



Avaliação do comportamento em fluência do aço 10CrMo910 via simulação computacional pelo método *small punch creep test*

Israel da Silva Miranda ¹

Guilherme Bampi Righeto ²

Richard de Medeiros Castro ³

Luiz Carlos de Cesaro Cavaler ⁴

Josiane da Rocha Silvano das Neves ⁵

Franco Wronski Comeli⁶

Resumo: O presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento em fluência do aço 10CrMo910 por meio de simulação computacional, utilizando dados experimentais de ensaios convencionais de fluência. Inicialmente, foram determinadas as constantes dos modelos constitutivos de fluência *Time Hardening*, *Norton* e *Combined Time Hardening*, por meio de regressões não lineares e lineares aplicadas aos dados do banco NIMS. As simulações foram realizadas no software ANSYS®, utilizando modelo eixo simétrico e malha estruturada para otimização dos recursos computacionais. As condições de contorno foram definidas de forma a representar fielmente o ensaio experimental, considerando o atrito entre os componentes. Nas cargas de 110 N e 200 N, pode-se observar um aumento de quase 1000 horas até a ruptura, além disso, verificou-se que a variação do coeficiente de atrito teve impacto significativo no tempo de ruptura.

Palavras-chave: Simulação. Norton. Fluência. Aço 10CrMo910, SPCT

1 INTRODUÇÃO

O progresso da sociedade moderna está intrinsecamente ligado ao uso de energia em suas múltiplas formas, sendo a energia elétrica uma das mais significativas. O crescimento populacional, a expansão urbana e a instalação de empreendimentos industriais geram um aumento contínuo na demanda energética. Nesse contexto, o desempenho eficiente das usinas termoelétricas se torna essencial, sobretudo em ambientes que operam com combustíveis fósseis como o carvão mineral.

¹ Eng. Mecânico, UniSATC. israel.miranda@satc.edu.br:

² Prof. Me., UniSATC. guilherme.righeto:

³ Prof. Dr., UniSATC. richard.castro@satc.edu.br:

⁴ Prof. Dr., UniSATC. luiz.cavaler@satc.edu.br:

⁵ Prof. Dra., UniSATC. josiane.neces@satc.edu.br:

⁶ Prof. Dr., UniSATC. franco.comeli@satc.edu.br.



A otimização desses sistemas, visando à redução de consumo de combustível e a mitigação de impactos ambientais, exige atenção redobrada à integridade dos materiais expostos a condições com elevadas pressões e temperaturas. Dentre os fenômenos que desafiam a durabilidade desses materiais, destaca-se a fluência — deformação progressiva sob temperatura e carga constantes, mesmo em regimes abaixo da tensão de escoamento.

Diversas técnicas de avaliação vêm sendo utilizadas para monitorar a degradação estrutural, desde ensaios de dureza e ultrassom até métodos mais avançados como o *Small Punch Creep Test* (SPCT), que permite obter dados relevantes a partir de pequenas amostras, sem comprometer a continuidade operacional do componente. Paralelamente, as simulações computacionais surgem como alternativas promissoras, capazes de prever o comportamento do material em tempo reduzido, especialmente quando combinadas com dados experimentais.

Diante da complexidade em prever o comportamento de fluência de ligas metálicas sob condições reais de operação, esta pesquisa busca responder: é possível através da simulação computacional simular fluência no aço 10CrMo910 baseadas em dados de SPCT?

A escolha do tema justifica-se pela sua alta relevância industrial, acadêmica e científica. A correta previsão da vida útil de componentes críticos contribui diretamente para a segurança operacional, a economia energética e a sustentabilidade de sistemas termoelétricos. Esse estudo tem como objetivo validar a simulação computacional com base em experimentos reais de fluência convencional a fim de determinar as constantes dos modelos numéricos comparando os resultados obtidos via simulação numérica com ensaios SPCT reais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para continuidade são necessários conceitos para melhor compreensão do projeto, como: caracterização da fluência e sua importância em materiais metálicos, princípios SPCT, composição química e propriedades da liga 10CrMo910, métodos numéricos para a simulação.



