v7.n6.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

AVALIAÇÃO POR MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DE ESTRATÉGIAS DE REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS A ALTOS GRADIENTES TÉRMICOS NA INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO PRIMÁRIO

FINITE ELEMENT ASSESSMENT OF STRENGTHENING STRATEGIES FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES SUBJECTED TO HIGH THERMAL GRADIENTS IN THE PRIMARY ALUMINUM INDUSTRY

EVALUACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS DE ESTRATEGIAS DE REFUERZO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDAS A ALTOS GRADIENTES TÉRMICOS EN LA INDUSTRIA DEL ALUMINIO PRIMARIO

Fábio Masato Yamanaka[1], Anderson Luis Matos Moreira[2], Marcelo Rassy Teixeira[3]

e768250
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i6.8250

PUBLICADO: 06/2026

RESUMO

Este estudo investiga o comportamento termoestrutural de uma parede de concreto armado submetida a elevados gradientes térmicos em um forno de cozimento de anodos, com foco na influência das propriedades dos materiais sobre as deformações estruturais. Para isso, foi desenvolvido um modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando as dimensões reais da estrutura, a fim de avaliar os efeitos dos parâmetros térmicos na resposta estrutural. Adicionalmente, foram propostas diferentes estratégias de reforço com o objetivo de mitigar os deslocamentos ao longo do ciclo operacional. As soluções foram analisadas por meio da comparação dos campos de deslocamento, permitindo avaliar a eficiência relativa de cada proposta. Os resultados indicam que intervenções que restringem excessivamente a deformação térmica tendem a intensificar os deslocamentos, enquanto soluções que favorecem a redistribuição de esforços apresentam melhor desempenho. Verificou-se, ainda, que as propriedades dos materiais exercem influência significativa na magnitude das deformações, evidenciando a importância de sua adequada caracterização em modelos numéricos. Dentre as alternativas avaliadas, a proposta 6 apresentou maior potencial de aplicação prática, promovendo redução consistente dos deslocamentos e melhoria do comportamento global da estrutura. Assim, os resultados fornecem subsídios técnicos relevantes para a definição de estratégias de reforço em estruturas submetidas a condições térmicas severas, contribuindo para o aumento da segurança e da durabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Método dos Elementos Finitos. Análise Termoestrutural. Concreto Armado. Gradientes Térmicos. Reforço Estrutural.

[1] Mestrando em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, Pará, Brasil.
[2] Mestrando Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental. Universidade Federal do Pará – UFPA.
[3] Pós-Doutor em Geologia e Geotecnia, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, Pará, Brasil.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ABSTRACT

This study investigates the thermo-structural behavior of a reinforced concrete wall subjected to high thermal gradients in an anode baking furnace, with emphasis on the influence of material properties on structural deformations. A numerical model based on the Finite Element Method (FEM) was developed using the real dimensions of the structure to evaluate the effects of thermal parameters on structural response. Additionally, different strengthening strategies were proposed to mitigate displacements throughout the operational cycle. The solutions were assessed through the comparison of displacement fields, allowing the evaluation of the relative efficiency of each approach. The results indicate that interventions that excessively restrain thermal deformation tend to intensify displacements, whereas solutions that promote proper stress redistribution show improved performance. Furthermore, material properties were found to significantly influence deformation magnitude, highlighting the importance of their accurate characterization in numerical models. Among the evaluated alternatives, proposal 6 demonstrated the greatest practical applicability, providing consistent displacement reduction and improved global structural behavior. These findings offer relevant technical support for defining strengthening strategies in structures subjected to severe thermal conditions, contributing to enhanced safety and durability.

KEYWORDS: *Finite Element Method. Thermo-structural Analysis. Reinforced Concrete. Thermal Gradients. Structural Strengthening.*

RESUMEN

Este estudio investiga el comportamiento termoestructural de una pared de hormigón armado sometida a elevados gradientes térmicos en un horno de cocción de ánodos, con énfasis en la influencia de las propiedades de los materiales sobre las deformaciones estructurales. Para ello, se desarrolló un modelo numérico basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF), utilizando las dimensiones reales de la estructura, con el fin de evaluar los efectos de los parámetros térmicos en la respuesta estructural. Además, se propusieron diferentes estrategias de refuerzo con el objetivo de mitigar los desplazamientos a lo largo del ciclo operativo. Las soluciones fueron analizadas mediante la comparación de los campos de desplazamiento, lo que permitió evaluar la eficiencia relativa de cada propuesta. Los resultados indican que las intervenciones que restringen excesivamente la deformación térmica tienden a intensificar los desplazamientos, mientras que las soluciones que favorecen una adecuada redistribución de esfuerzos presentan un mejor desempeño. Asimismo, se verificó que las propiedades de los materiales influyen significativamente en la magnitud de las deformaciones, destacando la importancia de su correcta caracterización en modelos numéricos. Entre las alternativas evaluadas, la propuesta 6 mostró mayor potencial de aplicación práctica, al reducir de forma consistente los desplazamientos y mejorar el comportamiento global de la estructura. Los resultados proporcionan bases técnicas relevantes para la definición de estrategias de refuerzo en estructuras sometidas a condiciones térmicas severas, contribuyendo al aumento de la seguridad y durabilidad.

PALABRAS-CLAVE*: Método de los Elementos Finitos. Análisis Termoestructural. Hormigón Armado. Gradientes Térmicos. Refuerzo Estructural.*

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

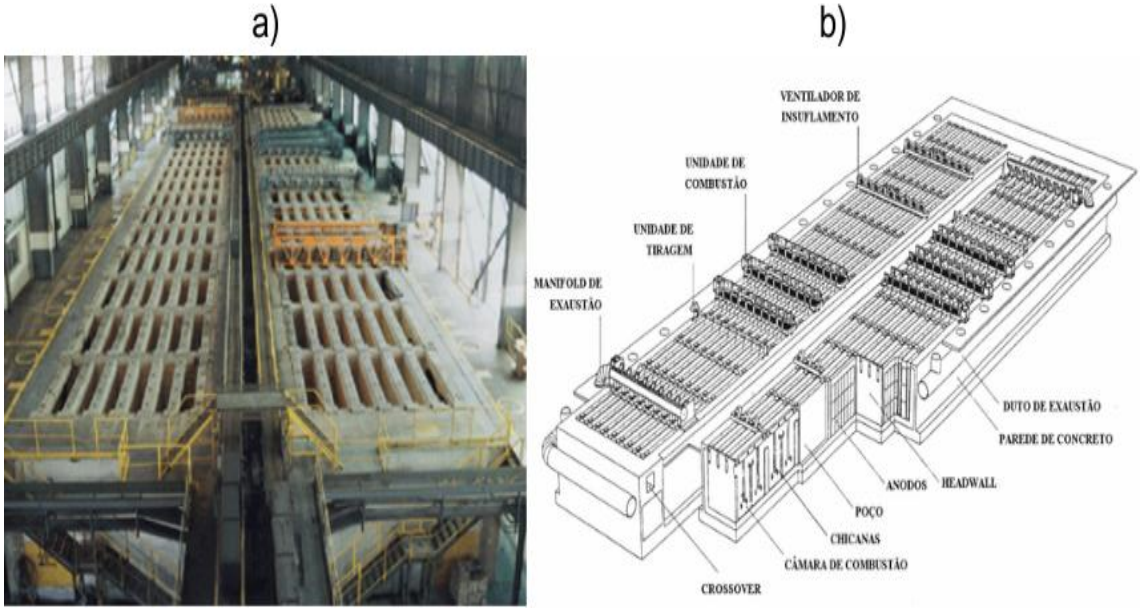
INTRODUÇÃO

O processo de produção de alumínio primário amplamente difundido em nível internacional é o método Hall-Héroult, realizado em cubas eletrolíticas. Nesse processo, a alumina (Al_2O_3) é a principal matéria-prima, enquanto a energia elétrica e os blocos de anodo de carbono representam os principais insumos operacionais necessários para a redução eletrolítica do alumínio (Grjotheim e Kvande, 1993).

