 3.1.2, foram realizados ensaios de tração do material em diversas temperaturas, no intuito de fornecer propriedades mecânicas para o software ANSYS nas simulações numéricas. Os valores médios dos resultados e os parâmetros extraídos do ensaio de tração estão expostos na Tabela 4. Ressalta-se que os resultados dos 5 CP para cada temperatura do ensaio de tração, com os respectivos parâmetros estatísticos, pode ser verificado no ANEXO C.

Tabela 4 – Valores médios das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração a diferentes temperaturas

Propriedades Mecânicas	Temperatura					
	25 °C	150 °C	370 °C	450 °C	650 °C	800 °C
S_esc [MPa]	319,0	271,2	241,0	209,0	204,0	158,0
S_max [MPa]	646,0	493,2	454,0	444,0	386,8	210,0
Along_%	49,9	31,8	26,3	19,7	17,2	20,8
E [GPa]	200,0	190,0	177,0	168,0	154,0	143,0

No teste de tração, a função do extensômetro é determinar o módulo de elasticidade do material ensaiado. Em razão do aparato experimental disponível para o ensaio de tração, o extensômetro foi apoiado no CP em apenas dois pontos (vide Figura 28). Esse contato gerou constantes escorregamentos

no equipamento, o que inviabilizou a extração da propriedade mecânica módulo de elasticidade. Ressalta-se que as demais propriedades da Tabela 4 não foram afetadas pelo problema.

Como alternativa, entrou-se em contato com a empresa fabricante dos tubos [42]. No entanto, foi informado o módulo de elasticidade somente nas temperaturas de 25°C e 370°C. Para as demais temperaturas utilizou-se a correlação de módulo de elasticidade em função da temperatura para o aço inoxidável AISI 347 existente na base dados MATPRO [43].

As propriedades mecânicas da Tabela 4 foram inseridas no programa ANSYS e em seguida buscou-se validar o modelo computacional para as temperaturas do ensaio e extrapolar os resultados numéricos para temperaturas superiores a 450°C. A Figura 39 ilustra um exemplo de distribuição de tensões no modelo em função da pressão interna aplicada.

Figura 39 - Exemplo de resultado de simulação numérica a 150°C.

Fonte: autor da dissertação.

Os resultados de tensão extraídos do ANSYS [22] (vide Figura 39) foram tratados de modo a se verificar qual nível de pressão foi responsável por gerar determinado campo de tensão no modelo.

Na Figura 40, pode-se observar, paralelamente, o incremento de pressão e a resposta do modelo, ambos ao longo do tempo de simulação (10^{-4} s).

Figura 40 – Análise dos resultados. A) Exemplo de incremento do carregamento de pressão. B) Resposta de tensão equivalente no modelo.

Fonte: Autor da dissertação.

O critério utilizado para determinar a pressão de arrebentamento numérica se baseou na metodologia sugerida na referência [21]. Foi mapeado, a partir da comparação com o tempo de simulação (vide Figura 40), a pressão responsável por fazer o modelo computacional atingir seu limite de resistência. Essa pressão foi denominada de pressão de arrebentamento numérica do material a determinada temperatura. Esse procedimento foi repetido para cada temperatura simulada.

A comparação dos resultados numéricos e experimentais pode ser observada na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais a diferentes temperaturas

Temperatura [°C]	P_experimental [MPa]	P_numérica [MPa]	Erro %
32	70,3	69,9	0,5%
150	55,6	62,2	11,8%
370	51,2	51,3	0,3%
450	48,7	50,4	3,6%
Erro médio:			4,0%

Fonte: autor da dissertação.

Como pode ser verificado na Tabela 5, nas temperaturas em que o módulo de elasticidade utilizado foi específico do aço inoxidável 348 (32°C e 370°C) o modelo trouxe erros mínimos, inferiores a 0,6%. O erro acima de 10% observado na temperatura de 150°C sugere que, nessa temperatura, há uma possível divergência entre o módulo de *Young* do aço inoxidável AISI 348 e o 347 adquirido pela correlação da base de dados MATPRO [43], fato que é atenuado na temperatura de 450°C, visto que o erro encontrado foi de 3,6%.

De acordo com as referências [44 - 47], os aços inoxidáveis austeníticos têm a capacidade de manter praticamente íntegra sua estrutura cristalina cúbica de face centrada tanto a baixas quanto a altas temperaturas, garantindo que o material tenha boa resistência mecânica mesmo em condições extremas. Dessa forma, pode-se afirmar que, para os aços inoxidáveis da série 300, não há alterações abruptas de comportamento estrutural até o ponto de fusão do material. Assim sendo, é possível a utilização do modelo computacional, após a validação, para temperaturas extrapoladas.

A Tabela 6 relaciona os resultados numéricos de pressão de arrebentamento para cada temperatura de interesse.

Tabela 6 - Resultados numéricos da pressão de arrebentamento.

Temperatura [°C]	Pressão de arrebentamento [MPa]
32	69,9
150	62,2
370	51,3
450	50,4
650	46,5
800	37,9

Fonte: autor da dissertação.

A partir dos dados da Tabela 3 e da Tabela 6, foram realizadas simulações nas temperaturas analisadas e com os resultados foi construída a curva da Figura 41.