2.1 DEGRADAÇÃO POR FLUÊNCIA EM LIGAS METÁLICAS

A fluência é definida pela deformação plástica lenta e progressiva de materiais, ocorrendo a uma taxa de deformação que varia ao longo do tempo, dependendo não apenas da intensidade da tensão aplicada, mas também da temperatura e do tempo. Este fenômeno metalúrgico desperta grande interesse na indústria, especialmente em situações em que as temperaturas de trabalho excedem a temperatura homóloga. Geralmente, a fluidez é desaconselhável e, frequentemente, representa um obstáculo na durabilidade de um componente (KODUR et al., 2010).

Os testes de fluência são geralmente realizados sob carga constante e resultam em curvas de fluência, que representam a deformação ao longo do tempo em três estágios: primário, secundário e terciário.

O estágio primário é caracterizado por uma taxa de deformação decrescente devido ao encruamento. No estágio secundário, ocorre uma taxa de deformação constante, devido ao equilíbrio entre encruamento e recuperação, sendo a "taxa mínima de fluência" um parâmetro crítico. O estágio terciário é marcado pela aceleração da fluência e redução da área transversal, resultando em falhas, frequentemente associadas a mudanças microestruturais, como a recristalização e o crescimento de partículas precipitadas. As curvas de taxa de fluência em função do tempo permitem observar como a microestrutura do material evolui sob diferentes tensões, sendo influenciada por fenômenos como o deslizamento e a formação de subgrãos em altas temperaturas.

2.2 TÉCNICA DE SPCT PARA DETERMINAÇÃO DE VIDA ÚTIL

Quantificar a deformação acumulada por fluência ao longo da vida útil de um componente é essencial tanto para prever sua vida remanescente quanto para validar modelos de Elementos Finitos (EF). O método não destrutivo mais amplamente usado para essa avaliação é a metalografia de réplicas, no entanto, as limitações dessa técnica levaram à exploração de métodos alternativos, como ultrassom, técnicas eletromagnéticas, medição de dureza e métodos nucleares (SPOSITO et al., 2010).

O teste funciona pela penetração de um punção ou esfera em um disco

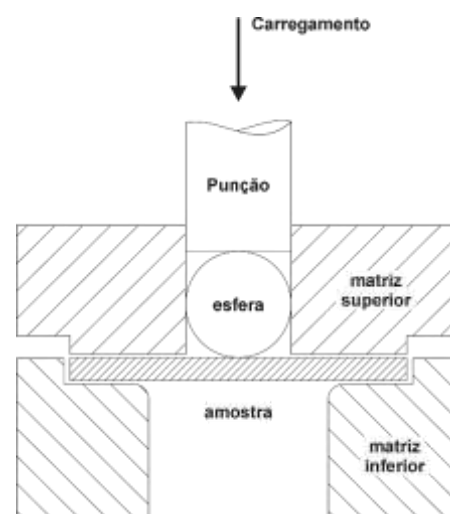
plano de amostra, ilustrado conforme Fig. 1, com a taxa de fluência estimada a partir do deslocamento do punção. Durante o ensaio, a amostra e o punção são mantidos dentro de um forno do tipo mufla, o que permite controlar precisamente a temperatura do ensaio e simular as condições reais de operação do componente em serviço.

A taxa de fluência é determinada a partir da curva de deslocamento do punção em função do tempo, gerada durante o ensaio. Essa curva normalmente apresenta os três estágios, sendo a taxa de fluência mínima (*steady-state creep rate*) extraída da região linear da fase secundária. O valor é obtido por meio da inclinação dessa porção da curva, ou seja, pela derivada $\dot{\epsilon} = \frac{dh}{dt}$, onde h é o deslocamento do punção e t o tempo.

Sem uma padronização única, o método permite ajustes, como variação do diâmetro do punção e técnicas de fixação da amostra, o que facilita a adaptação para diferentes componentes e condições.

O ensaio de small punch depende de um procedimento confiável para comparação com os resultados de ensaios de fluência convencionais. Em 2007, o Comitê Europeu de Normalização (CEN) criou o código CWA 15627, que oferece diretrizes para realizar o ensaio em materiais metálicos e métodos para estimar propriedades como tração, tenacidade à fratura e fluência.

Figura 1: Desenho esquemático do ensaio de *Small Punch*.



Fonte: Adaptado de Deshmukh (2016).

