



## ESTUDO DO EFEITO DO CONFINAMENTO SOBRE A DUCTILIDADE PILARES DE CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

RENATA REIS DE JESUS<sup>1</sup>, AMÉRICO CAMPOS FILHO<sup>2</sup>, PAULA MANICA LAZZARI<sup>3</sup>  
BRUNA MANICA LAZZARI<sup>4</sup>

<sup>1</sup> UFRGS / PPGEC/ [renata.reis1293@hotmail.com](mailto:renata.reis1293@hotmail.com)

<sup>2</sup> UFRGS / PPGEC/ [americo.campos.filho@gmail.com](mailto:americo.campos.filho@gmail.com)

<sup>3</sup> UFRGS / PPGEC/ [p.manica.lazzari@gmail.com](mailto:p.manica.lazzari@gmail.com)

<sup>4</sup> UFRGS / PPGEC/ [bruna.ml@gmail.com](mailto:bruna.ml@gmail.com)

### Resumo

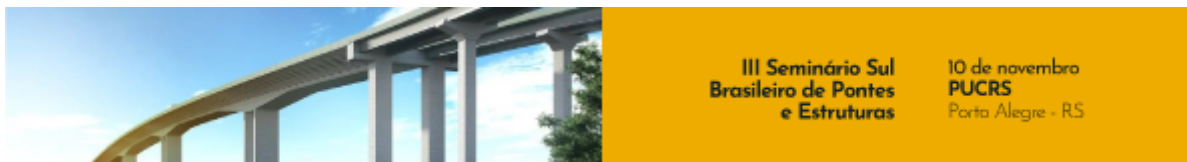
Cada vez mais estudos que avaliam a ductilidade dos elementos que compõem uma estrutura de concreto armado, vêm sendo desenvolvidos por profissionais da área de projetos e estudantes do meio acadêmico. Esta característica analisa o intervalo que um material, seção, elemento ou sistema estrutural é capaz de deformar-se de forma inelástica, antes de atingir sua ruptura, sem perder substancialmente sua resistência. Para concretos que compõem a classe II de resistência, também conhecidos como concretos de alta resistência (CAR), este parâmetro deve ser avaliado de forma mais minuciosa, uma vez que, pesquisas na área mostram que a baixa capacidade dúctil deste grupo, é uma de suas características mais relevantes, merecendo destaque e estudos mais aprofundados, no momento da elaboração do projeto. A fim de amenizar tal fenômeno, no que se refere a pilares, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), em seu item 18.4.3 recomenda que, com vistas a garantir a ductilidade dos pilares, o espaçamento máximo entre os estribos seja reduzido em 50 % para concretos de classe C55 a C90, com inclinação dos ganchos de pelo menos 135 °. A nota supracitada, fundamenta-se no princípio de aumento da capacidade de absorção de esforços dos pilares, através do confinamento da seção transversal. Altas taxas de armaduras transversais geram um confinamento passivo capaz de controlar o processo de fissuração e a expansão lateral do concreto e por conseguinte obter um aumento da ductilidade desses elementos estruturais. Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho será analisar comparativamente e evidenciar os progressos da obtenção de um melhor resultado para ductilidade de pilares de concreto armado, quando confinados por armaduras transversais (estribos), através da simulação destes elementos, no *software* ANSYS. Serão considerados diferentes valores de espaçamentos de estribos e resistências que compõem os concretos de classe II, visando, como objetivos específicos, avaliar a capacidade resistente, a deformação última e o comportamento tensão-deformação dos modelos confinados.

### Palavras-chave

ductilidade; confinamento; concreto; pilares

### Introdução

Os sistemas estruturais de concreto são amplamente utilizados no Brasil devido às vantagens oferecidas pelo concreto, como facilidade de moldagem, resistência ao fogo, resistência às influências atmosféricas e custo acessível. O concreto armado desempenha um papel fundamental na construção de uma ampla gama de estruturas, desde edifícios de múltiplos pavimentos até pontes, viadutos, reservatórios, barragens e muito mais (Bastos, 2016). No entanto, o comportamento dos sistemas



estruturais de concreto é complexo e não linear, influenciado por vários fatores, incluindo a interação entre o concreto e o aço de reforço. Isso torna essencial o estudo aprofundado dessas estruturas, especialmente no que diz respeito à análise de pilares.