Figura 41 – Compilação dos resultados

Fonte: autor da dissertação.

A partir dos resultados numéricos (vide Figura 41) foi ajustada uma equação exponencial (eq. 1), cujo valor R^2 calculado é 0,968. Ressalta-se que a equação 1 foi ajustada considerando somente os resultados numéricos. Na Figura 41, os resultados experimentais foram expostos apenas para fins ilustrativos.

Assim, obteve-se a equação 1 para representar a evolução da pressão de arrebetamento do aço inoxidável 348 em função da temperatura:

$$P = 70,129 * e^{-0,0007 * T} \quad (1)$$

Optou-se por uma correlação exponencial por ser a função que melhor se adequa ao perfil de comportamento do material exposto na literatura [21].

4.1 Metodologia de análise em códigos de desempenho do combustível

O presente trabalho sugere que seja utilizado o código de desempenho do combustível TRANSURANUS para a análise e inserção das propriedades do material aço inoxidável 348. A escolha se deve em função da compartimentação dos cálculos do software em sub-rotinas, o que facilita a validação das etapas de

cálculo, e por sua versatilidade, visto que ele realiza cálculos tanto no regime estacionário quanto em transientes operacionais e acidente [15].

A estrutura do código TRANSURANUS reflete a estrutura de um modelo teórico que pode ser dividido em três níveis, são eles:

- Nível 1: é o que norteia os cálculos do programa em linhas gerais. O código é controlado por integrações de tempo para cada variável envolvida. O incremento de tempo é específico para cada cálculo é dado em função de critérios de estabilidade e controle de precisão;
- Nível 2: é a discretização axial dos componentes de interesse, além do acoplamento axial de cada elemento e a convergência dos resultados; e
- Nível 3: é o controle de análises de cada parte discretizada no nível 2. São realizadas análises térmicas e mecânicas a partir de todos os modelos físicos necessários.

As equações básicas utilizadas pelo código são, de modo geral, relacionadas às análises térmicas e mecânicas. No que tange aos cálculos térmicos, são considerados os seguintes aspectos:

- Método de cálculo de diferenças finitas ou método de elementos finitos. Em casos especiais, ambos os métodos podem ser combinados para elevar a precisão dos resultados;
- Taxa de transferência de calor entre o combustível e o revestimento;
- Mudanças de fase (fusão e ebulição).

Já as análises mecânicas consistem em cálculos de tensão, deformação e seus respectivos deslocamentos. Ressalta-se que todas as variações de volume resultantes dos cálculos, como por exemplo as fraturas, a densificação e os inchamentos são expressos pelo resultado de deformação [15].

O código é compartimentado em sub-rotinas, onde cada sub-rotina possui métodos de cálculos específicos. No entanto, as propriedades necessárias para a realização dos cálculos são provenientes de uma única base de dados.

Cada material é referenciado por um código alfanumérico. As correlações e propriedades mecânicas de cada material são apontadas para o respectivo código alfanumérico. Dessa forma é possível que o programa trabalhe com diversos materiais.

Especificamente para o arrebetamento, o código TRASURANUS utiliza a sub-rotina SIGMAB. Essa sub-rotina calcula a tensão tangencial verdadeira no momento da ruptura do revestimento em função da temperatura e da concentração de oxigênio [48].

No entanto, para os cálculos do revestimento sob as condições de LOCA, são utilizadas outras sub-rotinas, as quais fazem a referência a modelos não lineares. Sob essa ótica, pode-se citar as rotinas que estão envolvidas na formulação explícita da fluência, leia-se STRNDR, STRN05 e ETACR.

O algoritmo STRNDR contém os critérios gerais para utilização de todos os componentes. A partir dos critérios gerais, a rotina STRN05 calcula o incremento de deformação sob fluência do revestimento. Por fim, os resultados são inseridos na sub-rotina ETACR, a qual possui as correlações de falha sob fluência para o combustível e para o revestimento [48]

Apesar da maioria das propriedades dos materiais do banco de dados ser de ligas à base de zircônio, aos poucos vão sendo introduzidos, no banco de dados do código TRANSURANUS, novos materiais, como por exemplo ligas à base de ferro.

Em outubro de 2017, foi publicado um trabalho realizado no Laboratório Nacional de Idaho – EUA, o qual objetivou buscar correlações e propriedades mecânicas para a liga de FeCrAl C35M [49].

Os resultados desse estudo [49] foram incorporados na biblioteca do código TRANSURANUS, o que possibilitou que fossem iniciadas as simulações de desempenho de combustível para ligas à base de ferro.

Contudo, ainda não é possível realizar simulações de desempenho de combustível com revestimento de aço inoxidável, em função da inexistência de estudos específicos e aprofundados como o da referência [49].

Dessa maneira, o presente trabalho sugere a inserção da correlação da pressão de arrebetamento em função da temperatura, obtida na equação 1, de forma a contribuir para o banco de dados do material aço inoxidável 348. Assim,

futuramente, após a reunião de outros estudos específicos para o referido material, será possível realizar simulações com o código TRANSURANUS no intuito de prover informações que auxiliem no projeto de um elemento de combustível que utilize como material de revestimento o aço inoxidável austenítico.