O principal desafio é traduzir o deslocamento em valores de tensão e deformação comparáveis aos ensaios convencionais de fluência, sendo comum o uso



de simulações e modelos numéricos para essa correlação.

2.3 SIMULAÇÃO NÚMERICA APLICADA À FLUÊNCIA

O uso de softwares de Análise por Elementos Finitos (FEA) para modelar o comportamento de materiais sob altas temperaturas permite que se possa avaliar a vida útil remanescente de componentes e realizar análises de falhas para aprimorar projetos futuros. Para Howard (2017), a modelagem eficaz do comportamento em fluência por meio de FEA possibilita obter resultados eficientes em termos de tempo, eliminando a necessidade de métodos despendidos e demorados.

Existem diversos métodos disponíveis para modelar o comportamento de fluência, sendo os modelos constitutivos com parâmetros de dano uma técnica amplamente utilizada na literatura especializada. O uso de modelos pré-desenvolvidos mostra-se especialmente atrativo, com softwares como NASTRAN, ABAQUS e ANSYS® figurando entre as principais opções disponíveis. Para este estudo, optou-se pelo uso do software ANSYS®, que oferece uma flexibilidade significativa para personalizar modelos e adaptar parâmetros específicos de fluência, proporcionando uma precisão maior e facilidade no ajuste de variáveis cruciais para esse tipo de análise.

2.3.1 Modelos de Fluência Disponíveis no ANSYS®

O ANSYS® oferece 13 modelos de fluência, que permitem modelar tanto a fase primária quanto a secundária da fluência. No entanto, ele não inclui a fluência terciária, já que essa etapa está associada à falha do material. O regime de fluência terciária também envolve grandes deformações, o que resulta em distorções significativas dos elementos, acarretando problemas de convergência e tornando a análise ainda mais complexa (BARBOSA et al., 2011).

Em análises de engenharia, os estágios primário e secundário da fluência são geralmente os mais relevantes, pois o estágio terciário, além de estar normalmente associado à falha do material, ocorre em um curto intervalo de tempo durante o ensaio.



De forma geral, a taxa de deformação por fluência, $\dot{\varepsilon}^{cr} = f_1(\sigma)f_2(\varepsilon)f_3(t)f_4(T)$, pode ser expressa em função da tensão (σ), da deformação (ε), da temperatura (T) e/ou do tempo (t).

A existência das funções f_1 a f_4 depende da equação constitutiva escolhida, e as constantes associadas a essas funções podem ser determinadas a partir dos resultados de diferentes ensaios de fluência. Assumindo um comportamento isotrópico do material, a tensão efetiva utilizada é calculada com base no critério de *von Mises*.

Neste artigo, serão abordadas três das equações constitutivas disponíveis na biblioteca do programa: *Time Hardening*, *Norton* e *Combined Time Hardening*

2.4 CARACTERÍSTICAS DO AÇO DIN 17175 TIPO 10CrMo910

Para o desenvolvimento deste estudo, empregou-se o aço 10CrMo910, uma liga de alta resistência amplamente utilizada em aplicações que exigem grande resistência ao calor e à corrosão, como em caldeiras, tubulações e outras estruturas na indústria petroquímica e de energia. Sua composição contém cromo (Cr) e molibdênio (Mo) – composição química demonstrada na Tab. 1 –, elementos que conferem ao material excelente desempenho em ambientes de altas temperaturas (XU et al., 2003).

Tabela 1: Composição química do aço 10CrMo910 em %.

Norma	Grau	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo
DIN 17175	10CrMo910	0,08 / 0,15	máx. 0,5	0,4 / 0,7	máx. 0,035	máx. 0,0035	2 / 2,5	0,9 / 1,2

Fonte: Norma DIN EN 10216-2 Tubo de aço sem costura resistente ao calor (2025).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia adotada neste trabalho pode ser dividida em duas etapas distintas. Na primeira etapa, foi realizada a identificação das constantes associadas aos modelos de fluência selecionados para o estudo. Em seguida, procedeu-se à execução das simulações correspondentes a cada um dos métodos previamente definidos.



4.1 DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES: MODELO *TIME HARDENING* E *COMBINED TIME HARDENING*

Para a realização das simulações com os modelos *Time Hardening* e *Combined Time Hardening*, foi inicialmente necessária a obtenção de dados experimentais de fluência que descrevessem o comportamento do material 10CrMo910 sob diferentes condições de tensão e temperatura. Esses dados foram extraídos do banco de dados do *National Institute for Materials Science* (NIMS), que reúne resultados de ensaios convencionais de fluência, também conhecidos como testes uniaxiais.

