

## **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO REFORÇO ESTRUTURAL DE PILARES ESBELTOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CONCRETO**

### **STUDY OF THE BEHAVIOR OF THE STRUCTURAL REINFORCEMENT OF SLENDER COLUMNS WITH PARTIAL CONCRETE SUBSTITUTION**

**HITALLO ROFHIMAN SOUZA**

Instituto Federal Goiano, Campus Trindade (GO)  
hitallo.rofhiman@estudante.ifgoiano.edu.br

**MATHEUS BENTO DE SOUZA PEREIRA**

Instituto Federal Goiano, Campus Trindade (GO)  
matheus.bento@estudante.ifgoiano.edu.br

**MARCEL WILLIAN REIS SALES**

Instituto Federal Goiano, Campus Trindade (GO)  
marcel.sales@ifgoiano.edu.br

**JOSÉ DE SOUZA SALES**

Universidade Estadual de Goiás, Campus Central, Anápolis (GO)  
jose.sales@ueg.br

**GUILHERME CÉSAR MARTINS DE MORAIS**

Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde (GO)  
guilherme.martins@estudante.ifgoiano.edu.br

**Resumo:** Os pilares são essenciais para a estabilidade estrutural de edificações, independentemente do porte. Este estudo tem como objetivo analisar a capacidade de carga de um pilar utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), considerando a substituição parcial do concreto *in loco* por um concreto *in loco* com resistência  $f_{ck} = 35$  MPa. A pesquisa busca entender como essa intervenção afeta a integridade estrutural e o desempenho mecânico do pilar, avaliando variações em sua resistência e comportamento sob carga. A modelagem do pilar segue as dimensões e características propostas por Couto et al. (2019). A malha foi escolhida após análise de convergência, utilizando o critério de erro relativo da tensão em um ponto de referência ao longo das malhas testadas. Os resultados mostraram que, com o concreto *in loco* de  $f_{ck} = 25$  MPa, o pilar não resistiria aos esforços solicitantes, conforme os critérios da ABNT NBR 6118:2023. No entanto, considerando a resistência última do concreto, o pilar não colapsaria, mas precisaria de reforço nas abas, com substituição parcial de 60 cm de concreto, valor semelhante ao proposto por Couto et al. (2019). Ao contrário de Couto et al. (2019), foi optado por substituir uma parte da seção do pilar por concreto de menor resistência, devido à dificuldade em obter parâmetros para concretos de alta resistência no software Abaqus (2025). O estudo também identificou deslizamento nas seções longitudinais do pilar, gerando tensões de cisalhamento. Caso essas tensões ultrapassem a resistência do sistema, o pilar pode se tornar instável, com risco de descolamento das partes e instabilidade lateral, comprometendo a integridade estrutural. Os resultados comprovam que, ao aplicar critérios de não linearidade física e geométrica, o

software Abaqus (2025) oferece uma análise detalhada do comportamento do pilar. Este estudo válida a substituição parcial do concreto como uma solução eficaz para o reforço estrutural, contribuindo para a durabilidade e segurança das construções.

**Palavras-chave:** Método dos elementos finitos, Reforço estrutural, Substituição parcial de concreto.

**Abstract:** Columns are essential for the structural stability of buildings, regardless of their size. This study aims to analyze the load-bearing capacity of a column using the Finite Element Method (FEM), considering the partial replacement of in-situ concrete with concrete of strength  $f_{ck} = 35$  MPa. The research seeks to understand how this intervention affects the structural integrity and mechanical performance of the column, assessing variations in its strength and behavior under load. The column modeling follows the dimensions and characteristics proposed by Couto et al. (2019). The mesh was chosen after a convergence analysis, using the relative error criterion of stress at a reference point along the tested meshes. The results showed that with the in-situ concrete of  $f_{ck} = 25$  MPa, the column would not resist the applied forces, according to the criteria of ABNT NBR 6118:2023. However, considering the ultimate strength of the concrete, the column would not collapse but would require reinforcement on the flanges, with a partial replacement of 60 cm of concrete, similar to the value proposed by Couto et al. (2019). Unlike Couto et al. (2019), it was decided to replace part of the column section with lower-strength concrete due to the difficulty in obtaining parameters for high-strength concrete in the Abaqus software (2025). The study also identified sliding in the longitudinal sections of the column, generating shear stresses. If these stresses exceed the system's resistance, the column may become unstable, with a risk of delamination and lateral instability, compromising its structural integrity. The results demonstrate that by applying physical and geometric nonlinearity criteria, the Abaqus software (2025) provides a detailed analysis of the column's behavior. This study validates partial concrete replacement as an effective solution for structural reinforcement, contributing to the durability and safety of buildings.

**Keywords:** Structural reinforcement, Partial concrete replacement, Finite element method.

## Introdução

Os pilares são componentes fundamentais na arquitetura das edificações, desempenhando um papel crucial na transferência de cargas das lajes e vigas para a fundação. A resistência e integridade desses elementos são vitais para o desempenho global da estrutura, pois qualquer comprometimento pode resultar em falhas estruturais graves. Diversas adversidades, como má execução, irregularidades na mistura e problemas de vibração, podem afetar a qualidade do concreto, levando à desagregação e degradação da seção.

Particularmente em pilares esbeltos, a eficiência estrutural está intimamente ligada à integridade física e às propriedades mecânicas do material. Nesse contexto, a avaliação da resistência do reforço estrutural em pilares esbeltos, por meio da substituição parcial do concreto na seção, torna-se essencial. Essa análise deve considerar não apenas as condições de aplicação do reforço, mas também as diferentes cargas atuantes e as características específicas do pilar.

Para otimizar esse estudo, o uso de softwares de modelagem, como o Abaqus (2025), oferece uma ferramenta poderosa para simular o comportamento estrutural dos pilares sob diversas condições. Através de análises numéricas, é possível avaliar como as modificações na seção e a introdução de novos materiais influenciam a distribuição de tensões e a capacidade de carga do pilar. Essas simulações permitem prever o desempenho em situações reais, proporcionando um entendimento mais aprofundado das interações mecânicas envolvidas.