Com o crescimento da construção civil no Brasil nas últimas décadas, observa-se uma demanda crescente por estruturas de maior complexidade arquitetônica e maior resistência. Nesse contexto, o concreto de alta resistência tem sido cada vez mais utilizado devido à sua elevada resistência à compressão. No entanto, esses concretos apresentam um comportamento frágil em tração e compressão, o que pode comprometer a segurança das estruturas, especialmente em pilares (Brusco, 2014).

Os pilares desempenham um papel fundamental em estruturas de concreto armado, pois recebem as cargas das lajes e vigas e as transmitem às fundações. No entanto, em pilares de concreto de alta resistência, a ductilidade é reduzida, e a ruptura é caracterizada por pequenos deslocamentos. Isso compromete a capacidade de redistribuição de esforços e pode levar ao colapso de uma edificação em caso de ruptura de um pilar (Viapiana, 2016).

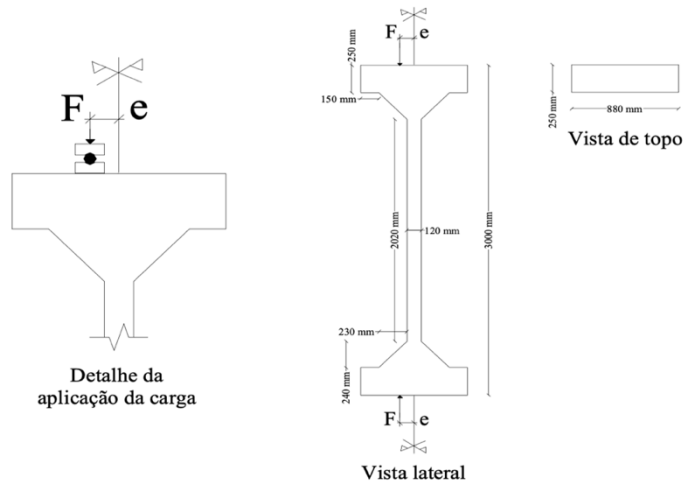
Para resolver esse problema, pesquisas indicam que o método mais eficaz para melhorar a capacidade de absorção de energia dessas estruturas é o confinamento do concreto (Viapiana, 2016). Além disso, a Norma Brasileira NBR 6118 recomenda a redução dos espaçamentos máximos entre estribos em pilares de concreto de alta resistência para melhorar sua ductilidade (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo desenvolver um modelo de elementos finitos para analisar o confinamento do concreto e aumentar a ductilidade de pilares em concreto de alta resistência. Serão considerados diferentes valores de espaçamentos de estribos e resistências do concreto para avaliar sua influência na capacidade resistente e no máximo deslocamento dos modelos confinados.

## **Procedimentos metodológicos**

### *Comprovação do Modelo Numérico e Aplicações*

Nesta seção, são apresentados exemplos de aplicações do modelo proposto na análise não linear de pilares de concreto armado sob flexo-compressão, usando o Método dos Elementos Finitos. Foram comparados os resultados numéricos com resultados experimentais de pilares ensaiados por Dantas (2006). No estudo, o autor apresenta uma análise de seis pilares esbeltos de concreto armado submetidos à flexo-compressão normal, que foram ensaiados sob carregamento axial com diferentes excentricidades. A geometria dos pilares (comprimento total de 3000 mm, extremidades com consolos simétricos e região central com 2020 mm de comprimento e seção transversal constante com 250 mm de base e 120 mm de altura), conforme figura 1.



**Figura 1 – Dimensões geométricas do pilar**

A tabela 1 traz a descrição dos parâmetros dos pilares em estudo.

**Tabela 1 – Características básicas dos pilares ensaiados**

Esforço	Pilares	e (mm)	L (mm) *	$A_c$ (mm <sup>2</sup> )	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	$\rho$ (%)
FLEXÃO COMPOSTA RETA	PFN0-3	0	2020	30000	471	1,57
	PFN15-3	15				
	PFN30-3	30				
	PFN40-3	40				
	PFN50-3	50				
	PFN60-3	60				

\* Comprimento do trecho central, de seção constante. L = 3150 mm entre rótulas.