Com base nesses dados, foi desenvolvido um código em Python para calcular as constantes dos modelos por meio do método de regressão não linear dos mínimos quadrados $S(\theta) = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i; \theta)]^2$. Esse método estatístico ajusta uma função matemática — neste caso, a equação de fluência — aos dados experimentais, minimizando a soma dos quadrados dos erros entre os valores previstos pelo modelo e os valores reais (Klein et al. 2011).

Na equação geral do método dos mínimos quadrados, y_i representa os valores experimentais observados, $f(x_i; \theta)$ é a função teórica ajustada ao conjunto de dados, dependente das variáveis independentes x_i (como tempo e tensão) e dos parâmetros θ (constantes do modelo de fluência), e n é o número total de pontos experimentais.

O programa realiza o ajuste das equações de fluência com base nos dados de taxa de deformação, tempo e tensão extraídos do banco do NIMS. Em seguida, calcula o coeficiente de determinação (R^2) para avaliar a qualidade do ajuste. Após o processamento, o código gera gráficos comparativos por temperatura, sobrepondo os dados experimentais e as curvas ajustadas. Além disso, exibe os parâmetros otimizados, os erros padrão associados a cada constante do modelo e o valor de R^2 , permitindo uma análise quantitativa da precisão do ajuste.



4.1.1 Modelo Norton

Para a obtenção das constantes do modelo de fluência de Norton, também foi desenvolvido um algoritmo em Python utilizando dados experimentais de taxa de deformação extraídos de ensaios de fluência disponíveis no banco de dados do NIMS.

O modelo de Norton é representado por uma equação empírica que relaciona a taxa de deformação secundária à tensão aplicada e à temperatura absoluta. Para possibilitar sua utilização em regressão linear múltipla, a equação foi linearizada por meio da aplicação do logaritmo natural $\ln(\dot{\varepsilon}) = \ln(C_1) + C_2 \ln(\sigma) - \frac{C_3}{T}$.

Onde $\dot{\varepsilon}$ é a taxa de deformação (s^{-1}), σ é a tensão aplicada (MPa), T é a temperatura absoluta (K), e C_1 , C_2 e C_3 são constantes do modelo a serem determinadas.

Com base nessa equação, o código realiza a transformação dos dados experimentais e aplica a regressão linear múltipla pelo método dos mínimos quadrados ordinários, ajustando a equação linearizada aos dados observados.

Por fim, o código também gera um gráfico de dispersão, comparando os valores previstos com os valores reais de $\ln(\dot{\varepsilon})$, juntamente com a linha ideal $y = x$, facilitando a visualização da acurácia do modelo ajustado. A apresentação dos parâmetros finais (C_1 , C_2 e C_3), juntamente com o valor de R^2 , permite uma análise quantitativa da representatividade da equação de Norton para o material estudado em diferentes condições termomecânicas.

4.2 DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL

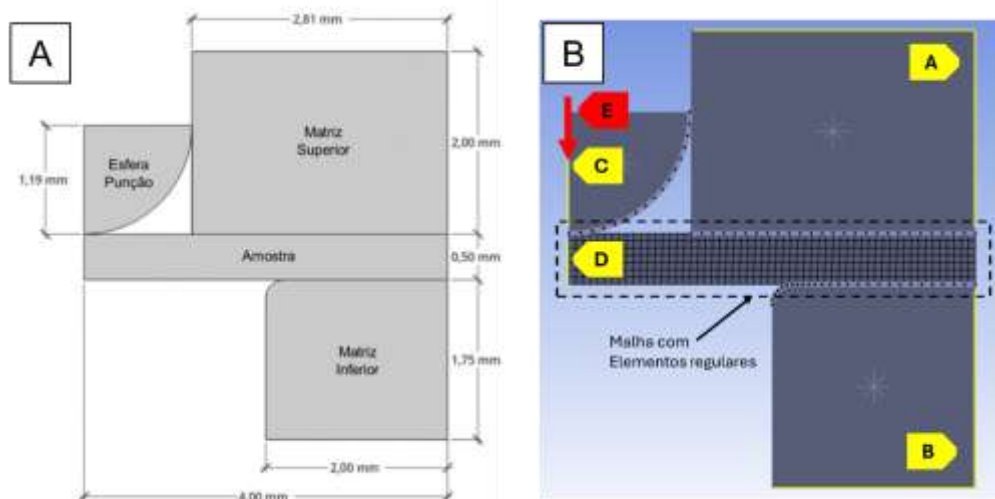
Definidas as constantes para todos os modelos de fluência, iniciou-se o desenho do domínio computacional, optou-se por utilizar o modelo eixo simétrico no ANSYS®, que é uma análise 2D que resolve o comportamento tridimensional de corpos de revolução assumindo que tudo é simétrico ao redor de um eixo. Isso permite estudar esforços, deslocamentos, temperatura, fluência e outros fenômenos em peças com geometria e carregamentos simétricos em torno do eixo de rotação, com muito menos recurso computacional que um modelo 3D completo. Na Fig. 3(A) é possível verificar a geometria desenhada.