Por meio de investigações rigorosas e simulações detalhadas, busca-se validar se essa técnica de reforço realmente oferece uma solução eficaz, garantindo a segurança e a durabilidade da estrutura. Além disso, ao integrar a modelagem computacional às práticas de reforço, este estudo contribui para o desenvolvimento de métodos inovadores no setor da construção civil, promovendo a longevidade e a integridade das estruturas diante dos desafios contemporâneos.

Neste trabalho, será usado o software Abaqus (2025) para analisar um pilar projetado para uma resistência e executado com um concreto de resistência menor. Nestas análises serão averiguados a resistência de laboratório e de projeto segundo a ABNT NBR 6118:2023 com a finalidade de avaliar se há necessidade de reforço ou reparo do pilar para qualquer uma dessas duas situações.

## **Revisão bibliográfica**

### **Patologia estrutural**

Segundo Júnior et al. (2021), o termo "patologia estrutural" refere-se ao campo da engenharia civil que se dedica ao estudo das manifestações patológicas, suas causas, implicações e falhas resultantes do desgaste das estruturas responsáveis pela sustentação das edificações.

### **Substituição parcial de concreto**

Segundo Takeuti (1999), a substituição parcial de concreto é uma metodologia

que envolve a troca de uma parte da peça estrutural, visando preservar a resistência necessária sem prejudicar as propriedades fundamentais do concreto, como durabilidade e funcionalidade. Esse procedimento pode ser utilizado por diversas razões, como falhas na execução da concretagem e o consequente aparecimento de manifestações patológicas.

De acordo com Tanque e Gomes (2023), as manifestações patológicas em concreto geralmente estão relacionadas a falhas no controle durante a aplicação do material, como má vibração, lançamento irregular na superfície ou alta concentração de armaduras na peça concretada. Além disso, Takeuti (1999) descreve que peças de concreto armado com resistência inferior à de projeto podem ser classificadas também como manifestações patológicas na estrutura e estão relacionadas com o controle de qualidade durante a produção do concreto.

### **Reforço estrutural**

De acordo com Takeuti (1999), o reforço estrutural é um conjunto de técnicas e procedimentos utilizados para fortalecer uma estrutura existente que tenha perdido parte de sua capacidade de suporte original. Essas intervenções visam restaurar ou até mesmo melhorar as características mecânicas da estrutura, garantindo sua segurança, funcionalidade e aos requisitos de carga e uso.

### **Método dos elementos finitos (MEF)**

No Método dos Elementos Finitos, estruturas complexas são divididas em elementos menores, cujas equações matemáticas descrevem seu comportamento sob cargas variadas. Essa técnica permite analisar tensões e deformações de modelos estruturais complexos, considerando diferentes materiais, geometrias e condições de contorno.

### **Software ABAQUS (2025) - análise estrutural (MEF)**

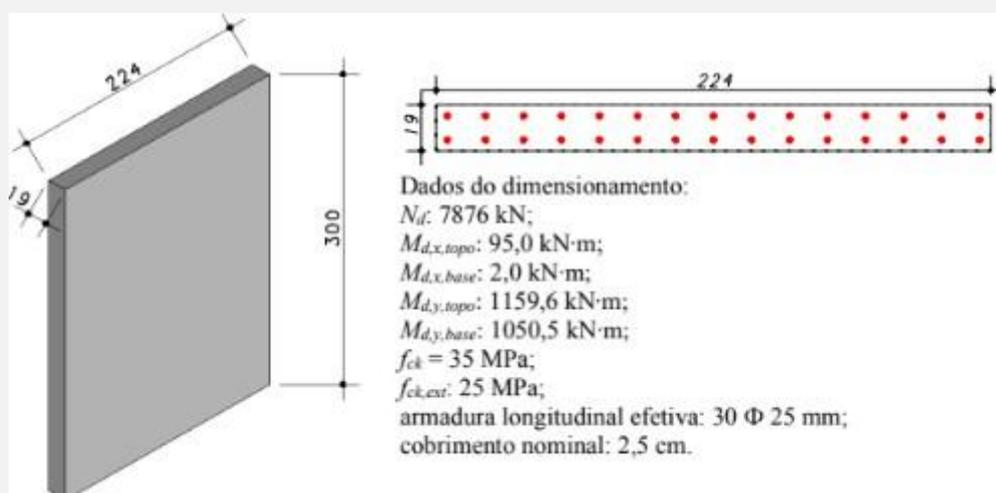
É uma ferramenta que pode ser utilizada na engenharia estrutural para

simulações computacionais, realizando análises numéricas baseadas no método dos elementos finitos, permitindo simulações rápidas e precisas do comportamento de elementos como vigas, lajes e pilares sob diferentes condições de carga. Esta ferramenta possibilita análises estruturais considerando os critérios de não linearidade física e geométrica das peças, além de possibilitar extração dos resultados a partir de gráficos e mapas de calor. Assim, facilita a análise, ajustes e validações durante o projeto, contribuindo para a segurança e eficiência das estruturas.

## Metodologia

A proposta de estudo consiste na modelagem de um pilar-parede, com dimensões e capacidades de carga típicas de estruturas verticais. O elemento modelado foi projetado de acordo com o modelo utilizado no trabalho de Couto et al. (2019) conforme demonstrado na Figura 01 :

Figura 01 - Pilar modelo projetado.



Fonte: Couto et al., 2019.

Para este estudo, a escolha do tipo de pilar levou em consideração os efeitos de esbeltez, pilar esbeltos sofrem com a presença significativa de esforços de primeira e segunda ordem, tornando-se, assim, peças com uma dinâmica de trabalho mais complexa e, portanto, demandando maior atenção. Para analisar os efeitos provocados pelos esforços de segunda ordem, foi incluído na análise numérica, o critério de não linearidade

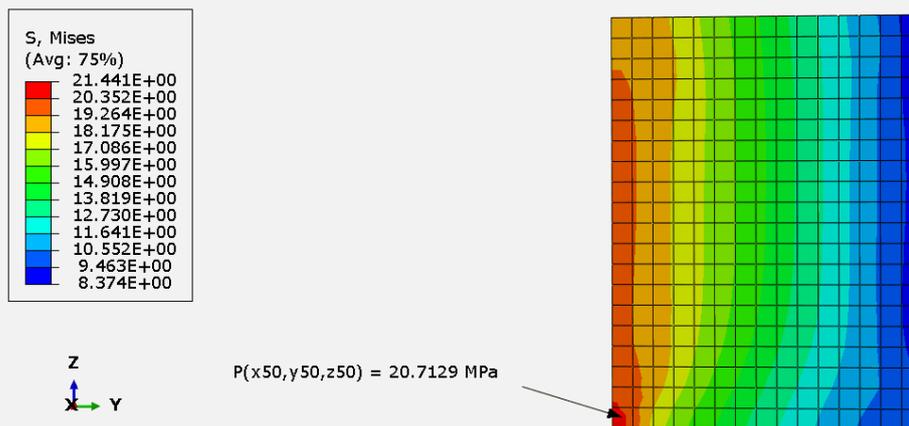
geométrica e física do pilar, funções disponíveis no software Abaqus (2025).