Os blocos de anodo são produzidos por meio de um conjunto de etapas destinadas a garantir as propriedades físicas, químicas e mecânicas adequadas para o processo de eletrólise. Inicialmente, o coque de petróleo e o piche de alcatrão são misturados e compactados, formando o chamado anodo verde. Em seguida, esses blocos são submetidos ao processo de cozimento em fornos industriais, que operam a temperaturas elevadas, com o objetivo de promover as transformações físico-químicas necessárias para o desenvolvimento de sua resistência mecânica, condutividade elétrica, homogeneidade e baixa reatividade ao CO_2 e oxigênio (O_2) (Grjotheim e Kvande, 1993).

Após essa etapa, são encaminhados para a oficina de chumbamento, onde são acopladas hastes metálicas, responsáveis por garantir a conexão elétrica e a adequada fixação dos anodos nas cubas eletrolíticas.

Figura 1. A) Forno de cozimento de anodo. b) Detalhes do forno de cozimento do anodo



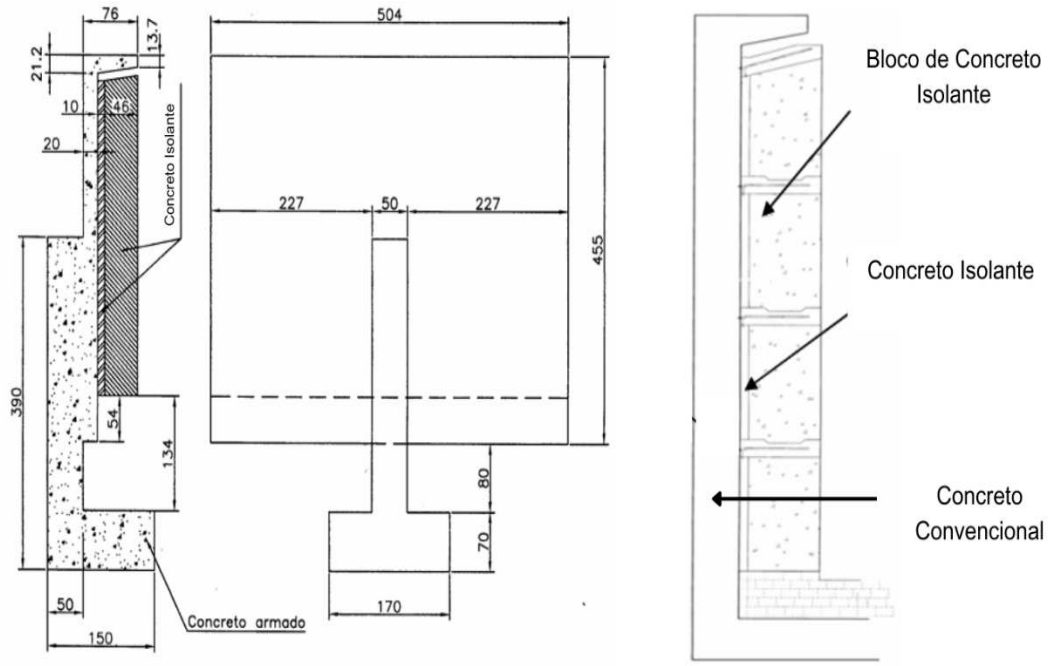
Fonte: a) Autores, 2026. b) Aquino, Moura e Mello, 2004.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O forno utilizado para este procedimento (Figura 1-a) possui mais de 20 anos de operação contínua, ao longo desses anos, passou por duas reformas em seu revestimento refratário e isolante, que são essenciais para manter a eficiência e integridade estrutural do equipamento. Por operar em temperaturas extremamente elevadas, em suas extremidades existem paredes que têm a função de conter o fluxo de calor gerado durante o processo de operação, ao mesmo tempo em que mantém o equilíbrio térmico com o ambiente externo, que permanece a temperatura ambiente (Figura 1-b).

Para isto, a parede externa do forno possui três camadas adjacentes, com materiais de propriedades térmicas e mecânicas diferentes, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2. Dimensões da parede de concreto e detalhe e seus componentes



Fonte: Autores, 2026.

Cada camada da parede foi projetada com propriedades específicas para atender às condições térmicas a que está submetida. A camada interna, em contato direto com o interior do forno, é composta por blocos de concreto isolante, sendo a mais exposta às altas temperaturas do processo. Esses blocos são fixados à estrutura por meio de um sistema de ancoragem. A camada intermediária, formada por concreto isolante, atua como uma barreira adicional, contribuindo para o isolamento térmico e promovendo uma transição eficiente entre as zonas de temperatura. Por fim, a camada externa é constituída por concreto armado,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

responsável por garantir a estabilidade mecânica da estrutura e por ser a menos afetada pelo gradiente térmico.

As paredes são construídas em segmentos adjacentes de aproximadamente 5 metros de comprimento, separados por pequenas juntas de dilatação. Em relação à configuração das seções do forno, o pilar da parede de concreto armado em estudo coincide com o limite entre duas seções. Dessa forma, cada parede de concreto armado corresponde estruturalmente à metade de uma seção e à metade da seção adjacente.

Essas estruturas têm apresentado deformações acumulativas ao longo do tempo, fenômeno investigado por Yamanaka, Souza e Teixeira (2025). Nesse estudo, os autores analisam as deformações de uma parede de concreto armado exposta a altas temperaturas, pertencente à mesma estrutura investigada no presente trabalho, por meio de análises experimentais e modelagem numérica baseada no método dos elementos finitos (MEF). O modelo desenvolvido possibilitou a simulação da distribuição de temperatura na parede de concreto, bem como a avaliação das tensões e deformações associadas, resultantes principalmente da expansão térmica e da fluência transitória do material.

Assim, este estudo tem como objetivo avaliar a influência das propriedades dos materiais na deformação da mesma parede e, por meio de modelagem numérica baseada no método dos elementos finitos, investigar diferentes estratégias de reforço estrutural para uma parede de concreto armado submetida a altos gradientes térmicos em um forno de cozimento de anodos para fornecer subsídios técnicos para intervenção real na estrutura. Além disso, busca orientar futuras investigações para o aprimoramento do entendimento do comportamento termoestrutural da parede, especialmente quanto à interação entre gradientes térmicos, propriedades dos materiais e mecanismos de deformação ao longo do ciclo operacional.