Para as simulações numéricas realizadas no ANSYS®, optou-se pelo uso de uma malha estruturada aplicada ao modelo eixo simétrico. Essa escolha foi motivada pela geometria do problema, que apresenta simetria rotacional, permitindo reduzir o domínio tridimensional a uma seção bidimensional, o que otimiza o uso computacional.

A malha estruturada foi adotada por proporcionar uma discretização regular e alinhada, Fig. 3(B), o que favorece a qualidade dos elementos e a precisão dos resultados. Além disso, esse tipo de malha contribui para a melhor convergência do *solver*, pois a matriz do sistema apresenta melhor condicionamento, resultando em menor erro numérico.

Dessa forma, a combinação do modelo eixo simétrico com malha estruturada possibilita a obtenção de soluções numéricas mais eficientes, com redução significativa do tempo computacional sem perda de precisão nos resultados.

Figura 3: (A) Geometria 2D utilizada nos ensaios de Small Punch. (B) Detalhe da malha estruturada aplicada ao corpo de prova no modelo eixo simétrico, evidenciando a discretização regular e alinhada.



Fonte: Dos Do autor, 2024.

4.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Foram definidas condições de contorno específicas na simulação com o objetivo de restringir deslocamentos em regiões que representam corpos rígidos, evitando deformações indevidas nesses elementos. As matrizes, indicadas na Fig. 3



(B) pelas *tags* A e B, foram totalmente fixadas nos eixos X e Y, impedindo qualquer movimento nessas direções. A esfera, indicada pela *tag* C, foi liberada para deslocamento exclusivamente ao longo do eixo X, mantendo as demais direções restritas para simular seu comportamento realista durante o contato.

A amostra (indicada pela *tag* D), por sua vez, teve liberdade para movimentar-se nos eixos Y e Z, enquanto o deslocamento no eixo Y foi bloqueado, garantindo a aplicação adequada das cargas e a representação correta das restrições mecânicas do sistema.

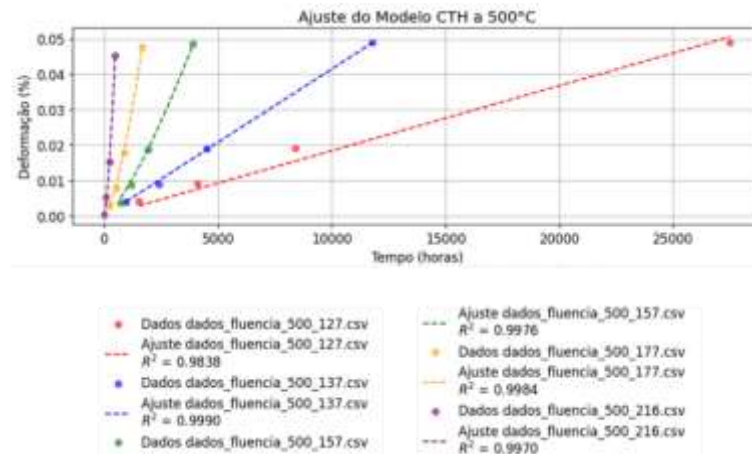
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa, serão detalhados e analisados os resultados obtidos a partir dos procedimentos executados ao longo da pesquisa, evidenciando os principais achados e seu impacto para o desenvolvimento do estudo.