Já as informações a respeito do detalhamento da armadura utilizada podem ser conferidas na figura 2

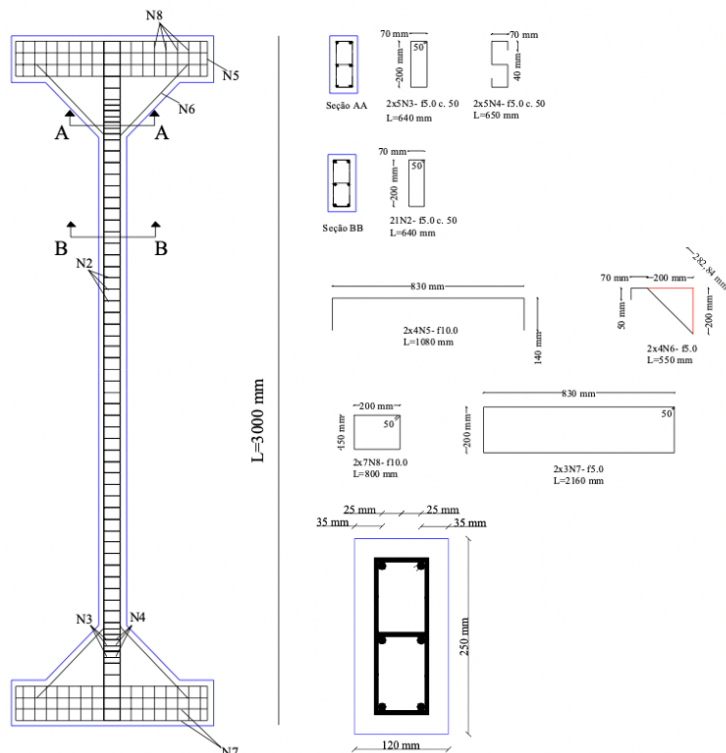


Figura 2 - Detalhamento armadura pilar Dantas (2006)

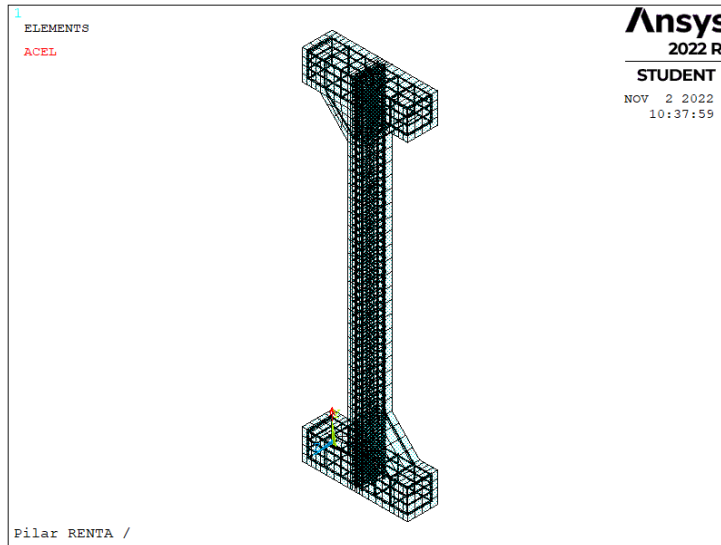
As informações a respeito do concreto foram aferidas, no intervalo entre dois ensaios, as propriedades mecânicas do concreto utilizado nos modelos por meio de corpos-de-prova cilíndricos, com dimensões de 150 mm x 300 mm, ensaiados à compressão simples (NBR 5739:1980) e à tração por compressão diametral (NBR 7222:1983). Obtiveram-se a resistência à compressão do concreto,  $f_c$ ; o módulo de deformação longitudinal,  $E_c$ , calculado pela NBR 8522:2003, e a resistência à tração do concreto por compressão diametral,  $f_{tc}$ . A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas do concreto.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do concreto

Pilar	IDADE (dias)	$f_c$ (MPa)	$f_c$ (MPa) (médio)	$f_{tc}$ (MPa)	$f_{tc}$ (MPa) (médio)	$E_c$ (GPa)	$E_c$ (GPa) (médio)
PFN0-3 e PFN15-3	60	35,8	36	2,9	3	21,7	29
		36,6		2,7		30,0	
		35,0		2,7		34,4	
PFN30-3 e PFN40-3	81	34,3	34	3,1	3	34,6	32
		34,4		3,2		32,6	
		33,1		3,5		27,4	
PFN50-3 e PFN60-3	85	38,3	38	3,0	3	30,4	31
		37,9		3,2		32,4	
		36,6		3,1		30,4	