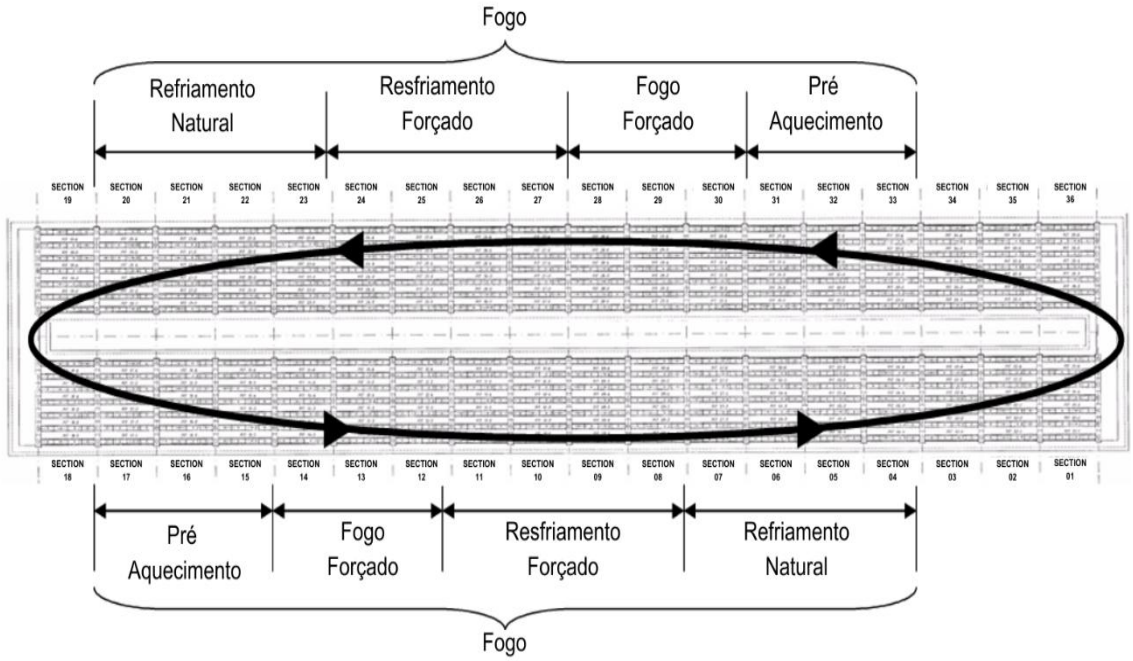
1. REFERENCIAL TEÓRICO

A indústria de alumínio primário exerce um papel fundamental no suprimento desse metal, amplamente empregado em diferentes setores, que vão desde a construção civil até a produção de bens de consumo. A obtenção do alumínio primário ocorre por meio do processo Hall-Héroult, cuja configuração mais eficiente utiliza blocos de anodo de carbono pré-cozidos em cubas eletrolíticas que operam a temperaturas próximas de 960 °C. De forma simplificada, a alumina dissolvida (Al_2O_3) presente na célula reage com o carbono dos blocos de anodo, gerando CO e CO_2 e resultando na produção de alumínio metálico (Grégoire e Gosselin, 2018; Grjotheim e Kvande, 1993).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Diferente das células eletrolíticas, os fornos de cozimento de anodo operam sob temperatura máxima de aproximadamente 1300 °C e são divididos em múltiplas seções, cada uma contendo estruturas específicas, como câmaras de combustão conhecidas como *Flue Walls.* O processo de cozimento envolve quatro principais estágios: pré-aquecimento, fogo forçado, resfriamento forçado e resfriamento natural (Figura 3) (Grégoire e Gosselin, 2018).

Figura 3. Estágios e movimento do fogo



Fonte: Adaptado de Yamanaka, Souza e Teixeira, 2025.

Esses estágios operam dentro de faixas de temperatura específicas. O primeiro estágio, o pré-aquecimento, eleva a temperatura para aproximadamente 850 °C, seguida pelo fogo forçado, onde a temperatura é mantida entre 1220 °C e 1300 °C para curar os blocos de anodos. O processo então prossegue para o resfriamento forçado, reduzindo a temperatura para cerca de 300 °C, e finalmente para o resfriamento natural, durante o qual a seção retorna à temperatura ambiente. Essas quatro etapas juntas constituem um ciclo de queima, comumente chamado de "fogo" (Yamanaka, Souza e Teixeira, 2025).

Considerando que elevadas temperaturas fazem parte das condições normais de operação da estrutura, espera-se que ela mantenha sua estabilidade e integridade estrutural,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

suportando as variações térmicas sem apresentar falhas ou deformações relevantes. A preservação dessa integridade é fundamental para assegurar a durabilidade e o desempenho estrutural ao longo do tempo, especialmente em sistemas industriais submetidos a condições térmicas severas (Yamanaka, Souza e Teixeira, 2024).

De acordo com Azenha (2009), a transferência de calor em materiais cimentícios pode ocorrer por três mecanismos principais. O primeiro é a condução, caracterizada pela transmissão de energia térmica através do material, resultante da vibração das moléculas e, em alguns casos, do deslocamento de elétrons. O segundo mecanismo é a convecção, que ocorre devido ao movimento de fluidos, no qual massas de fluido aquecidas são continuamente substituídas por massas de fluido mais frias. Por fim, a radiação corresponde à transferência de energia térmica por meio de ondas eletromagnéticas, não necessitando de um meio material para ocorrer.

Quando o fluxo de calor no concreto ocorre de forma instável, a distribuição de temperatura no interior do material tende a apresentar comportamento não linear. Essa condição provoca deformações térmicas diferenciadas ao longo da espessura da parede, resultando na geração de tensões térmicas significativas. As variações espaciais e temporais de temperatura produzem campos de tensão complexos, que podem intensificar o processo de deformação da estrutura e, em situações de aquecimento ou resfriamento não uniformes, comprometer o desempenho estrutural da parede (Kowalski, 2010).

Estudos desenvolvidos por Huang, Burgess e Plank (2001) demonstram que as variações térmicas exercem influência significativa no comportamento estrutural. Observa-se que um mesmo modelo, quando submetido a diferentes condições de temperatura, pode apresentar alterações relevantes na distribuição de tensões, evidenciando a sensibilidade da resposta estrutural aos gradientes térmicos.

De acordo com Kodur (2014), as propriedades térmicas dos materiais exercem influência direta na intensidade do fluxo de calor transferido ao elemento estrutural, enquanto as propriedades mecânicas governam a redução da resistência e a degradação da rigidez ao longo da exposição térmica. Tais propriedades apresentam comportamento fortemente acoplado, sobretudo em regimes de elevadas temperaturas, nos quais suas variações simultâneas potencializam efeitos acumulativos capazes de afetar significativamente o desempenho e a integridade estrutural ao longo do tempo.

Kodur, Banerji e Solhmirzaei (2020) afirmam que as propriedades térmicas que determinam a distribuição de temperatura em uma estrutura são a expansão térmica, calor

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

específico e condutividade térmica. A expansão térmica define o quanto um material se expande ou contrai quando há uma variação de temperatura.

Yamanaka, Souza e Teixeira (2024) investigaram as propriedades térmicas da parede em estudo, determinando os valores de condutividade térmica do concreto convencional (parede de concreto), peso específico e coeficiente de dilatação térmica do bloco de concreto isolante (Tabela 1). Os valores com a sigla (exp.) correspondem a resultados obtidos experimentalmente e os demais valores foram retirados da literatura.

Tabela 1. Propriedades dos materiais.