5.1 QUANTO A OBTENÇÃO DAS CONSTANTES

Os resultados foram obtidos a partir da aplicação da programação utilizada para ajustar o modelo *Time Hardening* e *Combined Time Hardening* aos dados experimentais, com a temperatura fixa de 500 °C (773 K) – temperatura em que o aço 10CrMo910 normalmente opera – e considerando diferentes tensões.

A Fig. 4 apresentam os ajustes do modelo *Time Hardening* para diferentes dados de fluência de materiais submetidos a 500 °C. Cada conjunto de dados, representado por pontos coloridos, corresponde a uma medição em diferentes condições de tensão. As linhas tracejadas indicam o ajuste do modelo a esses dados, com o valor mostrado ao lado de cada linha, indicando o grau de precisão do ajuste.

Figura 4: Ajuste do Modelo *Time Hardening* para Fluência a 500 °C.

Fonte: Do autor (2025).

O modelo de fluência de Norton, ao contrário dos modelos previamente mencionados, não inclui o tempo como variável em sua formulação. Dessa forma, é possível determinar um único conjunto de constantes para cada temperatura específica. Para a identificação desses parâmetros, foi adotada a mesma temperatura de 500 °C (773 K) utilizada nos outros modelos, garantindo a consistência das condições experimentais.

Adicionalmente, para a obtenção das constantes do modelo, foi realizada a linearização dos dados de fluência convencional extraídos do banco de dados da NIMS, processo este que permitiu a estimativa dos coeficientes do modelo de Norton. A precisão do ajuste foi então avaliada por meio do coeficiente de determinação, cujo valor forneceu uma medida da adequação do modelo aos dados experimentais.

5.2 SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

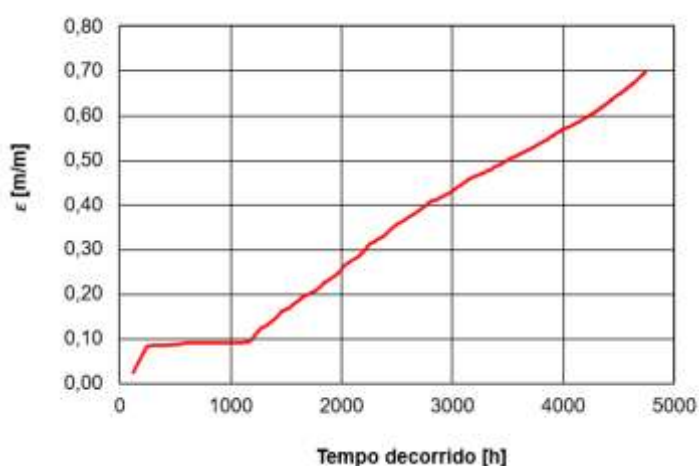
Embora o ANSYS® não simule diretamente a ruptura por fluência de forma explícita (no sentido de gerar um "evento de falha" como ocorre em simulações de ruptura por fratura), ele simula com precisão o processo de deformação acumulada sob condições de fluência, e com isso, é possível prever quando o material atingirá um ponto de falha por fluência.

Identificada as constantes e alimentadas no software, o próximo passo envolveu a determinação da tensão a ser aplicada durante o ensaio. Para isso, foi inicialmente definida uma tensão de 110 N, com base em considerações

experimentais e nas condições de operação do material. O resultado da simulação pode ser observado nas Figs. 5 e 6.

A simulação perde a convergência ao atingir um tempo de 4707 horas, momento em que se observa uma variação abrupta no deslocamento em um intervalo de tempo muito curto. Esse comportamento sugere que a simulação ultrapassa os limites do modelo utilizado. Essa estimativa é conservadora, uma vez que nenhum modelo disponível no ANSYS® é capaz de simular o terceiro estágio de fluência, caracterizado pela aceleração da deformação devido ao processo de ruptura ou instabilidade do material.

Figura 5: Curva de fluência no estágio secundário para uma tensão de 110 N com uma temperatura de 500 °C.