5 Conclusões

Em relação aos ensaios experimentais desenvolvidos nesse trabalho, verificou-se a existência de limitações intrínsecas ao processo em temperaturas superiores a 450°C tanto no ensaio de arrebentamento quanto no ensaio de tração. A faixa de temperatura ensaiada no teste de arrebentamento se limitou a 450°C, em função do fluido utilizado para aumentar a pressão do sistema (vide item 3.1.1).

Para que a troca o fluido de compressão por outro com maior resistência à temperatura, como por exemplo o gás argônio, fosse possível, seria necessário a aquisição de outro aparato experimental.

Já no ensaio de tração, observou-se que em temperaturas superiores a 450°C a tinta utilizada para marcação do CP evaporava, inviabilizando a medição do alongamento final da amostra conforme a norma [37]. No entanto, foram estudadas soluções para ambos os problemas, de forma a permitir a continuidade dos trabalhos.

Dessa maneira, em consonância com os resultados apresentados no item 4, pode-se concluir que a metodologia utilizada logrou êxito, visto que o modelo computacional elaborado foi validado a partir do confronto com os resultados experimentais.

Após os resultados das simulações computacionais foi possível a construção da curva característica de pressão de arrebentamento do aço inoxidável 348, conforme observado na Figura 41. A equação exponencial encontrada se ajustou aos resultados numéricos com valor de R^2 superior a 0,968, o que confere boa confiabilidade para sua utilização.

Dessa forma, em função da uniformidade do comportamento mecânico estrutural do material em função da temperatura (vide item 4), pode-se prever o comportamento da pressão de arrebentamento do aço inoxidável 348 para níveis térmicos que variam da temperatura ambiente até temperaturas próximas a 800°C (vide equação 1).

Contudo, vale ressaltar que a realização de ensaios de arrebentamento em temperaturas superiores a 450°C são bem-vindas, posto que resultarão em mais dados para comparação entre os resultados numéricos e experimentais.

Após levantamentos técnicos da capacidade e do potencial de utilização dos códigos de desempenho de combustível, o presente trabalho sugere que a correlação obtida da equação 1 seja inserida no código TRANSURANUS. Ele foi escolhido em função da sua versatilidade, visto que realiza simulações tanto no regime estacionário quanto em transientes, e por ser um código compartimentado em diversas sub-rotinas, o que facilita a validação de resultados de um novo material.

6 Atividades futuras

Desenvolvimento de novo aparato experimental para realização de ensaio de arrebentamento a temperaturas superiores a 450°C e ensaios de tração em temperaturas superiores a 800°C e implementação dos resultados obtidos em códigos de desempenho do combustível.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SAN ONOFRE SAFETY; disponível em <<https://sanonofresafety.org/nuclear-waste/>>; acesso em 15 de maio de 2019.
- [2] AMERICAN NUCLEAR SOCIETY; ***Ligh water reactors fuel assembly mechanical design and evaluation***; La grange Park, Illinois (USA); ANS 1996.
- [3] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR; ***Garantia da qualidade na aquisição, projeto e fabricação de elementos combustíveis*** (CNEN NE 1.27); Rio de Janeiro, 1995.
- [4] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR; ***Transporte, recebimento, armazenagem e manuseio de elementos combustíveis de usinas nucleoeletricas*** (CNEN NE 5.02); Rio de Janeiro 2003.
- [5] INTERNACIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; ***Safety standards series: Design of the reactor core for nuclear power plants*** (IAEA NS-G-1.12); 2006.
- [6] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION OF UNITED STATES OF AMERICA; ***Chapter 4.2: Fuel system design, rev 3***; (NUREG - 0800); USA; 2007.
- [7] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS; disponível em <<https://www.asme.org/about-asme/standards>>. acesso em 20 de maio de 2019.
- [8] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION OF UNITED STATES OF AMERICA; ***Standard review plan - Introduction, rev 2***, (NUREG - 0800); USA; 2007.
- [9] MENDES, N. M. F.; DUVAIZEM, J. H.; BRESSIANI, A. H. A.; TAKIISHI, H. *Utilização do zircaloy-4 em ligas Ti-13Nb-13Zr para aplicação como biomaterial*. In: 7º ***Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais***, 2012, Natal, RN. Anais do 7º COLAOB, 2012
- [10] PARSONS, P. D.; HINDLE, E. D.; MANN, C. A., ***The deformation, oxidation and embrittlement of PWR fuel cladding in a loss-of-coolant***

accident; Technical Report CSNI, 129, Paris, France: OECD Nuclear Energy Agency, *United Kingdom*; 1986.