Propriedade	Concreto Convencional	Concreto Isolante	Bloco de Concreto Isolante	Solo (Areia Compactada)
Peso Específico (kgf/m^3)	2351,20	500,00	1420,39 (exp.)	1936,80
Módulo de Elasticidade (MPa)	21383,00	5000,00	6000,00	79,29
Condutividade Térmica (W/mK)	1,18 (exp.)	0,14	0,42	-
Calor Específico (J/kg.K)	880	1000	1000	-
Coeficiente de Dilatação Térmica (10^{-6}/°C)	9,8999	7	3,28 (exp.)	-
Coeficiente de Poisson	0,15	0,20	0,20	0,30

Fonte: Adaptado de Yamanaka, Souza e Teixeira (2024)

A fluência transitória no concreto corresponde à deformação que ocorre durante o aquecimento inicial de um elemento submetido a carregamento, especialmente sob taxas constantes de aquecimento, como do forno de cozimento de anodo, contribuindo de forma significativa para o aumento das deformações. Esse fenômeno está associado, principalmente, à migração de umidade e à evaporação da água à medida que a temperatura se eleva. Além disso, alterações físico-químicas na pasta de cimento hidratada e a incompatibilidade das propriedades térmicas da pasta e dos agregados em temperaturas elevadas também são apontadas como mecanismos relevantes. (Alogla e Kodur, 2018; Kowalski, 2010).

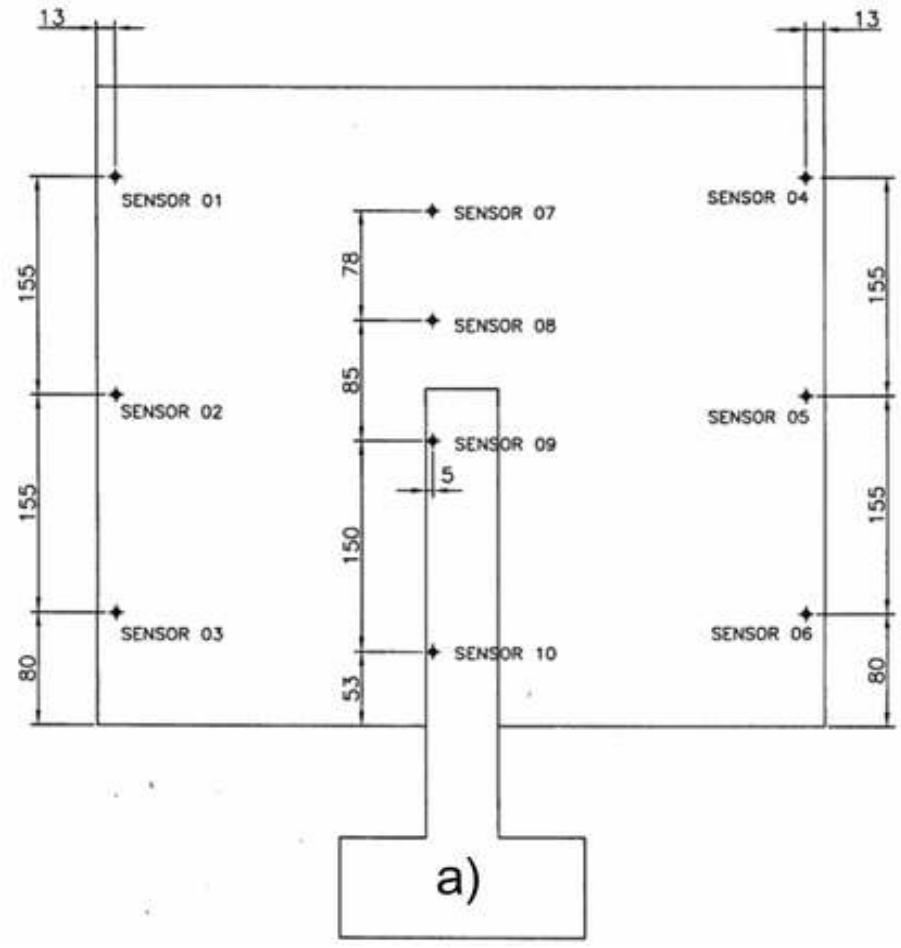
Durante o aquecimento, a fluência transitória contribui para a redistribuição das tensões internas no concreto. Embora esse mecanismo possa reduzir concentrações localizadas de tensões, ele também pode resultar no aumento das deformações em regiões específicas da estrutura. À medida que o material se deforma sob a ação simultânea de carregamento e temperatura elevada, ocorre uma redução progressiva da rigidez, tornando a estrutura mais suscetível a deslocamentos significativos. A exposição prolongada ao calor intensifica esse

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

comportamento, promovendo o acúmulo de danos ao longo do tempo. Esse processo evolutivo compromete ainda mais a rigidez do material e pode afetar a integridade estrutural, resultando em prejuízos ao desempenho da estrutura em longo prazo (Kowalski, 2010).

Com isso, Yamanaka, Souza e Teixeira (2025), investigaram as deformações da parede de concreto armado por meio de uma abordagem integrada, combinando modelagem por método dos elementos finitos (MEF) e monitoramento experimental. Para isso, foram instalados 10 sensores ao longo da parede (Figura 4) e desenvolvido um modelo com dimensões reais, com o objetivo de medir os deslocamentos estruturais e analisar o comportamento da estrutura sob a ação de gradientes térmicos ao longo do ciclo operacional (Tabela 2).

Figura 4. Posição dos sensores de deslocamento



Fonte: Adaptado de Yamanaka, Souza e Teixeira, 2025.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 2. Comparação de resultados de deslocamento (Experimental x Modelo Numérico)

Sensor	Exp.	Modelo Real
SENSOR 01	2,20	23,44
SENSOR 02	13,00	12,90
SENSOR 03	4,97	9,75
SENSOR 04	23,30	23,44
SENSOR 05	14,00	12,99
SENSOR 06	5,04	9,75
SENSOR 07	17,30	15,21
SENSOR 08	13,50	7,01
SENSOR 09	9,42	2,61
SENSOR 10	2,84	0,24

Fonte: Adaptado de Yamanaka, Souza e Teixeira (2025)

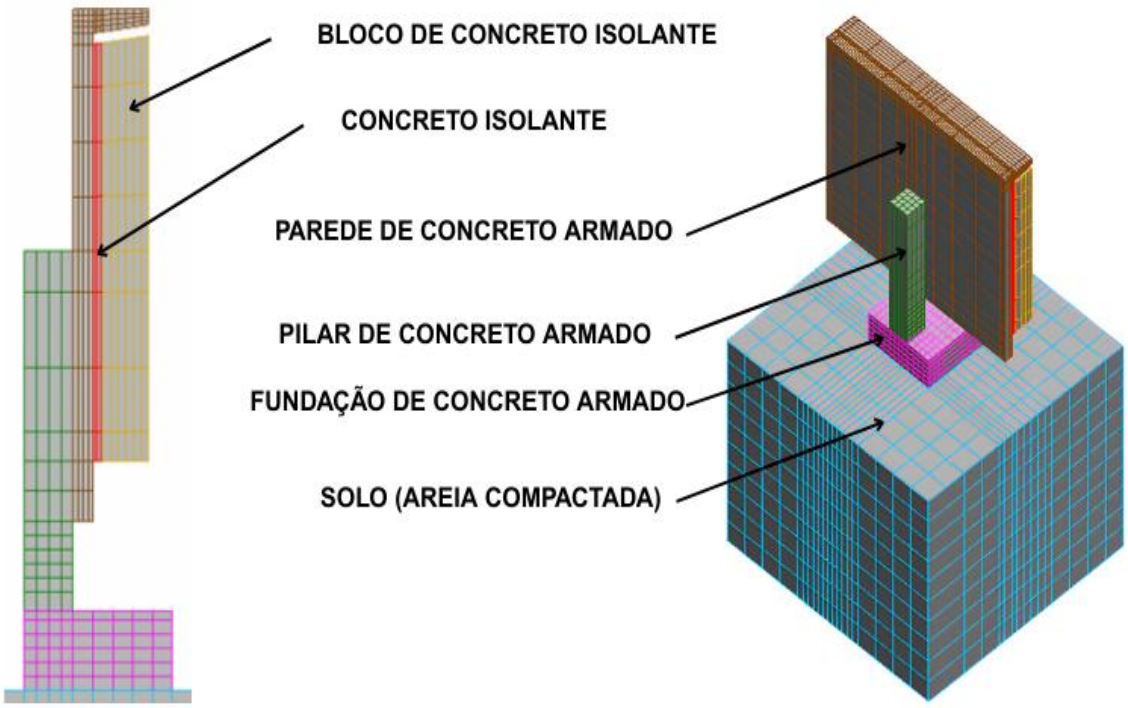
Kruger (2001) enfatiza que o método dos Elementos Finitos (MEF) pode ser empregado de forma eficiente na determinação do campo de temperaturas em estruturas com geometrias e condições de contorno complexas. Por se tratar de uma abordagem numérica versátil, capaz de lidar com diferentes geometrias, propriedades dos materiais e condições de contorno, o MEF permite a representação adequada de estruturas com formas complexas e arbitrárias, possibilitando análises mais realistas do comportamento térmico.