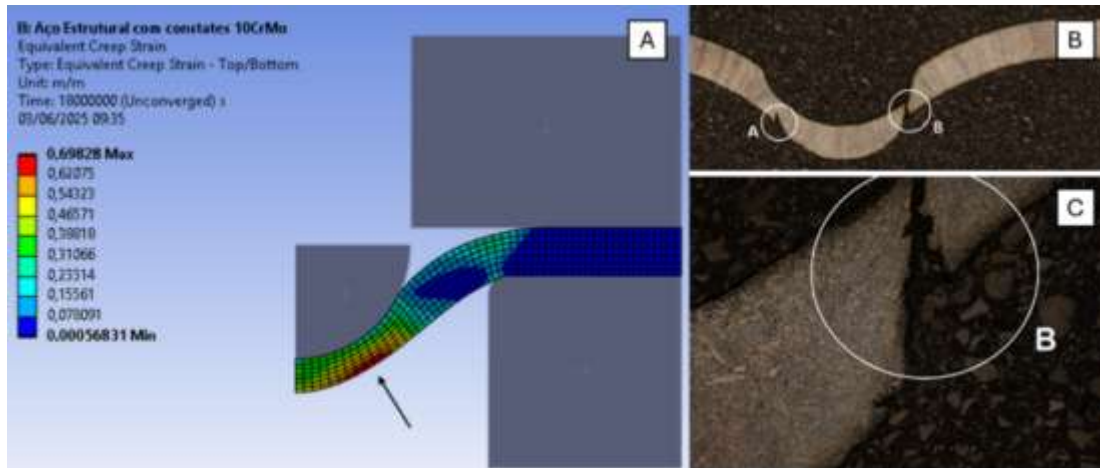


Fonte: Do autor (2025).

Mesmo que a simulação não permita reproduzir a ruptura completa do corpo de prova, conforme ilustrado na Fig. 6, foi possível identificar, com base na concentração de tensões e no comportamento do material, a região onde provavelmente se inicia o processo de fratura.

Para fins de comparação, foram realizadas também simulações com diferentes níveis de tensão aplicados, a saber, 200 e 300 N. Como era esperado, observou-se que o tempo de convergência e o de ruptura diminui à medida que a tensão aplicada é aumentada. Esse comportamento está relacionado ao fato de que, com tensões mais elevadas, a taxa de deformação do material também aumenta, o que acelera o processo de fluência e reduz o tempo necessário para que a simulação atinja o ponto de convergência.

Figura 6: (A) Resultado da deformação por fluência, indicando o ponto de início de ruptura. (B) Corpo de prova de ensaio real de *Small Punch*. (C) Detalhe da ruptura do corpo de prova.

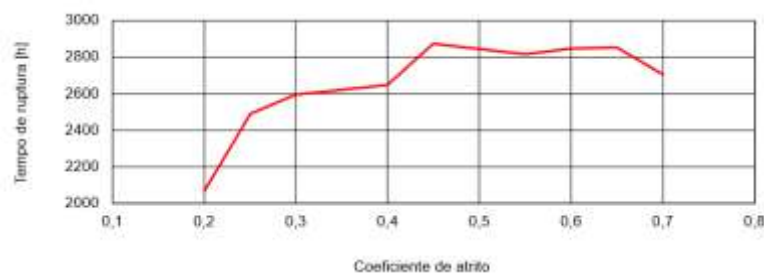


Fonte: (A) Do autor (2025). (B) Cortellino et al., (2017).

Com intuito de compreender o impacto que o coeficiente de atrito gera na simulação, foram realizadas simulações com diferentes coeficientes de atrito entre a amostra ensaiada, as matrizes e a esfera punção, para um ensaio realizado com uma carga de 200 N. A análise da Fig. 7 revela que a variação do coeficiente de atrito entre 0,2 e 0,7 tem um impacto no tempo de ruptura, com o crescimento do coeficiente de atrito há também um aumento no tempo de ruptura.

O atrito exerce papel decisivo nos ensaios SPCT, pois, em níveis moderados, restringe o fluxo plástico e retarda a deformação, aumentando o tempo até a ruptura; entretanto, em valores elevados, gera concentrações de tensões que aceleram o dano, reduzindo a vida útil. Esse efeito, relatado na literatura, mostra que o atrito pode distorcer a interpretação das curvas força–deslocamento e tempo–deslocamento em condições de fluência (CACCIAPUOTI et al., 2016; SPOSITO et al., 2010).