### Adaptação do Modelo de Validação para Análise Numérica

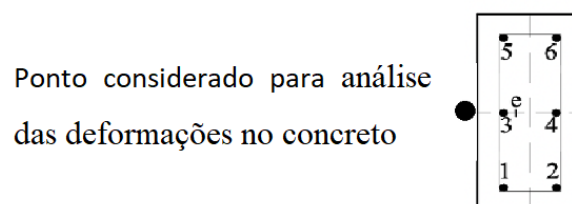
De acordo com os princípios da modelagem de estruturas usando o Método dos Elementos Finitos (MEF) com o software Ansys, deu-se início à criação do modelo de validação. Para esta modelagem, o pilar foi discretizado em 17 elementos, e o modelo está representado na figura 3.



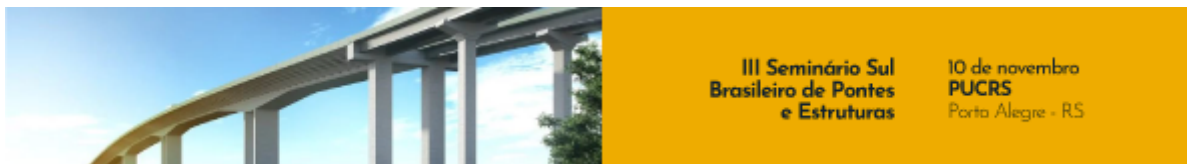
**Figura 3 – Pilar de Dantas modelado no Ansys**

### Apresentação dos Resultados

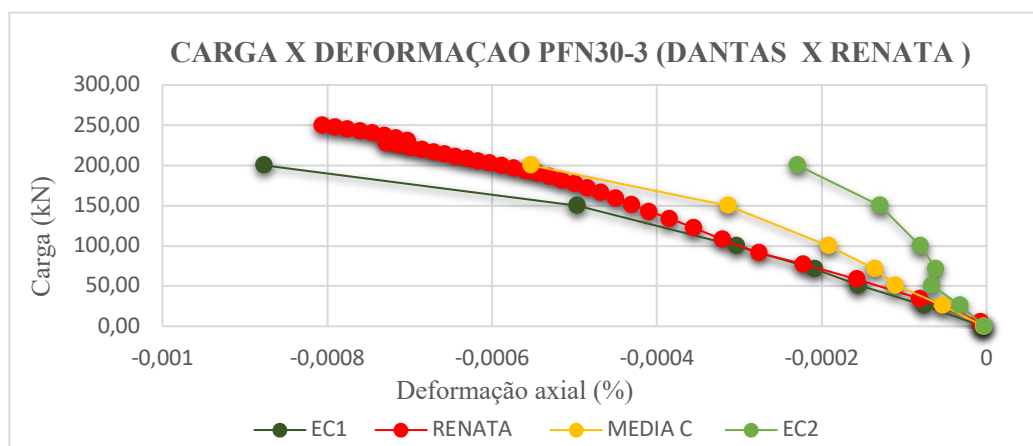
Este capítulo apresentará resultados das deformações e deslocamentos dos pilares modelados numericamente em comparação com os resultados experimentais de Dantas (2006). Para a análise das deformações no concreto, Dantas (2006) conduziu uma análise das deformações, focando nos extensômetros EC1 e EC2 localizados na face comprimida do pilar figura 4. Os valores medidos nos extensômetros foram comparados com os valores teóricos calculados com o programa ANSYS que foram extraídos do lado comprimido do pilar como no estudo de Dantas (2006), posicionado na extremidade perpendicular à direção da variação da excentricidade do pilar conforme mostra figura 4.