## Malha de elementos finitos

### Escolha da malha

Inicialmente, foram modeladas 4 malhas, sendo elas: 55 cm, 30 cm, 20 cm e 15 cm. Para determinação da malha ideal, utilizou-se o critério de erro relativo baseado na tensão em um ponto referencial ( $x=50\text{mm}$ ,  $y=50\text{ mm}$ ,  $z=50\text{ mm}$ ) fixado em todas as malhas na região de maior incidência de carga, conforme demonstrado na figura 02 :

Figura 02 - Tensão no ponto ( $x = 50\text{mm}$ ,  $y = 50\text{ mm}$ ,  $z = 50\text{ mm}$ )



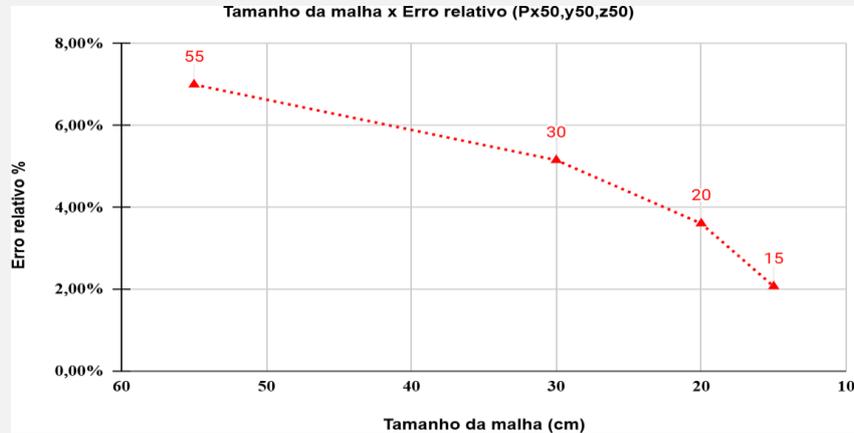
Fonte: Próprio autor, 2024.

Assim, a partir da simulação computacional determinou-se a tensão resultante em cada uma das malhas, realizou-se o cálculo da variação da tensão entre malhas conforme equação 01:

$$Eq. 1 \quad e(\%) = \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\sigma_{i-1}} \cdot 100$$

A partir da equação 01 determinou-se a variação da tensão ao longo das malhas modeladas e traçou-se um gráfico para apresentação do erro relativo correspondente, conforme apresentado na figura 03 :

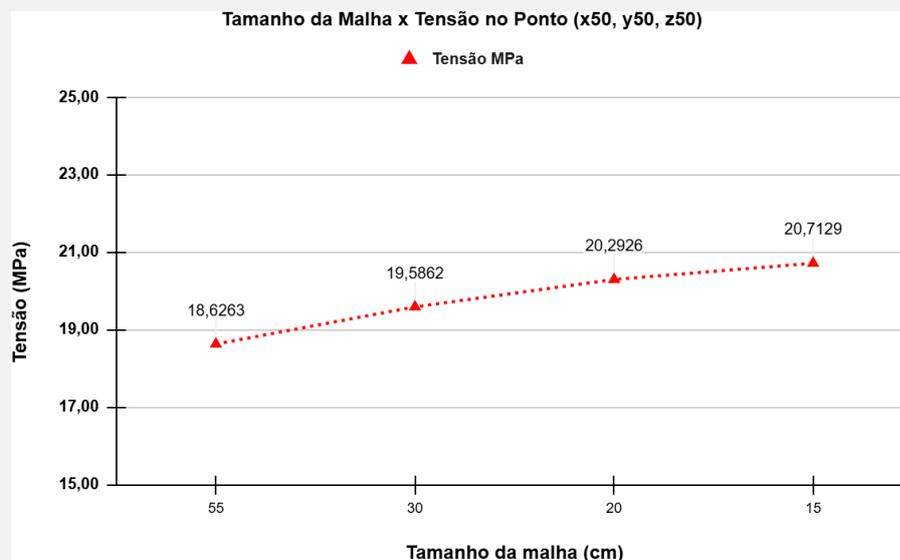
Figura 03 - Erro relativo entre malhas.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Conforme o resultado apresentado, a malha de 15 centímetros ofereceu um erro relativo de 2,00% comparado aos resultados apresentados nas malhas anteriores (malha de 55, 30 e 20 cm). À medida que a malha é reduzida, a precisão aumenta e consequentemente o erro relativo reduz. Sendo assim, para o desenvolvimento dos estudos, utilizou-se essa malha para fornecer uma boa precisão a um custo computacional reduzido. Na figura 04 é apresentado um exemplo de refinamento dos resultados obtidos através da escolha da malha.

Figura 04 - Relação Tamanho da malha x Tensão no ponto.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Observou-se que, conforme a redução do elemento finito ocorre, a tensão no ponto de referência tende a aumentar, de maneira constante. Esse efeito dentro do Abaqus (2025) ocorre em virtude da estabilização do modelo geométrico do elemento. Quanto menor a malha, maior a quantidade de elementos finitos (EF) e por consequência maior a precisão do modelo simulado.

### **Tipo do elemento finito do concreto**

Em síntese, para a análise tridimensional do modelo estrutural proposto, utilizou-se o elemento hexaédrico linear do tipo C3D8R. Este elemento é amplamente empregado em simulações de sólidos devido à sua facilidade de manuseio, pois possui uma geometria bem definida. Isso implica que sua superfície de contato pode ser determinada com facilidade, uma vez que corresponde a faces planas, quadradas ou retangulares. Essa geometria regular facilita a detecção e definição das fronteiras de contato entre os elementos, sem a necessidade de técnicas complexas de mapeamento de superfícies ou alinhamento de nós.