Figura 7: Variação do tempo de ruptura em função do coeficiente de atrito.



Fonte: Do autor (2025).

6 CONCLUSÃO

O estudo evidenciou a viabilidade do uso de simulações computacionais no ANSYS® para avaliar o comportamento em fluência da liga 10CrMo910, utilizando o modelo de Norton com parâmetros obtidos do banco NIMS. Os ajustes apresentaram elevado grau de correlação ($R^2 > 0,95$), validando a consistência dos modelos. As análises mostraram forte dependência do tempo de ruptura em relação à tensão aplicada, com valores próximos de 4700 horas para 110 N e reduções significativas em tensões mais elevadas. Além disso, a variação do coeficiente de atrito entre 0,2 e 0,7 impactou diretamente os resultados, alterando o tempo de ruptura em mais de 30%, confirmando a relevância desse parâmetro nas previsões de fluência.

Como perspectivas futuras, destacam-se a necessidade de validação experimental via SPCT, a análise em diferentes temperaturas e ciclos térmicos, bem como a aplicação da metodologia a outras ligas metálicas e geometrias de amostras. Assim, conclui-se que a simulação computacional, quando devidamente parametrizada, constitui uma ferramenta eficaz para prever o comportamento em fluência, contribuindo para a gestão de manutenção, integridade estrutural e confiabilidade operacional em ambientes industriais críticos.

REFERÊNCIAS

ABE, F.; KERN, T. U.; VISWANATHAN, R. **Creep-Resistant Steels**. 2008.

BARBOSA, T. M. Z.; TORRES, M. A. S.; BAPTISTA, C. A. R. P. **FEM analysis and creep life estimation of pipe component submitted to high pressure steam**. 2011.



BOZ, Z.; ERDOGDU, F.; TUTAR, M. **Effects of mesh refinement, time step size and numerical scheme on the computational modeling of temperature evolution during natural-convection heating.** Journal of Food Engineering, v. 123, 2014.

CACCIAPUOTI, B.; SUN, W.; MCCARTNEY, D. G. **A study on the evolution of the contact angle of small punch creep test of ductile materials.** International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 145, 2016.

CHERUVU, N. S. **Degradation of mechanical properties of Cr-Mo-V and 2.25Cr-1Mo steel components after long-term service at elevated temperatures.** Metallurgical Transactions A, v. 20, n. 1, p. 87–97, 1989. Springer-Verlag.

GOMEZ-FARIAS, A.; MONTOYA, A.; MILLWATER, H. **Complex finite element sensitivity method for creep analysis.** International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 132–133, p. 27–42, 2015. Elsevier. Acesso em: 15/10/2024.
HOWARD, G.; MR, H. I.; PIETRA, F. **Finite element modelling of creep for an industrial application.** 2017.

HOSSAIN, M. A.; STEWART, C. M. **A reduced order modeling in finite element for rapid qualification of creep-resistant alloys.** American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP. Anais... . v. 2, 2022.

HOWARD, G.; MR, H. I.; PIETRA, F. **Finite element modelling of creep for an industrial application.** 2017.

KODUR, V. K. R.; DWAIKAT, M. M. S. **Effect of high temperature creep on the fire response of restrained steel beams.** Materials and Structures/Materiaux et Constructions, v. 43, n. 10, 2010.

SANTOS, F. F. M. **Análise crítica de ensaios de fluência em amostras reduzidas empregados como ferramenta de avaliação de vida residual de aços utilizados em caldeiras térmicas.** 2019. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SPOSITO, G.; WARD, C.; CAWLEY, P.; NAGY, P. B.; SCRUBY, C. **A review of non-destructive techniques for the detection of creep damage in power plant steels.** NDT & E International, v. 43, n. 7, p. 555–567, 2010. Elsevier. Acesso em: 10/11/2024.

WILLIAM D. CALLISTER; DAVID G. RETHWISCH. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

XU, H.; HUANG, X. K.; YANG, Z.; PAN, J. T. **Property changes of 12Cr1 MoV with 10CrMo910 main steam piping after long-term high-temperature service.** Engineering Failure Analysis, v. 10, n. 2, p. 245–250, 2003.

Failure Analysis, v. 72, p. 58–66, 2017. Pergamon. Acesso em: 15/10/2024.