- [11] GEELHOOD, K. J.; LUSCHER, W. G., **FRAPCON-3.5 A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup**, (NUREG/CR-7022, vol. 1, rev.1); USA; 2014.
- [12] GEELHOOD, K. J.; LUSCHER, W. G., **FRAPTRAN 1.5 Integral Assessment**, (NUREG/CR-7022, Vol. 2 Rev.1); USA; 2014.
- [13] ALLISON, C. M.; et al; **Code Manual Volume IV: MATPRO - A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis.**, (NUREG/CR-6150), USA; 1993.
- [14] GEELHOOD, K. J.; LUSCHER, W. G., **FRAPCON-3.5 Material property Correlations: Comparisons between FRAPCON-3.5, FRAPTRAN-1.5, and MATPRO**, (NUREG/CR-7024 Rev.1); USA; 2014.
- [15] LASSMANN, K.; **TRANSURANUS: A fuel rod analysis code ready for use**, *Journal of Nuclear Materials*, vol 188 Pg 295-302., *Holland*; 1992.
- [16] ABE A.; GIOVEDI, C.; GOMES, D. S.; SILVA, A. T.; *Revisiting stainless steel as pwr fuel rod cladding after fukushima daiichi accident*; **Journal of Energy and Power Engineering**, vol 8, Pg 973-980; 2014.
- [17] SHANNON, B. S.; *Development of advanced accident tolerant fuels for commercial LWRs*; **Nuclear News**, vol 53, número 3, pg 83-91; 2014.
- [18] GIOVEDI, C.; ABE, A.; CHERUBINI, M.; D'AURIA, F.; *Assessment of stainless steel 348 fuel rod performance against literature available data using transuranus code*, **EPJ Nuclear Sciences & Technology**, vol 2, 27; DOI: 10.1051/epjn/2016017; 2016.
- [19] GIOVEDI, C. et al; *Comparison of Fuel Performance Codes Using Stainless Steel as Cladding Material*, **WRFPM 2014: 2014 water reactor fuel performance meeting/ top fuel / LWR fuel performance meeting**; Sendai, Miyagi (Japan); 2014.
- [20] GOMES, D. S. et al; *Evaluation Of Corrosion On The Fuel Performance Of Stainless Steel Cladding*, **EPJ Nuclear Sciences & Technology**, vol 2, 40; DOI: 10.1051/epjn/2016033; 2016.
- [21] MASSEY, C. P.; TERRANI, K. A.; DRYEPONDT, S. N.; PINT, B. A.; *Cladding burst behavior of Fe-based alloys under LOCA*, **Journal of Nuclear Materials**, vol 470, pg 128-138; USA; 2016.

- [22] ANSYS, *Computacional Applications and System Integration Inc.*, Version 15.0, disponível em < <https://www.ansys.com>>, acesso em 01 de fevereiro de 2019.
- [23] MASSIH, A. R.; JERNKVIST, L. O.; **Assessment of data and criteria for cladding burst in loss-of-coolant accidents**, Report number: 2015:46 ISSN: 2000-0456; Swedish Radiation Safety Authority; 2015.
- [24] EK, M.; **The second experiment IFA-650.2** , Technical Report HWR-813; OECD Halden reactor project; Institutt for energiteknikk, Halden; Norway; 2005.
- [25] PEREZ-FERÓ E.; et al., **Experimental database of e110 claddings under accident conditions**, Atomic Energy Research Institute, Hungarian Academy of Sciences, Budapest. Hungary; 2007.
- [26] FRECSKA, J.; MATUS, L.; PUMMER, I; **Fűtőelemviselkedés VVER Reaktortípusnál**, OMFB-94-97-47-0817/2.5 ; Research Report in Hungarian , Budapest.; Hungary, 1996.
- [27] GYŐRI, C.;et al, *VVER Ballooning Experiments*; **EHPG Meeting Lillehammer**, HPR-349/40, Norway; 1998.
- [28] MANNGÅRD, T.; JERNKVIST, L. O.; MASSIH, A. R.; **Evaluation of loss-of-coolant accident simulation tests with the fuel rod analysis code FRAPTRAN-1.4**, Report TR11-008V1; Quantum Technologies AB; Boston; USA, 2011.
- [29] GOVERS, K.; VERWERFT, M.; *Simulation of ballooning & relocation in the halden loca tests with FRAPTRAN*, **Enlarged Halden Programme Group meeting**; Roros, Norway, 2014.
- [30] LEE, J.; et al, *Benchmark calculation on halden IFA - 650.4 LOCA test by FRAPTRAN/RELAP5 code*, **Transactions of the Korean Society Autumn meeting**; PyeongChang; Korea; 2008.
- [31] MANNGAÂRD, T.; MASSIH, A.; STENGÂRD, J.; **Evaluation of the Halden IFA-650 loss-of-coolant accident experiments 2, 3 and 4**, Report number 2014:18, ISSN: 2000-0456, Swedish Radiation Safety Authority; 2014.
- [32] LANDAU, E., WEISS, Y.; SZANTO, M.; *Numerical Ballooning and Burst Prediction of Fuel Cladding During LOCA Transients in LWR*, **The 27th Conference of the Israel Nuclear Societies - Reactor Physics and Technology III**, pg 152-155; Israel; 2014.