2. METODOLOGIA

Foi utilizado o mesmo modelo com as dimensões reais da parede (Ver Figura 2), com os mesmos parâmetros do estudo de Yamanaka, Souza e Teixeira (2025), com o auxílio do *software* Autodesk Algor Simulation, *software* de análise de elementos finitos multifísicos de uso geral, cujas aplicações típicas incluem flexão e dinâmica térmica. A Figura 5 ilustra as vistas do modelo computacional da parede do forno de anodo. O solo (areia compactada) é representado em azul; o concreto armado é mostrado em rosa, verde e marrom; e os dois tipos de concreto isolante são representados em vermelho e laranja.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 5. Vistas do modelo real em método dos elementos finitos



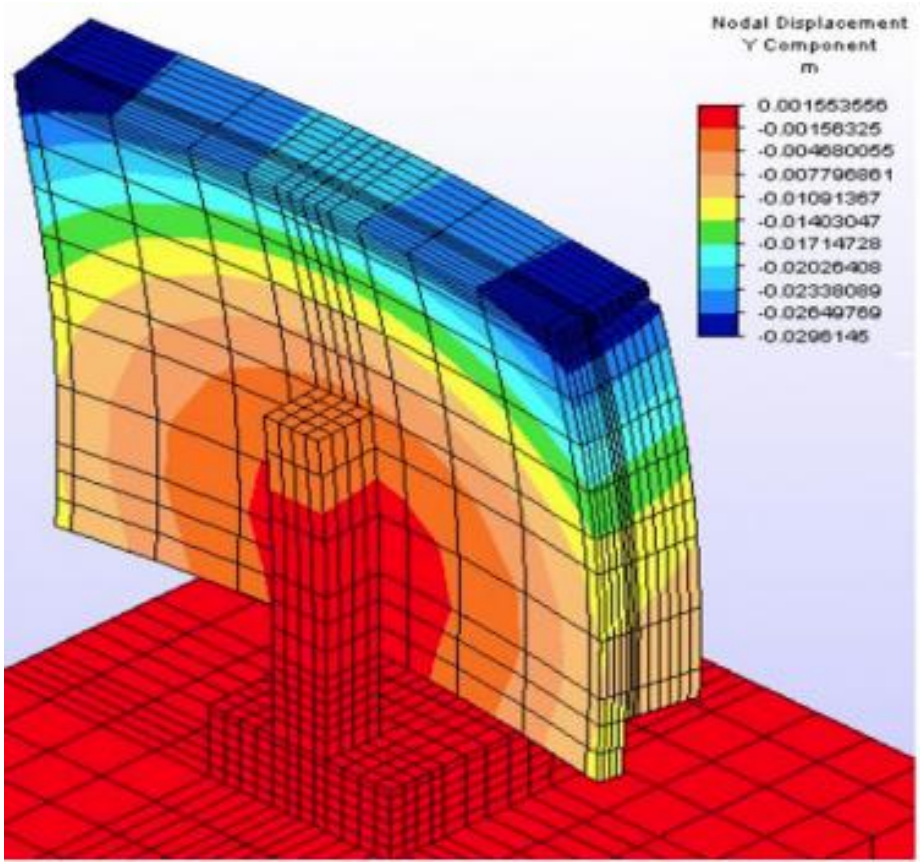
Fonte: Autores, 2026.

As condições de contorno adotadas na simulação contemplam tanto os aspectos térmicos quanto estruturais do problema. Para a análise de transferência de calor, temperaturas foram impostas em regiões específicas da estrutura, enquanto fluxos térmicos foram aplicados às superfícies a fim de representar as interações térmicas com o ambiente. No que se refere à análise estrutural, restrições de deslocamento foram definidas em pontos estratégicos do modelo, juntamente com a aplicação de forças distribuídas nas superfícies, de modo a simular as cargas mecânicas atuantes e avaliar os efeitos decorrentes dos gradientes térmicos presentes na estrutura.

A análise foi realizada por meio do acoplamento entre um modelo bidimensional de transferência de calor em regime transiente e um modelo estrutural tridimensional. Inicialmente, a simulação térmica em 2D foi utilizada para determinar a distribuição de temperatura ao longo da seção da parede. Em seguida, esse campo térmico foi transferido e aplicado como carregamento no modelo estrutural 3D. Esse procedimento permitiu que a resposta estrutural incorporasse de forma consistente os efeitos térmicos obtidos na análise de transferência de calor. Com base nas temperaturas nodais calculadas, tornou-se possível avaliar o estado de tensões induzido pelos gradientes térmicos na estrutura (Figura 6)

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 6. Modelo real com estrutura deformada devido ao efeito térmico



Fonte: Autores, 2026.

Após a conclusão do modelo computacional, foi realizado um estudo sobre a influência de cada uma das propriedades do material quanto à deformação da parede, objetivando-se determinar as propriedades mais importantes. Para isto, foram realizadas mais duas análises da estrutura referente as variações de cada propriedade, uma com o dobro do valor e outra com a metade do valor de referência da propriedade em questão. Os resultados dessas análises foram avaliados utilizando-se o deslocamento do ponto do sensor 04 (Ver Figura 4).

Adicionalmente, foram desenvolvidas seis propostas de reforço estrutural, cada uma acompanhada de seu respectivo modelo computacional e da análise dos deslocamentos obtidos. Esses resultados foram comparados tanto com os dados experimentais quanto com os resultados do modelo numérico da estrutura real apresentados por Yamanaka, Souza e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Teixeira (2025), permitindo uma avaliação consistente do desempenho das soluções propostas frente ao comportamento observado da parede em serviço.

A adoção de diferentes configurações de reforço estrutural fundamenta-se no fato de que alterações na rigidez e na geometria resistente podem modificar substancialmente o comportamento estrutural, influenciando a redistribuição de esforços e os deslocamentos da estrutura (Tapajós *et al.*, 2016).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estrutura considerada neste estudo foi modelada com as mesmas dimensões geométricas, propriedades dos materiais e parâmetros operacionais adotados na investigação anterior, garantindo total consistência entre os modelos. Dessa forma, não foram observadas diferenças quando comparada à estrutura previamente analisada, caracterizando-se, portanto, como a mesma configuração estrutural. Essa abordagem permite que as análises realizadas neste trabalho sejam interpretadas como uma continuidade direta do estudo anterior, assegurando a comparabilidade dos resultados e a confiabilidade das avaliações propostas.