O elemento C3D8R conforme demonstrado na figura 05, é um tipo de elemento sólido com 8 nós, cada um situado em um vértice do cubo hexaédrico. Cada nó possui três graus de liberdade, correspondentes aos deslocamentos nas direções X, Y e Z. A notação "C3D8R" descreve as seguintes características do elemento, segundo manual do Abaqus (2016):

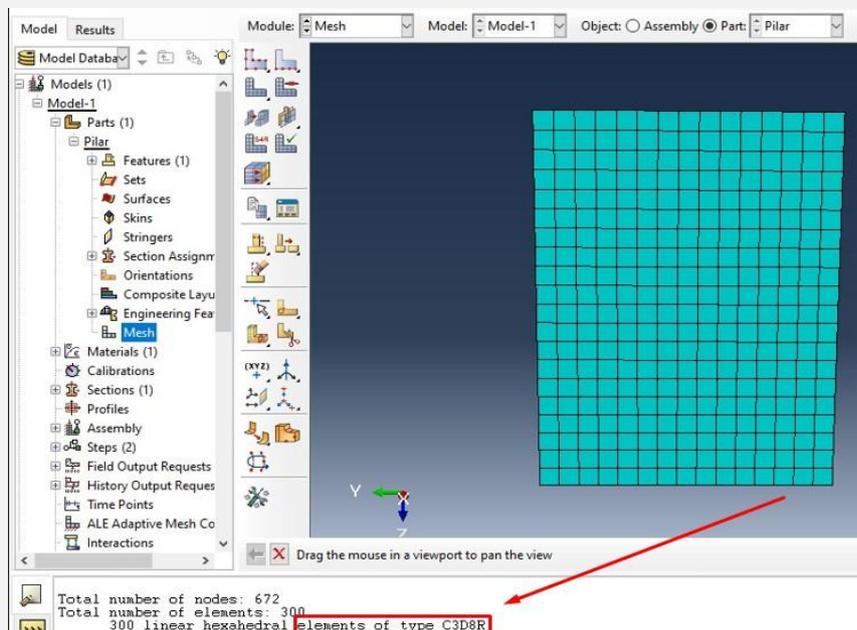
C: Elemento "*Continuum*" ou sólido, adequado para modelar volumes tridimensionais; 3: Linear, com interpolação linear das variáveis de campo;

D: Dimensão espacial (tridimensional, com coordenadas X, Y e Z); 8: Possui 8 nós, localizados nos vértices do cubo hexaédrico;

R: Integração Reduzida, utilizando menos pontos de Gauss para otimizar o custo computacional e melhorar a estabilidade.

Portanto, o C3D8R é uma escolha robusta para simulações de larga escala, devido à sua eficiência no tempo de cálculo e à sua capacidade de modelar comportamentos complexos.

Figura 05 - Tipo de elemento finito C3D8R.



Fonte: Próprio autor, 2024.

### Tipo do elemento finito do aço

Para a análise 3D do modelo estrutural apresentado, o elemento finito T3D2 foi empregado pela praticidade de modelagem das armaduras, visto que, as armaduras somente foram utilizadas para fundamentar a análise de tração e compressão do pilar-parede, provocada pelo momento fletor na peça. Sua característica unidimensional (geometria que se refere a objetos com uma única dimensão) facilita a definição das fronteiras, auxiliando na interação de contato entre dois elementos adjacentes, uma vez que a superfície de contato é basicamente uma linha reta.

### Análise de convergência de malhas

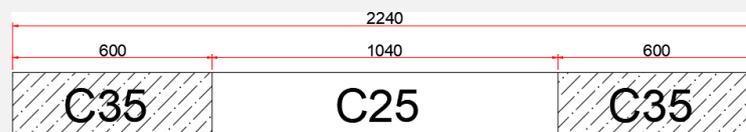
A escolha das dimensões do elemento finito é crucial para refinar a precisão dos resultados obtidos por meio da simulação. Por essa razão, os dados de tensão das malhas com dimensões de 550 mm, 300 mm, 200 mm e 150 mm, a partir de um ponto referencial ( $x = 50$  mm,  $y = 50$  mm,  $z = 50$  mm), foram coletados e verificados quanto à variabilidade da tensão, figura 06. De maneira geral, observou-se que, quanto menor a dimensão do

elemento finito, menor a variação da tensão no ponto. No entanto, para reduzir o custo computacional, a análise do erro relativo entre as malhas permitiu estabelecer um critério para a dimensão ótima a ser utilizada.

### Material do concreto

Para modelagem do pilar padrão a ser simulado, utilizou-se inicialmente um concreto C25 em todo segmento da peça, e posteriormente utilizou-se dois tipos de concreto para modelagem do pilar reforçado, nas abas de extremidade aplicou-se C35 e no centro permaneceu C25. A espessura do pilar é de 19 cm por 224 cm. A substituição foi feita ao longo de 60 cm devido ao resultado que será mostrado logo a frente. Dessa forma, a Figura 06 tem a finalidade de apresentar como será feita a modelagem no futuro.

Figura 06 - Resistências características dos concretos utilizados.



Fonte: Couto et al., 2019.

### Material do aço

Para modelagem da armadura de reforço do pilar padrão, utilizou-se aço CA 50 em todo segmento da peça, e posteriormente realizou-se o embutimento da armadura no pilar de concreto.

### Não linearidade geométrica no ABAQUS (2025)

Dentro da ferramenta, a modelagem de não linearidade geométrica é calculada automaticamente, e sempre que ocorrer uma deformação, serão gerados novos esforços. Quando isso acontece, o comportamento da deformação perde sua linearidade e os deslocamentos no elemento finito provocam novos esforços na peça, chamados de efeitos de segunda ordem.