- [33] MASSIH, A. R.; **Review of experimental data for modelling LWR fuel cladding behaviour under loss of coolant accident conditions**, Report 2007:14; Quantum Technologies AB, Uppsala, Sweden; 2007.
- [34] CHAPMAN, R. H.; **Multirod burst test program, Progress report for april-june**, US NRC Report NUREG/CR-1023, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, USA; 1979
- [35] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **Standard specification for wrought zirconium alloy tubes for nuclear reactor fuel cladding**, (ASTM - B 811); Pensilvânia, USA; 2014.
- [36] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **Standard practices for verification of displacement measuring systems used in testing machines**. (ASTM, E2309/E2309m); Pensilvânia, USA 2016.
- [37] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **Standard test methods for tension testing of metallic materials**, (ASTM E8/E8M) Pensilvânia, USA; 2014.
- [38] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS; **Guide for verification and validation in computational solid mechanics**, (ASME V&V10); New York, USA; 2006.
- [39] SOLIDWORKS- CORPORATION, **3D Computer - aided desing**, version 2017, disponível em <<https://www.solidworks.com>>; acesso em 26 de maio de 2019;
- [40] BARROS, F. B.; **Métodos sem malha e métodos dos elementos finitos generalizados em análise não-linear de estruturas**. 2002; 222 p., Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.
- [41] LO, S. H.; LEE, C. K.I, **Computer & Structures**, vol 68, version 4, 1998; *Selective Regional refinement procedure for adaptative finite element analysis*, p. 325-341.
- [42] AÇOS SANDVIK LTDA, disponível em <<https://www.home.sandvik/br>>; acesso em 20 de outubro de 2019.
- [43] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION OF UNITED STATES OF AMERICA; **MATPRO - A handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel rod behavior**, version 11 (NUREG/CR-0497), 1979.
- [44] SILVA, I. L. A; **Efeito da temperatura na microestrutura e oxidação de um aço inoxidável superduplex**. 2010; 128 p.; Dissertação (Mestrado em

Engenharia e Ciências dos Materiais); Universidade Estadual do Norte Fluminense; Campos dos Goytacazes - RJ.

- [45] BARBOSA, P. A. D.; ***Desenvolvimento de Aços Inoxidáveis Resistentes à Fluência***. 2013; 52 p. ; Dissertação (Mestrado integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade do Porto; Porto, Portugal.
- [46] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE AÇO INOXIDÁVEL; ***Aço inox: entenda por que ele é capaz de resistir a temperaturas extremas***; disponível em: <<https://www.abinox.org.br/site/agenda-inox-noticias/aco-inox-entenda-por-que-ele-e-capaz-de-resistir-a-temperaturas-extremas>>, acesso em 30 de julho de 2019.
- [47] CHIAVERINI, V.; *Aços Carbono e Aços Ligas*, ***Boletim de Geologia e metalurgia***, 16ª Edição, pp. 151-171, São Paulo-SP, BR;1954.
- [48] EUROPEAN COMMISSION, ***TRANSURANUS handbook***, version 1, Nuclear Safety & Security, Karlsruhe, Germany; 2017.
- [49] PASTORE, G.; GAMBLE; K. A.; HALES, J. D.; ***Modeling benchmark for FeCrAl cladding in the IAEA CRP ACTOF***, report number: INL/EXT-17-43695, Idaho National Laboratory; Idaho-USA; 2017.

8 - Anexos

Anexo A – Calibração do manômetro

Certificado de Calibração Nº: 2019/001321

Data da Calibração: 25/01/2019

Data de Emissão: 28/01/2019

Chave de Autenticidade (QRCode): 2768C9BBAE938F90F31F19

Contratante

DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO NUCLEAR DA MARINHA - CNPJ 00.384.502/0528-88
AVENIDA PROFESSOR LINEU PRESTES, 2468 - CIDADE UNIVERSITÁRIA
BUTANTÃ
SÃO PAULO-SP CEP 05508-000 Telefone (11) 3817-7612

Equipamento

Código	LDC 207				
Descrição	Manômetro Analógico				
Marca	RUCKEN	Modelo	384 183	Nº de Série	N/A
Capacidade	(0 a 1000) bar				
VDD	10 bar				

Condições Ambientais

Temperatura Ambiente: $(21,4 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$

Umidade Relativa do Ar: $(57 \pm 0,2) \% \text{ur}$

Padrões

Código	Descrição	Calibrado por	Nº Certificado	Validade
MAN031	Manômetro Digital	GERO	2018/004161	28/02/2019
THG002	Termohigrômetro Digital	GERO	2018/021261	30/05/2019

Procedimento de Medição

Código: GPI081 Revisão: 12

A calibração foi realizada em uma bomba de pressão e / ou vácuo, o item em calibração foi posicionado verticalmente, aplicou-se uma pré-carga no sistema para verificação da estanqueidade, em seguida o instrumento foi submetido a, no mínimo, dois ciclos de carregamento e descarregamento. As indicações do item em calibração foram comparadas às indicações do instrumento padrão. O valor verdadeiro convencional foi determinado com base no certificado de calibração dos padrões utilizados. A conversão de unidades foi realizada através da tabela normalizada. No caso de transmissor de pressão e / ou vácuo, o instrumento foi conectado em série a uma fonte de tensão de 24 V e ao indicador de corrente padrão.

Observações

- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com v graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.
- A reprodução deste certificado só poderá ser total. Para reprodução parcial é necessária a prévia aprovação por escrito por parte deste laboratório.
- Ajustes, quando realizados, não fazem parte do escopo da acreditação deste Laboratório.
- Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI).
- Calibrado nas dependências da Gero. Laboratório: PRESSÃO.
- Equipamento calibrado como recebido (sem ajuste).
- Os: 1 MPa = $1,000000 \times 10^6$ bar (MPa = Megapascal, unidade de pressão do SI).