Assim, com base nos estudos anteriores de Yamanaka, Souza e Teixeira (2025), foi possível estabelecer a comparação entre os resultados experimentais e numéricos dos deslocamentos da mesma estrutura, considerando os dez pontos de instrumentação apresentados na Figura 4. A partir desses dados, a Tabela 3 utiliza os deslocamentos correspondentes ao sensor 4 como referência para analisar a influência das variações nas propriedades dos materiais sobre o comportamento deformacional da estrutura.

Tabela 3. Resultados das análises com as variações das propriedades

	Deslocamentos na Posição do Sensor 04 (Yamanaka, Souza e Teixeira, 2025)					
	Concreto Convencional	Variação	Concreto Isolante	Variação	Bloco Concreto Isolante	Variação
Experimental do Sensor 04	23,30	-	23,30	-	23,30	-
Modelo Real com as propriedades Inalteradas	23,44	0,60%	23,44	0,60%	23,44	0,60%
	Variação da Deformação com a Modificação das Propriedades					

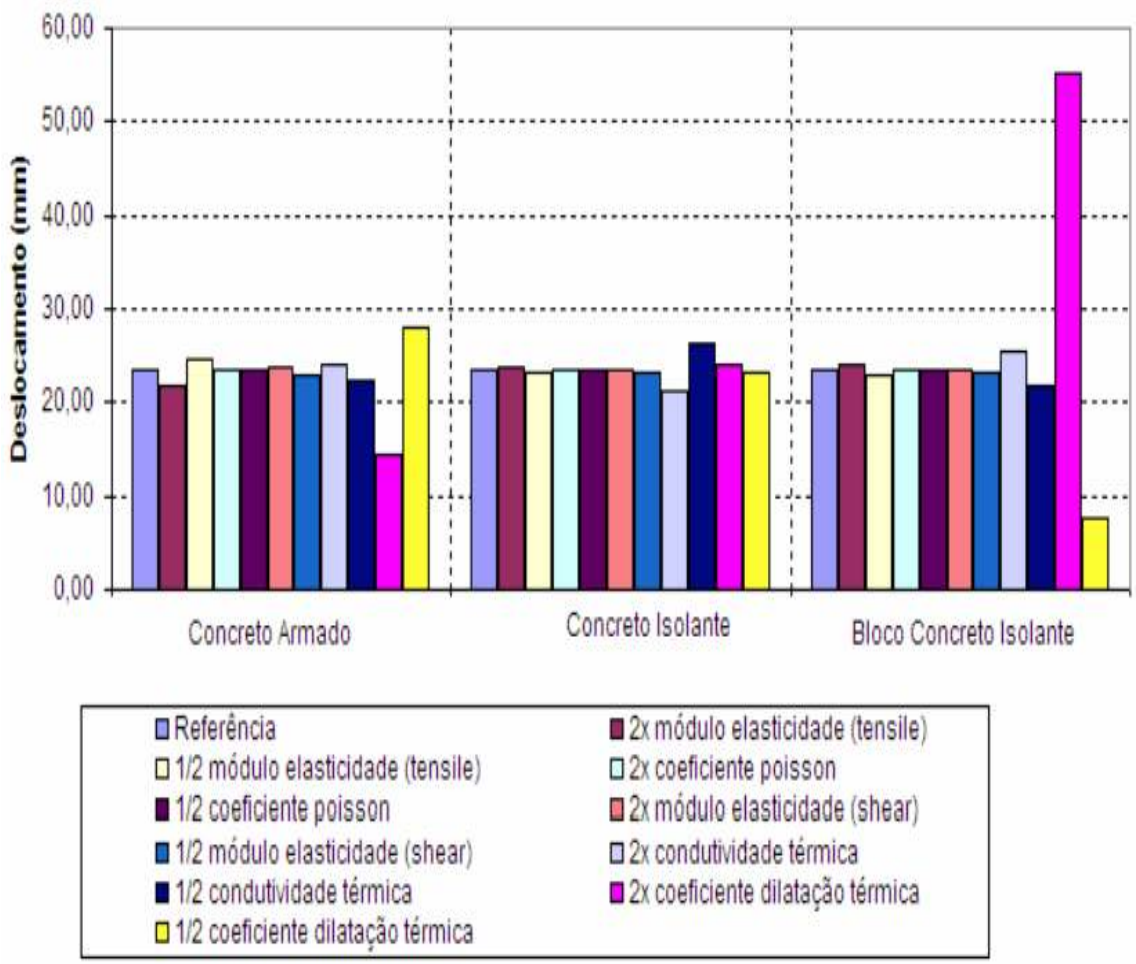
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

(2x) Módulo Elasticidade (*Tensile*)	21,83	-6,87%	23,74	1,28%	23,92	2,05%
(1/2) Módulo Elasticidade (*Tensile*)	24,67	5,25%	23,18	-1,11%	22,87	-2,43%
(2x) Coeficiente de Poisson	23,36	-0,34%	23,54	0,43%	23,59	0,64%
(1/2) Coeficiente de Poisson	23,48	0,17%	23,40	-0,17%	23,37	-0,30%
(2x) Módulo Elasticidade (*Shear*)	23,81	1,58%	23,51	0,30%	23,59	0,64%
(1/2) Módulo Elasticidade (*Shear*)	22,98	-1,96%	23,33	-0,47%	23,22	-0,94%
(2x) Condutividade Térmica	23,99	2,35%	21,11	-9,94%	25,34	8,11%
(1/2) Condutividade Térmica	22,48	-4,10%	26,23	11,90%	21,67	-7,55%
(2x) Coeficiente de Dilatação Térmica	14,48	-38,23%	24,14	2,99%	55,12	135,15%
(1/2) Coeficiente de Dilatação Térmica	27,91	19,07%	23,08	-1,54%	7,59	-67,62%

Fonte: Autores, 2026

Figura 7. Histograma com as variações das deformações devido a mudança das propriedades

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.