**Figura 4 – Deformações consideradas neste estudo**

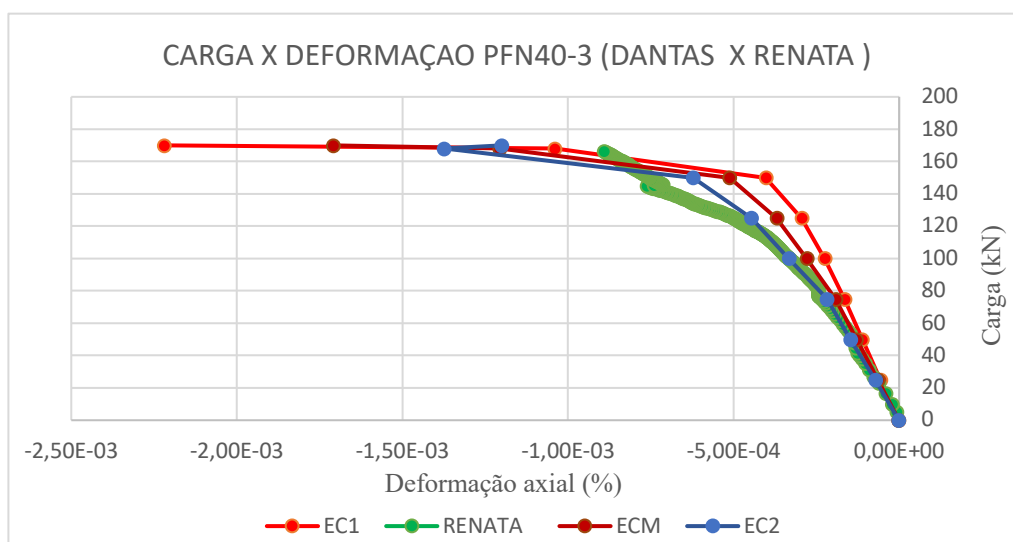


Pilar PFN30-3: Na Figura 5, que representa o pilar PFN30-3, é possível verificar-se que a curva dos resultados teóricos apresentou maiores valores de deformações comparados com os de ensaio, entre os passos de carga de 200,0 kN e 250,0 kN. A curva que mais se aproximou ao resultado teórico, foi a da posição EC1.



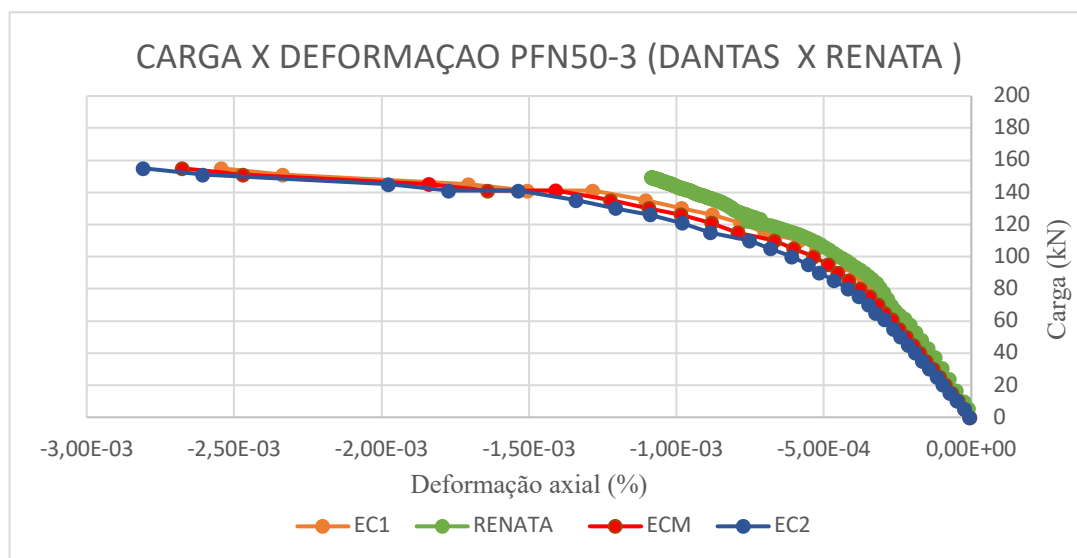
**Figura 5 - Gráfico comparativo Carga x Deformação pilar PFN30-3**

No gráfico da Figura 6, pilar PFN40-3, percebe-se que até a carga de 160,0 kN as curvas das deformações apresentaram-se próximas, sendo os valores teóricos pouco menores que os experimentais. A partir daí, os valores experimentais cresceram rapidamente até a ruptura com a carga de 170 kN, com deformação de -1,7 %.