## Não linearidade física no ABAQUS (2025)

A modelagem não linear de qualquer material no Abaqus (2025) depende de uma combinação de parâmetros elásticos, plásticos e de dano, seja por deslocamento ou energia. Por meio da seleção dos modelos de simulação validados por Souto Filho (2002) tornou-se possível simular o comportamento esperado do material sob condições de carga específicas e compará-lo ao modelo experimental. Foram utilizados os parâmetros de não linearidade física do aço, conforme os valores especificados na tabela 01:

Tabela 1 - Parâmetros de não linearidade física do AÇO.

Aço			
Elastic		Plastic	
E (MPa)	$\nu$	$\sigma_y$	$\epsilon_p$
210000	0.3	501.19	0.0000
		505.00	0.0075

Fonte: Guo, 2014.

Para os parâmetros de não linearidade física do concreto, conforme demonstrado por Souto Filho (2002) foi utilizado o modelo *Concrete Damage Plasticity* (CDP) que descreve o comportamento plástico na compressão e tração, denominados *Compressive Behavior* e *Tensile Behavior*, respectivamente. Na tabela 2, estão as configurações iniciais para o modelo de dano plástico do concreto, que foram utilizadas na configuração do material dentro do Abaqus.

Tabela 2 - Parâmetros de não linearidade física do Concreto.

Concrete Damage Plasticity							
$f_{ck}$	E	Poisson	Dilation Angle	Eccentricity	fb0/fc0	K	Viscosity
25	28000	0.2	36	0.1	1.16	0.667	1

Fonte: Souto Filho, 2015.

Ademais, o comportamento compressivo do concreto, segundo Souto Filho (2002), é caracterizado pela evolução da tensão ( $\sigma_v$ ) e da deformação inelástica ( $\epsilon_{incl}$ ) à medida que o concreto sofre com fissuração. Assim, tabela 3 resume os parâmetros que descrevem o comportamento compressivo do concreto, fornecendo informações sobre a tensão e a deformação inelástica:

Tabela 3 - Comportamento compressivo do concreto.

<i>Compressive-Behavior</i>			
$\sigma_c$	$\varepsilon_{inel}$	Dc	$\varepsilon_{inel}$
19,95	0		
25,05	0,0008	0	0
17,92	0,003	0,2834	0,003
12,16	0,0052	0,5138	0,0052
8,99	0,0072	0,6406	0,0072
7,08	0,0093	0,7169	0,0093
5,83	0,0112	0,767	0,0112

Fonte: Souto Filho, 2015.

Do mesmo modo, o comportamento de tração do concreto, conforme descrito por Souto Filho (2002) , é caracterizado pela relação entre a tensão e a deformação inelástica sob esforços de tração. A tabela 4 descreve a evolução do comportamento de tração do concreto, onde a tensão diminui à medida que a deformação inelástica aumenta, refletindo o processo de microfissuração e o início do dano no concreto.

Tabela 4 - Comportamento de tração do concreto.

<i>Tensile-Behavior</i>			
$\sigma_t$	$\varepsilon_{inel}$	Dc	$\varepsilon_{inel}$
2,50	0	0	0
1,05	0,0003	0,5839	0,0003
0,62	0,0004	0,7525	0,0004
0,45	0,0005	0,8196	0,0005
0,36	0,0006	0,8556	0,0006
0,30	0,0008	0,8783	0,0008

Fonte: Souto Filho, 2015.

Os índices apresentados foram obtidos a partir de Souto Filho (2002) , sendo utilizados para calcular o dano em virtude da deformação por tensão. Esses índices são fundamentais para a construção da curva plástica do material, assegurando o cumprimento do critério de não linearidade física.

### Superfície de contato no ABAQUS (2025)

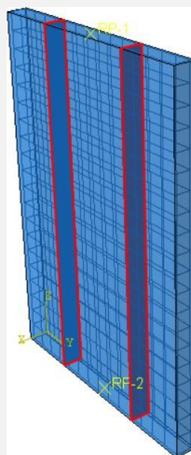
No Abaqus (2025), o termo "superfície de contato" refere-se à interação entre duas ou mais superfícies de corpos ou componentes que podem colidir ou se mover umas em relação às outras, como no caso de peças que se encaixam ou sofrem fricção.

Pode-se considerar duas situações principais: a primeira ocorre quando as superfícies entram em contato e transferem carga axial, caracterizando um comportamento normal à peça. A segunda situação envolve o escorregamento entre as superfícies, ou seja, um comportamento de cisalhamento, no qual as superfícies deslizam uma sobre a outra.

No comportamento normal à peça, foi utilizado o "*hard contact*" (contato duro), um modelo de interação de contato empregado para representar situações em que as superfícies de dois corpos em contato não podem penetrar uma na outra. Ou seja, se as superfícies tentarem se penetrar (devido a forças externas ou deformações), uma força de repulsão é gerada para evitar essa penetração, com base na rigidez de contato.

No comportamento que envolve o cisalhamento, o "*contact tangency*" (tangência ao contato) refere-se ao deslizamento tangencial entre as superfícies de contato. Ou seja, trata-se da forma como as superfícies podem se mover uma sobre a outra sem penetrar, mas com a possibilidade de escorregar ou deslizar em relação ao ponto de contato. A tangência está associada ao comportamento de fricção, que é a força que resiste ao movimento relativo entre duas superfícies em contato, ocorrendo devido às irregularidades nas superfícies. Esses fenômenos estão intrinsecamente interligados, e o coeficiente de atrito do concreto determina a intensidade da fricção entre o concreto e outro material. Segundo Leonhardt e Mönning (1977), os valores para o coeficiente de atrito variam entre 0,3 e 0,6, conforme obtido em suas pesquisas.

Figura 7 - Superfícies de contato dentro do software Abaqus (2025).



Fonte: Próprio autor, 2024.