Autenticidade

Prezado cliente, verifique a autenticidade do nosso certificado pelo site: www.gero.com.br/autenticidade, ou utilizando um aplicativo QR Code fazendo a leitura do código no topo deste certificado. Caso não seja possível verificar a autenticidade deste certificado, por favor entrar em contato pelo telefone (15) 3384-3000.

Orçamento

Número do Orçamento: 33446-18 Revisão 5

« Fim da capa, este documento continua na próxima página »

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL0171.

Certificado de Calibração Nº: 2019/001321

Data da Calibração: 25/01/2019

Data da Emissão: 28/01/2019

Item	II (bar)	VC (bar) 1º Ciclo		VC (bar) 2º Ciclo		U (bar)	k	veff
		Carregamento	Descarregamento	Carregamento	Descarregamento			
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	---	---	---
2	200,0	202,1	197,5	199,9	197,0	4,9	2,05	49
3	400,0	402,8	397,6	400,5	398,3	4,9	2,05	50
4	600,0	603,2	595,9	603,1	595,9	6,6	2,25	11
5	800,0	806,3	799,9	806,1	799,9	6,0	2,18	15
6	990,0	994,2	994,2	995,7	995,7	4,2	2,00	∞

U - Incerteza da Medição

VDD - Valor de uma Divisão

II - Média dos Valores Indicados pelo Instrumento

VC - Valor Convencional

Evandro Fagiani

EVANDRO FAGIANI
Executado por

Vinicius Grando

VINICIUS GRANDO
Signatário Autorizado

« Fim do documento »

Douglas Ferreira
Técnico de Metrologia
2244-DAZ-101
APROVADO
05/02/19

Anexo B – Calibração do dispositivo de tração.

<h3 style="margin: 0;">CERTIFICATE OF CALIBRATION</h3>		<div style="font-size: 8px; margin-bottom: 5px;">Certificação NBR ISO/IEC 17025</div> <div style="font-size: 8px; margin-top: 5px;">CAL 0197</div>				
ISSUED BY: INSTRON CALIBRATION LABORATORY <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>DATE OF ISSUE: 01-Mar-2018</div> <div>CERTIFICATE NUMBER: 18030102DM</div> </div>						
	INSTRON Brasil Equipamentos Científicos Ltda Rua Quirino Zagonel, 257 - Vila Braga São José dos Pinhais, PR CEP 83020-250 Telephone: +55 41 3035-9400 Email: service_brasil@instron.com					
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> Type of Calibration: Displacement Relevant Standard: ASTM E2309/E2309M-2016 Date of Calibration: 01-Mar-2018 </div> <div style="text-align: right;"> Page 1 of 5 pages APPROVED SIGNATORY FLAVIO HENRIQUE D AGOSTINO: 94795517800 <small>Digitally signed by FLAVIO HENRIQUE D AGOSTINO: 94795517800 DN: cn=FLAVIO HENRIQUE D AGOSTINO, o=INSTRON, ou=CP, email=, c=BR</small> </div> </div>						
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: 80%;"> <h4 style="margin: 0;">*** CALIBRATION RESULTS ***</h4> </div>						
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> System ID: 8400R1331-185 Indicator 1. - Digital Readout (mm) Range: 8.5172 mm to 79.8750 mm - Asc Range: -8.3484 mm to -78.7492 mm - Desc <small>The starting position is measured from the base beam to the bottom of the crosshead.</small> </div> <div style="text-align: right;"> System Class: PASSED Class C Starting Position: 500.00 mm Maximum Error: -0.402% Starting Position: 500.00 mm Maximum Error: 1.816% </div> </div> </div>						
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;">Customer</th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;">Machine/System</th> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top;"> Name: Centro Tecnológico da Marinha (LADCON) Location: Av. Professor Lineu Prestes, 2468 Country: São Paulo, SP 05508-000 Contact: Brasil Ananda Avila </td> <td style="vertical-align: top;"> Manufacturer: INSTRON Condition: Good Temperature Starting Temperature: 24.2 °C Final Temperature: 24.0 °C </td> </tr> </table>			Customer	Machine/System	Name: Centro Tecnológico da Marinha (LADCON) Location: Av. Professor Lineu Prestes, 2468 Country: São Paulo, SP 05508-000 Contact: Brasil Ananda Avila	Manufacturer: INSTRON Condition: Good Temperature Starting Temperature: 24.2 °C Final Temperature: 24.0 °C
Customer	Machine/System					
Name: Centro Tecnológico da Marinha (LADCON) Location: Av. Professor Lineu Prestes, 2468 Country: São Paulo, SP 05508-000 Contact: Brasil Ananda Avila	Manufacturer: INSTRON Condition: Good Temperature Starting Temperature: 24.2 °C Final Temperature: 24.0 °C					
Methodology The assessment of the testing machine was conducted on site at the above customer location in accordance with ASTM E2309/E2309M-2016 'Standard Practice for Verification of Displacement Measuring Systems and Devices Used in Material Testing Machines' (Follow-the-Displacement Method) using Instron procedure PTEC-003.						
System Classification The testing machine was verified after adjustments or repairs were carried out. Refer to certificate number 18030101DM for as found data. The verified range of displacement includes only those displacements which are greater than or equal to the ASTM Lower Limit. Prior to verification, a pre-calibration inspection was conducted and the system was found to be in Good condition. The verification and equipment used conform to a controlled Quality Assurance program which meets the specifications outlined in ISO/IEC 17025:2005.						