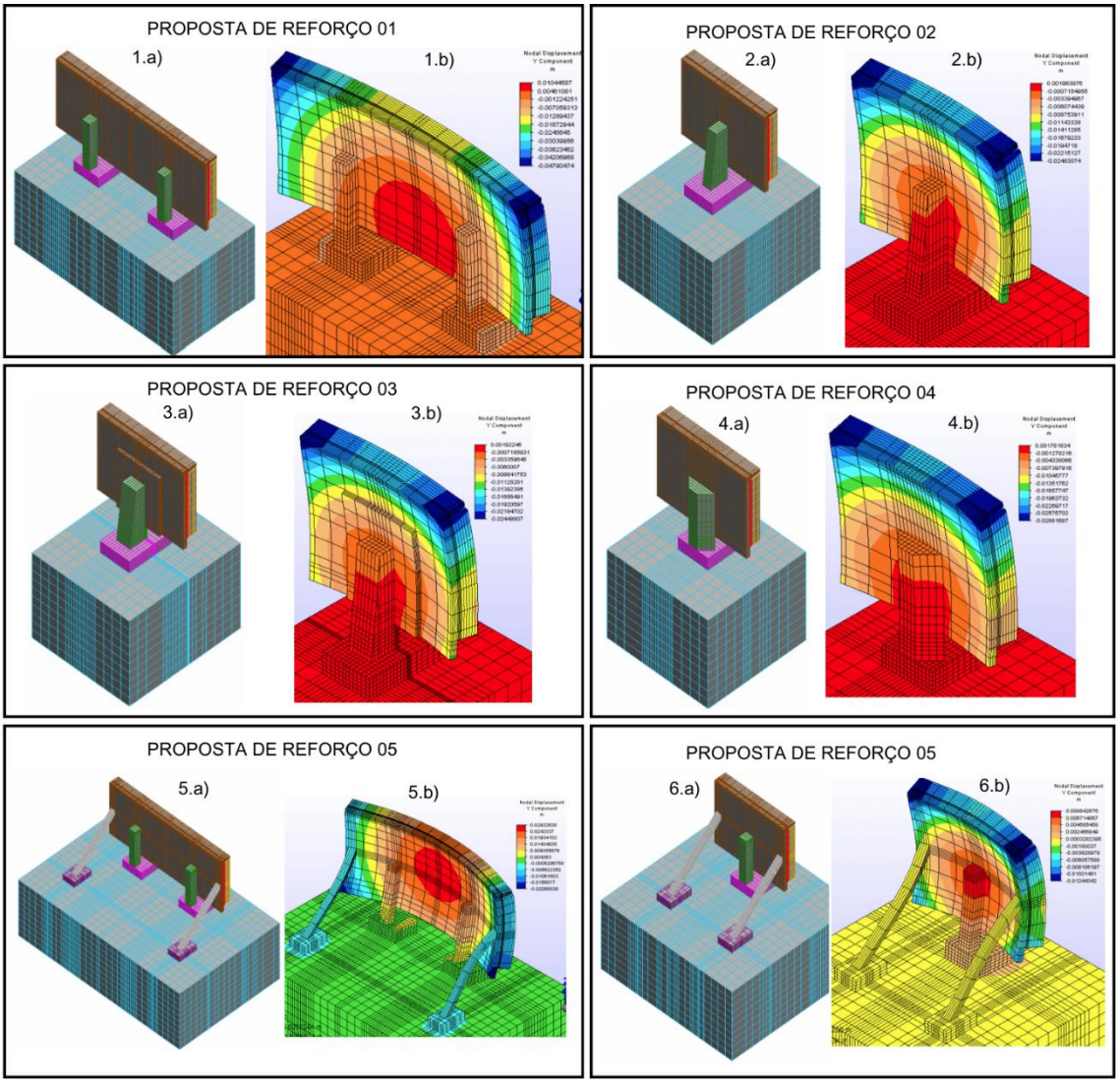
Fonte: Autores, 2026.

Pode-se constatar, com este estudo comparativo das variações dos deslocamentos em função de mudança dos valores das propriedades dos materiais, que a propriedade mais importante é o coeficiente de dilatação térmica do Bloco de Concreto Isolante. Isso ocorre porque este material está exposto às maiores temperaturas, por estar mais próximo da câmara de combustão, e por estar ligado à estrutura de concreto armado (Tabela 3 e Figura 7).

Com isso, foram desenvolvidas seis propostas de reforço a fim de mitigar os efeitos térmicos sobre a parede de concreto armado e seus componentes (Figura 8).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 8. a) Propostas de Reforço; b) Modelo deformado



Fonte: Autores, 2026

Os resultados de deformação das propostas 1 a 6 (R1 a R6) elaboradas foram sistematizados e comparados com aqueles obtidos nas investigações de Yamanaka, Souza e Teixeira (2025) (Ver Tabela 2), com o objetivo de avaliar a eficácia dos modelos de reforço propostos quanto à redução dos deslocamentos e à melhoria do desempenho estrutural da parede sob condições térmicas severas. Essa análise comparativa permitiu verificar a capacidade de cada solução em mitigar os efeitos dos gradientes térmicos, bem como identificar as alternativas mais adequadas para aplicação prática na estrutura (Tabela 4).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 4. Comparação do resultado experimental com os resultados dos diversos modelos computacionais de reforço (mm)

Sensor	(Yamanaka, Souza e Teixeira, 2025)		Propostas de reforço (R)					
	Exp.	Modelo Real	R1	R2	R3	R4	R5	R6
SENSOR 01	2,20	23,44	40,79	19,57	19,33	22,70	6,38	8,41
SENSOR 02	13,00	12,90	30,22	11,04	10,80	12,35	5,15	2,21
SENSOR 03	4,97	9,75	26,88	9,92	8,93	9,05	12,32	3,76
SENSOR 04	23,30	23,44	6,60	19,57	19,33	22,70	-25,52	8,41
SENSOR 05	14,00	12,99	-4,91	11,04	10,80	12,35	-27,58	2,21
SENSOR 06	5,04	9,75	-8,87	9,92	8,93	9,05	-21,08	3,76
SENSOR 07	17,30	15,21	14,61	11,22	11,30	14,67	-18,08	0,32
SENSOR 08	13,50	7,01	6,30	4,27	4,66	6,59	-20,11	-5,00
SENSOR 09	9,42	2,61	1,81	0,98	1,27	2,41	-19,12	-6,94
SENSOR 10	2,84	0,24	-0,55	0,15	0,11	0,14	-11,67	-4,82

Fonte: Autores, 2026

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A deformação observada na estrutura analisada está predominantemente associada a efeitos térmicos, decorrentes dos elevados gradientes de temperatura atuantes na parede. Nesse contexto, as juntas de dilatação entre os segmentos estruturais desempenham papel fundamental na acomodação das deformações, contribuindo para a redução dos deslocamentos.

A análise comparativa dos resultados, apresentada na Tabela 4, evidencia que as propostas de reforço R1 e R5, baseadas na eliminação das juntas de dilatação, resultaram em aumento das deformações em determinadas regiões, mostrando-se inadequadas do ponto de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

vista estrutural. Por sua vez, as propostas R2, R3 e R4 promoveram apenas reduções pouco expressivas nos deslocamentos, não sendo suficientes para mitigar o problema de forma eficaz.

Os resultados obtidos a partir do modelo proposto de reforço 6 (R6) foram analisados por meio da comparação com os dados experimentais e com o modelo real, permitindo avaliar tanto a tendência de variação dos deslocamentos quanto a aderência do modelo ao comportamento real da estrutura (Tabela 5).

Tabela 5. Comparação de resultados

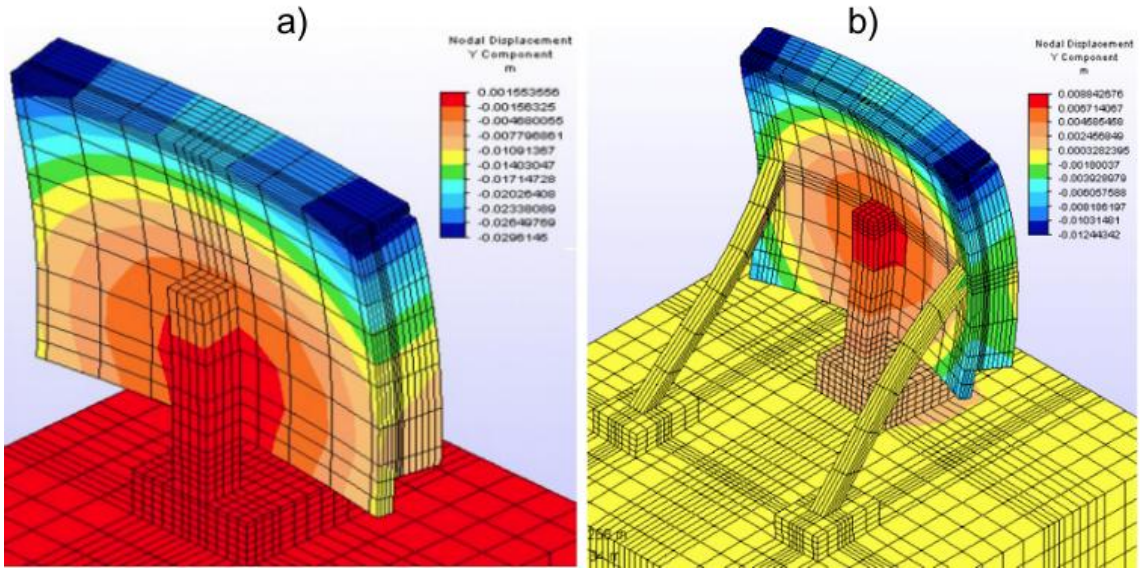
Sensor	R6	Exp.	Var (%)	Modelo Real	Var (%)
SENSOR 01	8,41	2,20	282,27%	23,44	-64,12%
SENSOR 02	2,21	13,00	-83,00%	12,90	-82,87%
SENSOR 03	3,76	4,97	-24,35%	9,75	-61,44%
SENSOR 04	8,41	23,30	-63,91%	23,44	-64,12%
SENSOR 05	2,21	14,00	-84,21%	12,99	-82,99%
SENSOR 06	3,76	5,04	-25,40%	9,75	-61,44%
SENSOR 07	0,32	17,30	-98,15%	15,21	-97,90%
SENSOR 08	-5,00	13,50	-137,04%	7,01	-171,33%
SENSOR 09	-6,94	9,42	-173,67%	2,61	-365,90%
SENSOR 10	-4,82	2,84	-269,72%	0,24	-2108,33%