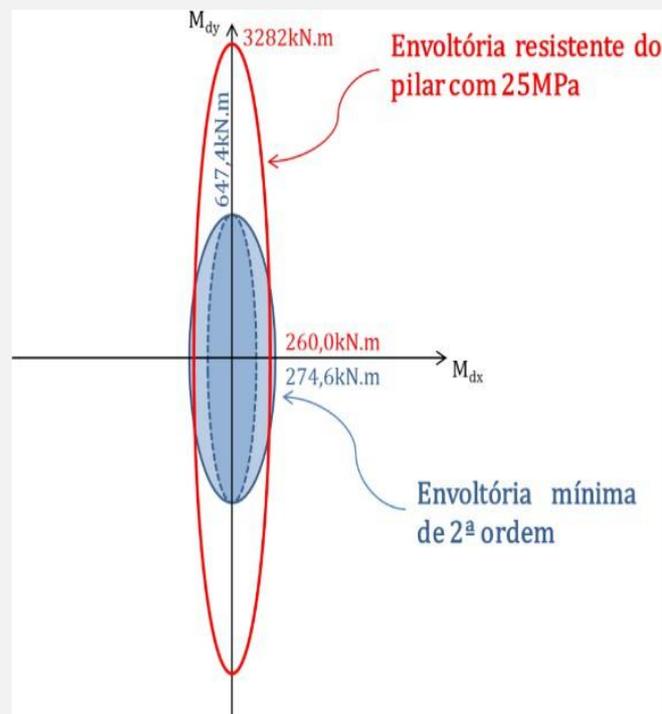
## Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados da convergência de malha, da análise do comportamento do pilar usando um  $f_{ck}$  25 MPa. Também, é feita a análise do pilar usando o  $f_{ck}$  de 35 MPa, posteriormente usando critérios da norma brasileira ABNT NBR 6118:2023 quanto a resistência admissível.

### Análise da resistência do pilar

De acordo com Couto et al. (2019), considerando que o concreto extraído possui  $f_{ck}$  de 25 MPa, o pilar não resiste aos esforços solicitantes provocados pelo momento de 2º ordem. Conforme demonstrado na figura 08, a parcela  $M_{d,x}$  da envoltória resistente do pilar com 25 MPa é ligeiramente inferior ao esforço solicitante de cálculo ( $M_{s, x}$ ), e portanto, Couto et al. (2019) optou por realizar um reforço por meio da substituição parcial de concreto no pilar.

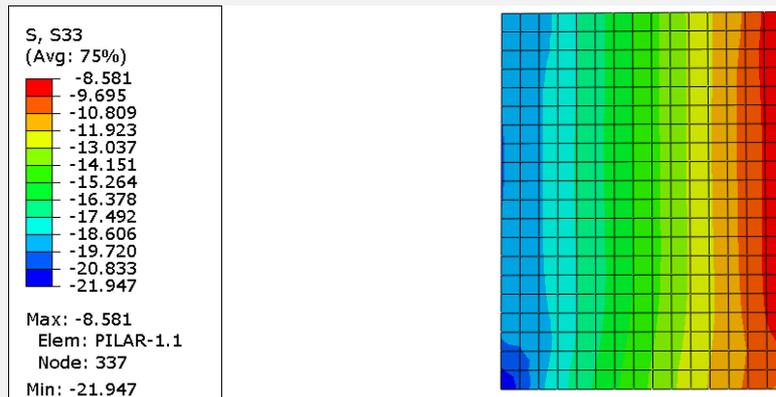
Figura 8 - Análise de resistência do pilar modelo.



Fonte: Couto et al., 2019.

No entanto, os resultados obtidos por meio da simulação realizada mostraram que se considerar a capacidade última de resistência do concreto, o pilar não iria romper devido aos esforços de 2º ordem, conforme apresentado na Figura 09.

Figura 9 - Resultados da simulação dos esforços (MPa).



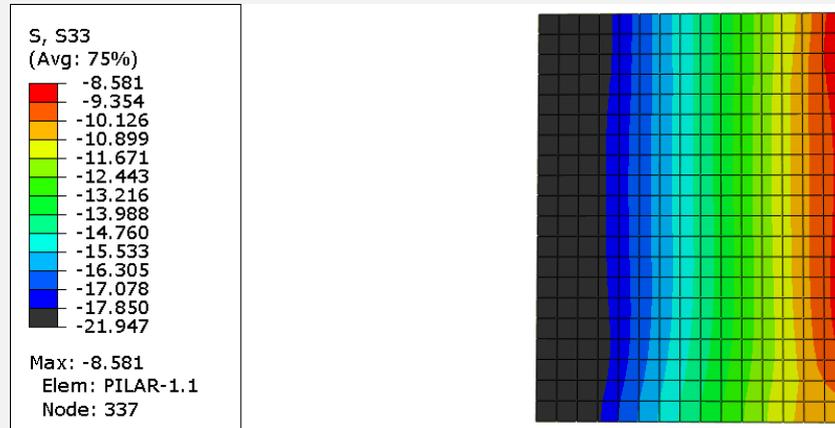
Fonte: Próprio autor, 2024.

Ainda assim, a envoltória resistente do pilar obtida por Couto et al. (2019), leva em consideração fatores de minoração da resistência característica do concreto, e portanto, também podemos realizar uma análise do pilar considerando o critério de resistência admissível de cálculo para determinar a resistência limite conforme equação 2:

$$Eq. 2 \quad f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4} = \frac{25}{1,4} = 17,85MPa$$

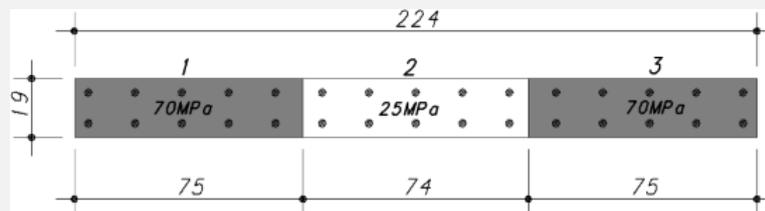
Levando em consideração os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2023 quanto à resistência admissível do concreto, o pilar de fato não suportaria os esforços solicitantes e precisaria ter reforço nas duas abas do pilar. O Abaqus (2025) mostra que seria necessário uma intervenção nas quatro malhas esquerdas, marcadas em preto, cada malha possui 15 cm, conforme Figura 10. Isto é, seria necessário a substituição de 60 cm de concreto nos lados esquerdo e direito da peça. Couto et al. (2019) propuseram que a substituição fosse feita com 75 cm, valor semelhante ao apresentado pelo software, conforme Figuras 11 e 12.

Figura 10 - Resultados levando em consideração critérios de norma (MPa).



Fonte: Próprio autor, 2024.

Figura 11 - Substituição proposta apresentada por Couto et al. (2019).