Instron CalproCR Version 3.38

This certificate is issued by the Instron Calibration Laboratory. It provides traceability of measurement to recognized national standards, and to units of measurement realized at the National Physical Laboratory or other recognized national standards laboratories. This certificate may not be reproduced other than in full, except with prior written approval of the issuing laboratory.

CERTIFICATE OF CALIBRATION

CERTIFICATE NUMBER:
18030102DM

Page 2 of 5 pages

Data Summary - Indicator 1. - Digital Readout (mm)

% of Range	Run 1 Error			Run 2 Error			Run 3 Error			Repeat Error	
	(mm)	(%)	Class	(mm)	(%)	Class	(mm)	(%)	Class	(mm)	Class
Verified Range: 8.5172 mm to 79.8750 mm - Ascending											
10	-0.0002	-0.002	A	-0.0188	-0.221	A	-0.0204	-0.239	A	0.02020	A
20	-0.0684	-0.401	A	-0.0558	-0.327	A	-0.0594	-0.348	A	0.01260	A
30	-0.0954	-0.373	A	-0.0912	-0.356	A	-0.0986	-0.385	A	0.00740	A
40	-0.1338	-0.392	A	-0.1260	-0.369	A	-0.1374	-0.402	A	0.01140	A
50	-0.1670	-0.391	A	-0.1554	-0.364	A	-0.1690	-0.396	A	0.01360	A
60	-0.1984	-0.388	A	-0.1838	-0.359	A	-0.1988	-0.388	A	0.01500	A
70	-0.2348	-0.393	A	-0.2262	-0.379	A	-0.2324	-0.389	A	0.00860	A
80	-0.2490	-0.365	A	-0.2242	-0.329	A	-0.2454	-0.360	A	0.02480	A
90	-0.0902	-0.118	A	-0.0640	-0.084	A	-0.0854	-0.112	A	0.02620	A
100	0.1260	0.158	A	0.1578	0.198	A	0.1250	0.156	A	0.03280	A
Verified Range: -8.3484 mm to -78.7492 mm - Descending											
10	-0.1478	1.770	C	-0.1436	1.718	C	-0.1516	1.816	C	0.00800	A
20	0.0938	-0.549	B	0.0984	-0.575	B	0.0856	-0.501	B	0.01280	A
30	0.1280	-0.499	A	0.1272	-0.496	A	0.1180	-0.461	A	0.01000	A
40	0.1622	-0.475	A	0.1586	-0.464	A	0.1524	-0.446	A	0.00980	A
50	0.1692	-0.397	A	0.1700	-0.398	A	0.1746	-0.409	A	0.00540	A
60	0.1876	-0.366	A	0.1890	-0.369	A	0.1778	-0.347	A	0.01120	A
70	0.2324	-0.389	A	0.2372	-0.397	A	0.2212	-0.370	A	0.01600	A
80	0.2638	-0.386	A	0.2682	-0.393	A	0.2494	-0.365	A	0.01880	A
90	0.0488	-0.064	A	0.0666	-0.087	A	0.0428	-0.056	A	0.02380	A
100	-0.2866	0.364	A	-0.2508	0.318	A	-0.3044	0.387	A	0.05360	A

Data - Indicator 1. - Digital Readout (mm)

% of Range	Run 1		Run 2		Run 3		Uncertainty of Measurement	
	Indicated (mm)	Applied (mm)	Indicated (mm)	Applied (mm)	Indicated (mm)	Applied (mm)	%	(mm)
Verified Range: 8.5172 mm to 79.8750 mm - Ascending								
0	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.000	0.0000		
10	8.517	8.5172	8.500	8.5188	8.500	8.5204	0.082	0.0070
20	17.000	17.0684	17.000	17.0558	17.000	17.0394	0.049	0.0083
30	25.500	25.5954	25.500	25.5912	25.500	25.5986	0.040	0.010
40	34.000	34.1338	34.000	34.1260	34.000	34.1374	0.036	0.012
50	42.500	42.6670	42.500	42.6554	42.500	42.6690	0.034	0.015
60	51.000	51.1984	51.000	51.1838	51.000	51.1988	0.033	0.017
70	59.500	59.7348	59.500	59.7262	59.500	59.7324	0.033	0.020
80	68.000	68.2490	68.000	68.2242	68.000	68.2454	0.032	0.022
90	76.500	76.5902	76.500	76.5640	76.500	76.5854	0.032	0.024
100	79.999	79.8730	80.000	79.8422	80.000	79.8750	0.032	0.025
Verified Range: -8.3484 mm to -78.7492 mm - Descending								
0	0.000	0.0000	0.000	0.0000	0.000	0.0000		
10	-8.500	-8.3522	-8.500	-8.3564	-8.500	-8.3484	0.083	0.0070
20	-17.000	-17.0938	-17.000	-17.0984	-17.000	-17.0856	0.049	0.0083

CERTIFICATE OF CALIBRATION

CERTIFICATE NUMBER:

18030102DM

Page 3 of 5 pages

Data - Indicator 1. - Digital Readout (mm)