Fonte: Autores, 2026.

Inicialmente, a variação relativa dos deslocamentos foi utilizada para identificar o efeito do reforço na resposta estrutural. De modo geral, o modelo R6 apresentou redução dos deslocamentos na maioria dos sensores quando comparado aos valores experimentais e ao modelo real, indicando que a solução proposta contribui para o aumento da rigidez global da parede (Figura 9). No ponto do sensor 4, que teve os resultados comparados com o modelo com as propriedades modificadas, o reforço reduziu o deslocamento em 64,12%.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 9. A) Deformação do modelo real; b) Deformação do reforço R6



Fonte: Autores, 2026.

Entretanto, em alguns pontos específicos, como os sensores 8, 9 e 10, foram observadas variações que provocaram aumento localizado dos deslocamentos, o que sugere a existência de redistribuição não uniforme das deformações ao longo da estrutura ou efeitos localizados e condições de contorno que o modelo não conseguiu levar em consideração, tais como gradiente de temperatura não previsto, heterogeneidades de materiais.

Observa-se ainda que a redução dos deslocamentos promovida pelo modelo R6 não ocorre de forma uniforme, estando associada à configuração do reforço adotado. A introdução de elementos estruturais inclinados contribui não apenas para a contenção dos deslocamentos, mas também para a mitigação de efeitos secundários, como esforços de torção, melhorando o desempenho global da estrutura. Por outro lado, os resultados indicam que estratégias de reforço que restringem excessivamente a liberdade de deformação podem não ser adequadas, uma vez que a acomodação das deformações térmicas é essencial para o bom desempenho de estruturas submetidas a ciclos térmicos severos. Assim, soluções que equilibram rigidez e capacidade de deformação tendem a apresentar melhor desempenho estrutural.

De forma geral, o modelo R6 demonstrou ser a alternativa mais eficiente entre as propostas analisadas, promovendo redução significativa dos deslocamentos na maior parte dos pontos monitorados. Embora tenham sido observadas variações positivas em regiões específicas, essas não comprometem o desempenho global da solução, estando associadas a efeitos locais de redistribuição de esforços. Nesse sentido, o modelo R6 se mostra adequado

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

para aplicação prática, uma vez que proporciona um equilíbrio entre rigidez estrutural e capacidade de acomodação das deformações térmicas, contribuindo para a melhoria do comportamento estrutural da parede sob condições operacionais severas.

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se:

a) A monitoração da estrutura por meio de sensores de deformação (*strain gauges*), com e sem compensação térmica;

b) O desenvolvimento de um modelo computacional mais abrangente, incluindo uma seção completa do forno (parede de concreto armado, *flue wall* e outras estruturas, como *head wall* e *side wall*); e

c) A avaliação experimental da estrutura após a implementação do reforço 6 proposto, a fim de validar os resultados numéricos obtidos.

AGRADECIMENTOS

Ao CAPES pelo auxílio concedido em Programa de Demanda Social -DS (Processo nº 88887.186947/2025-00) que possibilitou a execução do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia da Universidade Federal do Pará.

REFERÊNCIAS

ALOGLA, S.; KODUR, V. K. R. Quantifying transient creep effects on fire response of reinforced concrete columns. **Engineering Structures**, [*S.l.*], v. 174, p. 885–895, nov. 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.093.

AQUINO, A. M. A.; MOURA, R. R.; MELLO, J. M. Expansion of an Albras bake furnace in continuous operation. **Light Metals**, [*S.l.*], 2004.

AZENHA, M. A. D. **Numerical Simulation of the Structural Behaviour of Concrete Since its Early Ages**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009.

GRÉGOIRE, F.; GOSSELIN, L. Comparison of three combustion models for simulating anode baking furnaces. **International Journal of Thermal Sciences**, [*S.l.*], v. 129, p. 532–544, jul. 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.04.006.

GRJOTHEIM, K.; KVANDE, H. (org.). **Introduction to aluminium electrolysis: understanding the Hall-Héroult process**. 2. ed. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 p.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

HUANG, Z.; BURGESS, I. W.; PLANK, R. J. Non-linear structural modelling of a fire test subject to high restraint. **Fire Safety Journal**, [*S.l.*], v. 36, n. 8, p. 795–814, nov. 2001. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0379-7112(01)00040-6.

KODUR, V. Properties of Concrete at Elevated Temperatures. **ISRN Civil Engineering**, [*S.l.*], v. 2014, p. 1–15, 13 mar. 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2014/468510.

KODUR, V. K. R.; BANERJI, S.; SOLHMIRZAEI, R. Test methods for characterizing concrete properties at elevated temperature. **Fire and Materials**, [*S.l.*], v. 44, n. 3, p. 381–395, abr. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1002/fam.2777.

KOWALSKI, R. Mechanical properties of concrete subjected to high temperature. **J. Silesian Univ. Technol.**, [*S.l.*], v. 3, p. 61–70, 2010.

KRUGER, D. A. V. **Análise térmica transiente de estruturas de concreto executadas por camadas**. 2001. Dissertação – Universidade Federal do Paraná, 2001.

TAPAJÓS, L. S.; FERREIRA, J. A. T.; LIMA NETO, A. F.; TEIXEIRA, M. R.; FERREIRA, M. P. Effect of wind in the design of reinforced concrete buildings. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [*S.l.*], v. 9, n. 6, p. 883–910, dez. 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1590/s1983-41952016000600005.

YAMANAKA, F. M.; SOUZA, R. M. D.; TEIXEIRA, M. R. Análise das propriedades térmicas de uma parede de concreto armado submetido a temperaturas extremas. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, [*S.l.*], v. 17, n. 13, p. e13277, 3 dez. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.55905/revconv.17n.13-045.

YAMANAKA, F. M.; SOUZA, R. M. D.; TEIXEIRA, M. R. Experimental-numerical comparative study of thermal deformations of a reinforced concrete outer wall of the anode block cooking chamber in the primary aluminum industry. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [*S.l.*], v. 18, n. 4, p. e18406, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1590/s1983-41952025000400006.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.