Fonte: Couto et al., 2019.

Figura 12 - Pilar com reforço proposto por Couto et al. (2019).

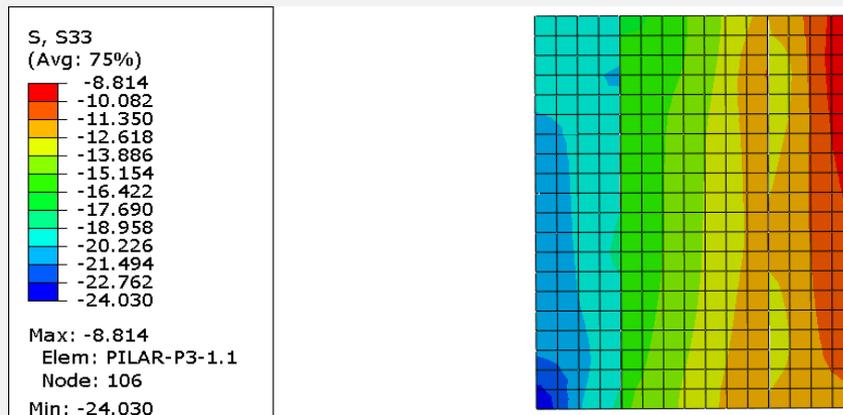


Fonte: Couto et al. (2019).

## Análise do reforço estrutural

Com base na proposta de reforço apresentada por Couto et al. (2019), realiza-se uma simulação para analisar a resposta do pilar sob o esforço aplicado. Contudo, ao contrário de Couto et al. (2019), optou-se por substituir uma parte da seção do pilar por concreto de resistência mais baixa. Essa escolha foi motivada pela complexidade associada ao uso de concretos de alta resistência, especialmente no que diz respeito à obtenção dos parâmetros necessários para uma interpretação adequada dos resultados no software Abaqus (2025). A figura 13 demonstra com clareza o resultado da simulação computacional utilizando os critérios listados anteriormente.

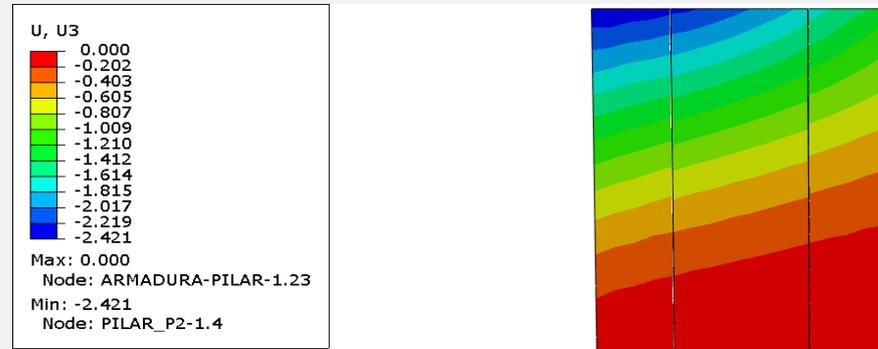
Figura 13 - Resultado da simulação dos esforços no pilar reforçado.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Observou-se que na situação sem reforço, figura 12 acima, a tensão máxima de compressão foi de 21,947 MPa e na situação após o reforço, a tensão máxima passou a ser 24,03 MPa. Assim, houve um acréscimo de 9,49% na tensão de compressão no pilar após o reforço estrutural. Esse acréscimo é atribuído aos efeitos de deformação na nova peça composta por três partes, conforme ilustrado na figura 14. Além disso, a análise da deformação do pilar revela um deslizamento nas seções longitudinais entre as três partes do sistema.

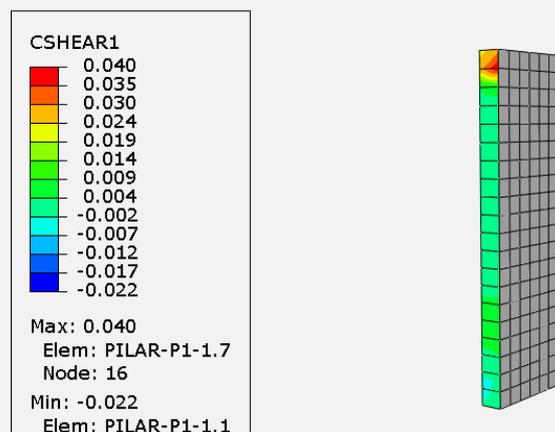
Figura 14 - Gráfico da deformação em Z (milímetros).



Fonte: Próprio autor, 2024.

Como resultado desse deslizamento na seção longitudinal, o experimento computacional apresentou também a formação de tensões de cisalhamento na seção, conforme demonstrado na figura 15.

Figura 15 - Tensão de cisalhamento na seção longitudinal (MPa).



Fonte: Próprio autor, 2024.

Caso a tensão de cisalhamento ultrapasse a resistência do sistema, o pilar pode se tornar instável, e as partes do sistema podem se descolar, resultando em efeitos de instabilidade lateral e fissuração no pilar. Nesse cenário, o sistema deixaria de funcionar como um componente integral, e, em casos críticos, poderia ocorrer o colapso total da estrutura. Esses resultados também demonstram que, ao realizar uma modelagem adequada no Abaqus (2025), com a aplicação de critérios de não linearidade física e geométrica, é possível obter informações precisas sobre o comportamento da peça em

análise.

No entanto, neste trabalho não foram analisadas a influência do estribo como elemento resistente ao cisalhamento tangencial. Provavelmente, ao se levar em conta a influência dos estribos na interface entre os dois concretos, a situação de reparo usando concreto normal, ao invés do graute, poderia ser suficiente para o caso deste pilar. Assim, trabalhos futuros podem analisar a devida influência dos estribos.

Contudo, para os casos analisados neste trabalho conclui-se que o método de reforço estrutural proposto por Couto et al. (2019) é válido como método de reparo. Porém, é necessário uma atenção especial quanto à ligação das superfícies em contato com o reforço aplicado. Por isso, a utilização do concreto de alta resistência é uma boa solução, já que, o mesmo tende a proporcionar um coeficiente de atrito maior na superfície de contato, o que torna a ligação mais segura.