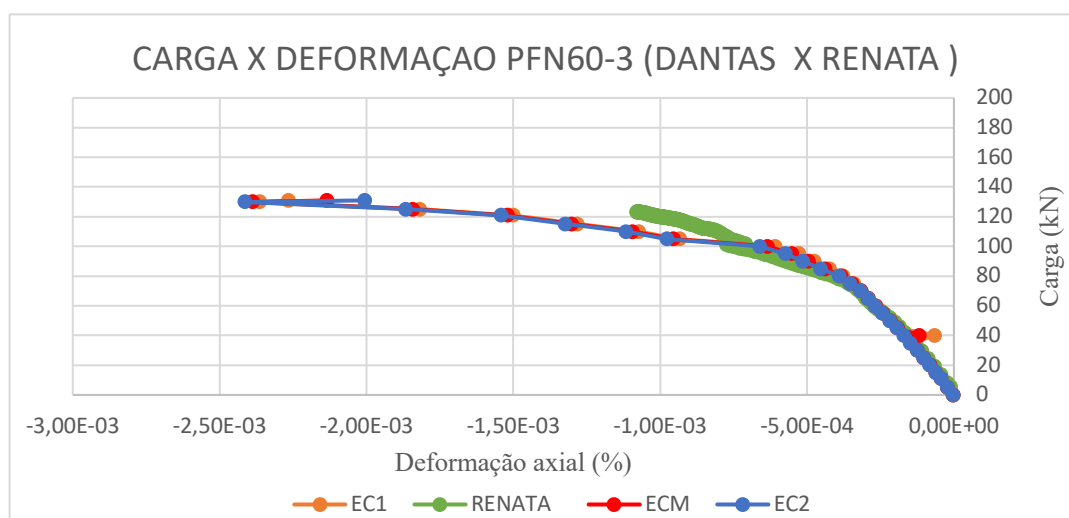
**Figura 6- Gráfico comparativo Carga x Deformação pilar PFN40-3**

A Figura 7, mostra que as curvas seguem a mesma tendência com valores de deformações muito próximos. Contudo, os resultados das curvas experimentais indicam deformação, até o valor de -2,7 % para uma carga de 155 kN, enquanto os resultados teóricos se encerram-se a uma deformação igual a -1,08%.



**Figura 7- Gráfico comparativo Carga x Deformação pilar PFN50-3**

No pilar PFN60-3, apresentado na Figura 8, verifica-se que pouco depois do surgimento da primeira fissura há um afastamento das curvas experimentais e teóricas para o intervalo de cargas de 100 kN a 120 kN. Da mesma forma que no comparativo anterior os resultados experimentais, o pilar continua se deformando até o valor de -1,3 %, enquanto que a teórica foi até -1,08 %.



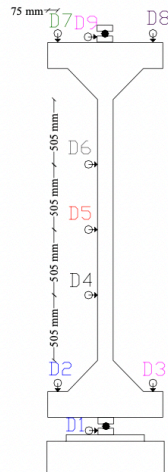
**Figura 8- Gráfico comparativo Carga x Deformação pilar PFN60-3**

### Deslocamentos Transversais

No seu estudo, Dantas utiliza um Deflectômetros Huggenberger Zurich, com precisão de 0,01 mm e curso de 50 mm foram para a leitura dos deslocamentos verticais e horizontais. A posição empregada no seu estudo pode ser verificada na figura 9.



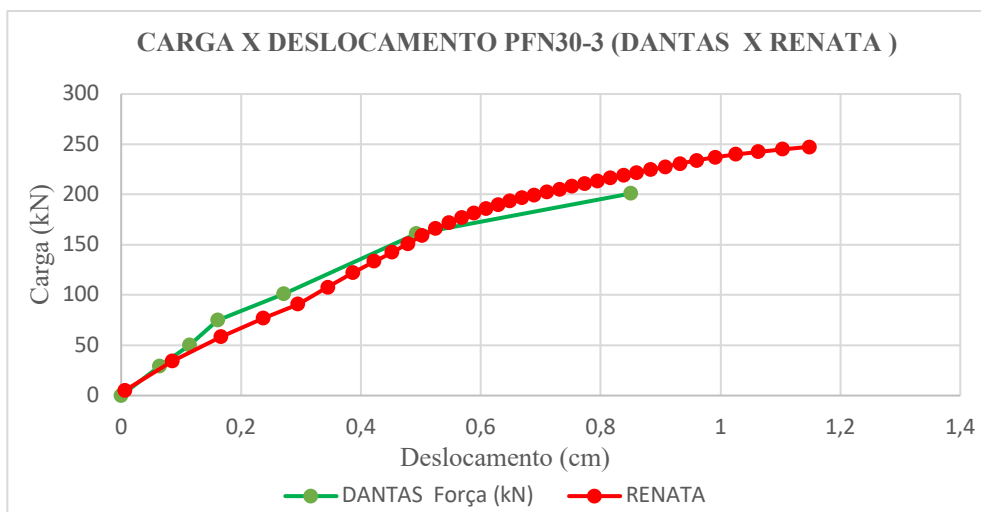
Para uma leitura complementar dos deslocamentos até o momento da ruptura, devido ao curso limitado do defletômetro central, foi utilizada uma régua de medição de aço inoxidável. Para a elaboração deste comparativo utilizou-se apenas com os resultados do deflectômetro D5, posicionado a meia altura do pilar.