% of Range	Run 1		Run 2		Run 3		Uncertainty of Measurement	
	Indicated (mm)	Applied (mm)	Indicated (mm)	Applied (mm)	Indicated (mm)	Applied (mm)	%	(mm)
Verified Range: -8.3484 mm to -78.7492 mm - Descending								
30	-25.500	-25.6280	-25.500	-25.6272	-25.500	-25.6180	0.040	0.010
40	-34.000	-34.1622	-34.000	-34.1586	-34.000	-34.1524	0.036	0.012
50	-42.500	-42.6692	-42.500	-42.6700	-42.500	-42.6746	0.034	0.015
60	-51.000	-51.1876	-51.000	-51.1890	-51.000	-51.1778	0.033	0.017
70	-59.500	-59.7324	-59.500	-59.7372	-59.500	-59.7212	0.033	0.020
80	-68.000	-68.2638	-68.000	-68.2682	-68.000	-68.2494	0.032	0.022
90	-76.500	-76.5488	-76.500	-76.5666	-76.500	-76.5428	0.032	0.024
100	-79.000	-78.7134	-79.000	-78.7492	-79.000	-78.6956	0.032	0.025

The uncertainty stated refers to values obtained during the calibration and makes no allowances for factors such as long term drift, temperature and alignment effects - the influence of such factors should be taken into account by the user of the system.

The reported expanded uncertainty of measurement is based on a combined uncertainty multiplied by a coverage factor $k=2$ to provide a level of confidence of approximately 95%.

Graphical Data - Indicator 1. - Digital Readout (mm)

CERTIFICATE OF CALIBRATION

CERTIFICATE NUMBER:
18030102DM

Page 4 of 5 pages

Graphical Data - Indicator 1. - Digital Readout (mm)

Verification Equipment

The measurement results produced with Instron standards are traceable to the SI (The International System of Units) through internationally recognized National Metrology Institutes (NIST, NPL, PTB, Inmetro, etc.).

Make/Model	Equipment ID	Description	Cal Date	Cal Due	Certificate Ref.
Instron LDS (280/287)	090514E (ASTM)	disp. indicator	23-Sep-2016	23-Sep-2018	3002/16
Exttech 445580	1045177	temp. indicator	19-Dec-2016	19-Dec-2018	TP-12-336/16

The class of the calibration apparatus was equal to or better than the class to which this system has been calibrated.

Verification Equipment Usage

Measurement Type	Equipment ID	Direction	Percent(s) of Range	Accuracy (+/-)
Displacement	090514E (ASTM)	Ascending	10/ 20/ 30/ 40/ 50/ 60/ 70/ 80/ 90/ 100	0.0002 in
		Descending	10/ 20/ 30/ 40/ 50/ 60/ 70/ 80/ 90/ 100	0.0002 in
Temperature	1045177	All	All	1.8 °F

The accuracy of the verification equipment used was equal to or better than the accuracy indicated in the table above.

Comments

No comments.

CERTIFICATE OF CALIBRATION

CERTIFICATE NUMBER:
18030102DM

Page 5 of 5 pages

Verified by: Danilo Medeiros
Service Technician

It is Instron's recommendation that the displacement measuring system be verified at least annually or after any repair or adjustment which affects the accuracy of measurements.

DOUGLAS FERREIRA
Técnico de Metalurgia

Apto ao Uso
08/02/19

Anexo C – Resultados do ensaio de tração

Tabela 1 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração a 25°C.

CP	S_esc[Mpa]	S_max[MPa]	along_%
1	300	651	50,5
2	289	639	51,0
3	314	651	48,5
4	321	646	50,0
5	301	641	51,0
Média	305	645	50,2
Desvio padrão	12	5	1,0

Fonte: autor da dissertação.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração a 150°C.

CP	S_esc[Mpa]	S_max[MPa]	along_%
1	231	496	33,6
2	240	490	30,72
3	266	484	30,56
4	298	494	32,46
5	290	499	31,89
Média	265	492,6	31,846
Desvio padrão	29,56	5,81	1,26

Fonte: autor da dissertação.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração a 370°C.

CP	S_esc[Mpa]	S_max[MPa]	along_%
1	225	484	26,5
2	218	458	26,3
3	242	458	26,8
4	238	457	27,0
5	237	446	26,3
Média	232	460	26,6
Desvio padrão	10	14	0,3

Fonte: autor da dissertação.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração a 450°C.

CP	S_esc[Mpa]	S_max[MPa]	along_%
1	201	451	19,5
2	213	459	20,74
3	205	447	18,58
4	227	440	18,58
5	197	412	20,71
Média	208,6	444	19,622
Desvio padrão	11,87	16,99	1,24

Fonte: autor da dissertação.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração a 650°C.

CP	S_esc[Mpa]	S_max[MPa]	along_%
1	210	400	17,83
2	193	396	18,15
3	198	376	15,86
4	209	370	17,74
5	208	392	16,58
Média	203,6	386,8	17,232
Desvio padrão	7,64	13,08	0,97

Fonte: autor da dissertação.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração a 800°C.

CP	S_esc[Mpa]	S_max[MPa]	along_%
1	153	211	23,84
2	188	234	22,6
3	139	190	19,21
4	144	199	19,92
5	160	219	18,5
Média	156,8	210,6	20,814
Desvio padrão	19,23	17,16	2,30

Fonte: autor da dissertação.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.