## Conclusões

Este trabalho teve como objetivo realizar uma análise estrutural da capacidade de carga de um pilar, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), para avaliar o impacto da substituição parcial do concreto *in loco* por concreto com  $f_{ck} = 35$  MPa. Através da modelagem no software Abaqus (2025), foi possível verificar o comportamento do pilar tanto no estado íntegro quanto reparado, considerando as variáveis de resistência do concreto e as normas de segurança aplicáveis.

Os resultados obtidos indicam que a análise por elementos finitos se revelou uma ferramenta eficiente para a avaliação das tensões ao longo do pilar, especialmente no contexto de reparos estruturais. A resistência do concreto, que foi de  $f_{ck} = 25$  MPa, embora inferior à especificada no projeto inicial ( $f_{ck} = 35$  MPa), demonstrou ser suficiente para atender à resistência estrutural exigida, segundo as condições de segurança previstas pela NBR 6118:2023 (Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento), que estabelece as normas de dimensionamento e segurança para estruturas de concreto. No entanto, o estudo também evidenciou que o pilar necessitava de reparo para garantir a conformidade com os critérios de segurança, o que foi comprovado pela análise estrutural. A verificação das condições de segurança foi realizada com base nos coeficientes de segurança previstos

pela norma, principalmente no que tange ao uso de materiais com resistência inferior à projetada.

A comparação entre o pilar íntegro e o reparado mostrou que a intervenção, com a substituição parcial do concreto, foi uma medida adequada para restaurar a integridade estrutural. No entanto, a análise da interface entre o concreto antigo e o novo revelou o surgimento de deslizamentos longitudinais, o que sugere a necessidade de uma investigação mais aprofundada sobre a influência de diferentes tipos de estribos e o comportamento da interface entre os materiais. Para essa análise, a NBR 6118:2023 também orienta a necessidade de considerar a interação entre os materiais, com especial atenção aos aspectos de aderência e ancoragem.

Dessa forma, o trabalho contribui para o entendimento sobre a efetividade do reparo parcial de pilares em concreto e destaca a importância de análises mais detalhadas para garantir a eficácia das intervenções. Fica sugerida a continuidade do estudo com foco em otimizar o uso de estribos e melhorar o entendimento sobre a interação entre os diferentes concretos em cenários de reparo estrutural, seguindo as orientações das normas aplicáveis, como a NBR 6118:2023 e a NBR 15481:2023.

### **Agradecimentos**

Agradecemos a Deus pela saúde, sabedoria e força ao longo desta jornada. A nossas famílias, especialmente pais e avós, pelo apoio incondicional. Às nossas mulheres, pelo carinho e incentivo essenciais para chegarmos até aqui. Ao nosso orientador, Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales, pela orientação e dedicação durante todo o processo. Aos professores do Instituto Federal Goiano – Campus Trindade, pela contribuição significativa em nossa formação. Aos colegas e amigos de graduação, pela amizade e troca de experiências. E a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, nosso sincero agradecimento.

### **Referências**

ARAÚJO, Gabriel; CUNHA, Karen Suzy de Moraes. Estudo comparativo entre o

ganho de resistência à compressão de um pilar reforçado pelo sistema convencional e por fibras de carbono. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118:2023 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15481:2023 – Reparação e reforço de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

AZEVEDO, Álvaro F. M. Método dos elementos finitos. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, v. 1, n. 7, 2003.

CAMPOS, Luiz Eduardo Teixeira et al. Técnicas de recuperação e reforço estrutural com estruturas de aço. 2006.

CÁNOVAS, Manuel Fernández. Hormigones reforzados con fibras de acero. Informes de la Construcción, v. 34, n. 342, p. 5–17, 1982.

COUTO, D.; AVILA, J. A.; BRITEZ, C.; HELENE, P. Reforço de pilares parede por substituição de concreto. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE PATOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN, 15.; CONGRESSO DE CONTROL DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN, 17., 2019.

DA MOTA, Elvys Jane Fonseca; PINHEIRO, Érika Cristina Nogueira Marques. Recuperação de estrutura de concreto armado: pilares – estudo de caso. Brazilian Journal of Development, v. 8, n. 5, p. 38162–38179, 2022.

DA SILVA, Elder Nogueira; DE SOUZA, Alex Sander Clemente. Simulação numérica do comportamento de vigas mistas de aço e concreto protendidas [Numerical behavior analysis of prestressed steel-concrete composite beams]. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 15, n. 1, 2019.

DASSAULT SYSTÈMES. Abaqus. [S. l.]: Dassault Systèmes, 2023. Disponível em: <https://www.3ds.com/products/abaqus/>. Acesso em: 15 fev. 2024.

FARIA, Diogo Antonio Castro de; OLIVEIRA, Thiago Henrique Melo. Estudo do ganho de resistência em pilares com reforço estrutural em placa metálica, tela metálica e aumento de seção. 2020.

JÚNIOR, Joaquim Júlio Almeida et al. Patologia em concreto armado e seus métodos

de recuperação estrutural. Revista Científica Novas Configurações – Diálogos Plurais, v. 2, n. 1, p. 43–58, 2021.

LUIS, Sandro. Tratamento em broca de pilar e viga de concreto. 2023.

MARQUES, Eduardo Alcino de Farias; ARAÚJO, Tereza Denyse Pereira de. Modelagem numérica do comportamento de pilares de concreto armado reforçados com PRFC usando o modelo constitutivo concrete damaged plasticity. 2016.

MOURA, Michael Martins de. Reforço estrutural em estruturas de concreto armado. 2013.

ROCHA, Paulo Anderson Santana. Resistência da ligação aço-concreto em pilares mistos parcialmente revestidos sob altas temperaturas. 2011. Tese (Doutorado) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

SIMULIA. Abaqus/CAE User's Manual, versão 6.14. Providence, 2016. Disponível em: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/portfolio/abaqus/>. Acesso em: 7 nov. 2024.

SOUTO FILHO, Marcello Varella. Modelagem numérica de reforço estrutural em vigas de concreto armado. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002.

TAKEUTI, Adilson Roberto. Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho. São Carlos, v. 25, 1999.

TANQUE, Ricardo Resende. Manifestações e sintomas patológicos em estruturas de concreto armado na construção civil. 2023.