**Figura 9 - Posição dos deflectômetros nos modelos ensaiados**

(fonte: DANTAS, 2006)

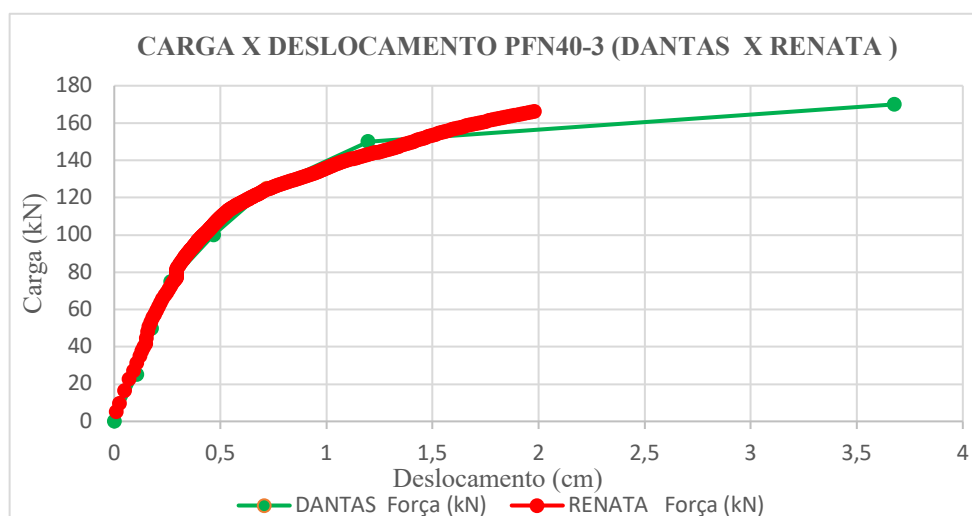
O pilar PFN30-3, apresentado na Figura 10, como se pode observar, apresenta uma evolução dos valores experimentais lidos pelo refletômetro D5, muito próximo aos valores teóricos.



**Figura 10 - Gráfico comparativo Carga x Deslocamento pilar PFN30-3**

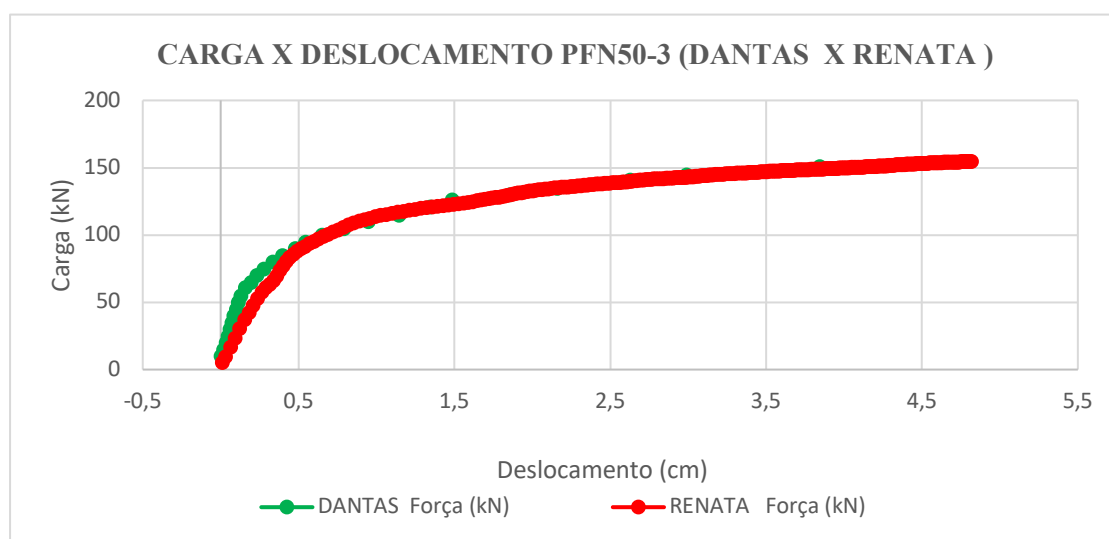
Cujo gráfico está representado na Figura 11. Os valores de flechas teóricas na seção para ambas as análises se mostraram muito próximos, A curva dos resultados experimentais ficou praticamente sobreposta aos resultados obtidos no ANSYS.





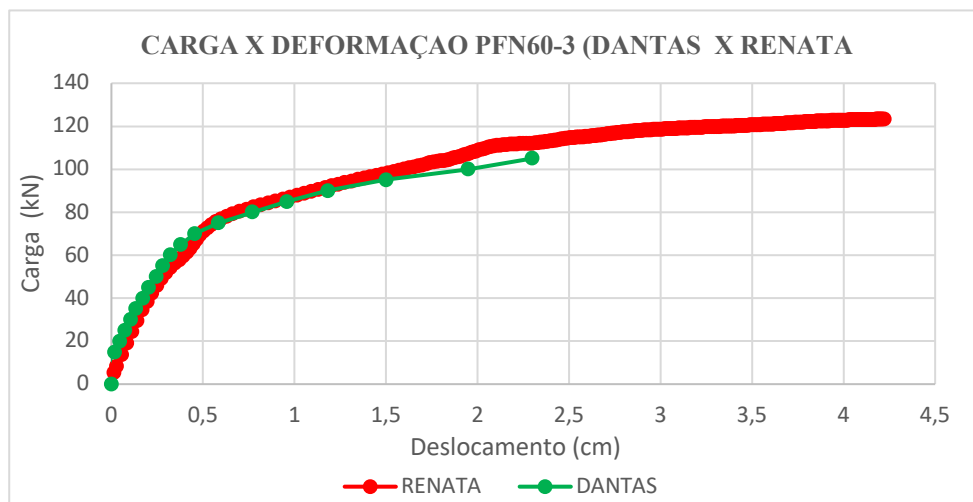
**Figura 11 - Gráfico comparativo Carga x Deslocamento pilar PFN40-3**

No pilar PFN50-3, apresentado na Figura 12, a curva dos resultados experimentais, até a carga de 100 kN, ficou um pouco acima dos resultados teóricos. A partir deste trecho as cargas e deformações encontram-se e formam um intervalo de pontos praticamente coincidentes. Figura 13 - Gráfico comparativo Carga x Deslocamento pilar PFN50-3.



**Figura 12 - Gráfico comparativo Carga x Deslocamento pilar PFN40-3**

No pilar PFN60-3, da Figura 13, as curvas dos resultados também ficaram bem próximas. Da mesma forma que no pilar PFN50-3, ocorreu um trecho entre os passos de carga 100kN e 150 kN que os resultados experimentais apresentaram cargas menores do que os valores considerados pelo *Ansys*.



**Figura 13 - Gráfico comparativo Carga x Deslocamento pilar PFN60-3**

## Conclusões

Neste estudo, foi desenvolvido com sucesso um modelo de elementos finitos para analisar o confinamento de pilares em concreto de alta resistência. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo desenvolvido apresentou resultados próximos aos encontrados experimentalmente. Este estudo contribui para o entendimento do comportamento desses elementos estruturais e fornece insights valiosos para o projeto de estruturas de concreto de alta resistência

## Referências

AGUIAR, Eduardo Aurélio Barros; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Projeto de pilares de concreto de alto desempenho**. São Carlos, 2000.

AHMAD, S. H. e SHAH, S. P. *Stress-strain curves of concrete confined by spiral reinforcement*. ACI Journal, v.79 n.6, 1982, pp.484-490.

ANSYS, Inc. **ANSYS Help System**, version 19.2, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BASTOS, P. (2016). **Estruturas de concreto armado**. [wwwp.feb.unesp.br/pbastos](http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos)>

DANTAS, Alexon Braga. **Estudo de pilares de concreto armado submetidos a flexão composta reta**. 2006. dissertação (Mestrado)– FACULDADE DE TECNOLOGIA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA , 2006.

SAS, I. **ANSYS Mechanical APDL Theory reference**. Release 19.1, 2019.