

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PPGECiv – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

**Tawan Mundim de Oliveira**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS  
COM CONCRETO RECICLADO SOB COMPRESSÃO AXIAL  
CENTRADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração *Estruturas e Geotecnia*.

**Orientadora:** Profa Dra. Silvana De Nardin

São Carlos - SP  
2023

*Às mulheres incríveis da minha vida,  
Gleiciane A. da Mota, Elenice M. O. Silva e Mirian C. Rodrigues*

## **AGRADECIMENTOS**

---

À minha querida mãe Gleiciane por todo apoio, dedicação e amor por eu ter trilhado toda essa caminhada e ter chegado aonde cheguei.

Aos meus padrinhos, Elenice e Daniel que me mostraram que sempre existe o caminho certo, às minhas avós Maria e Marta, aos tios Ramontiele e Janara.

À Mirian, amor e amiga, por estar do meu lado em todos os momentos, me mostrando que a vida é muito mais que obrigações e trabalho.

Aos meus companheiros e amigos de vida André, Daniel, Leonardo, Renato, Théo e Wilton, mostrando que a amizade é o caminho para toda conquista.

À minha Professora e orientadora Silvana por ter tornado tudo isso possível, por ter acreditado em mim e estar me apoiando desde o terceiro ano da graduação, com ensinamentos e aprendizados.

Aos Professores, responsáveis pelo meu desenvolvimento e conhecimento, e que foram meu apoio no aprendizado e inspiração na vida.

À UFSCar, por ter me apresentado toda jornada de evolução pessoal, juntamente com seus alunos, funcionários e todas as pessoas envolvidas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

*“Não basta termos um bom espírito, o mais importante é aplicá-lo bem.”*

## RESUMO

---

Parte dos resíduos gerados na construção civil, sobretudo aqueles de concreto, pode ser transformado e substituir os agregados naturais em novos concretos. Visando ampliar o uso de concretos com agregados reciclados em pilares mistos, o objetivo desse estudo foi avaliar o comportamento de pilares mistos preenchidos com concreto reciclado submetidos à compressão axial centrada. Para isto, foi utilizada a simulação numérica. Primeiramente foi elaborada uma revisão sistemática da literatura (RSL) sobre pilares mistos de seção circular preenchidos com concreto reciclado. Grande parte dos estudos disponíveis trazem resultados experimentais que mostram aumento da força normal resistente devido ao uso do concreto reciclado. Modelos numéricos foram desenvolvidos no software Abaqus® e uma análise de sensibilidade permitiu identificar a influência dos seguintes parâmetros: densidade de malha de elementos finitos, modelos constitutivos do concreto reciclado, parâmetros do modelo de dano, coeficiente de atrito aço-concreto, coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade do concreto reciclado. Dentre os parâmetros avaliados, o modelo constitutivo do concreto reciclado se mostrou mais relevante. Comparado a resultados experimentais, o modelo numérico se mostrou adequado para prever a força normal resistente, o comportamento força vs. deformação axial do pilar e as deformações no perfil de aço e no núcleo de concreto. Uma vez validado, o modelo numérico foi utilizado para avaliar a influência dos seguintes parâmetros: diâmetro do tubo de aço ( $D=114,3$  mm;  $219,1$  mm e  $323,8$  mm), relação altura/diâmetro ( $L/D=3$ ,  $4$  e  $5$ ); relação diâmetro/espessura ( $d/t=8,4$ ;  $18,1$  e  $28,6$ ) e resistência ao escoamento do aço ( $f_y=300$  MPa e  $400$  MPa), totalizando 54 modelos. Em relação à força normal resistente, reduções foram encontradas quando  $D/t$  passou de  $8$  para  $18$  e de  $18$  para  $28$ . Também houve aumento na força resistente quando a tensão de escoamento do aço passou de  $300$  MPa para  $400$  MPa. A alteração do parâmetro  $D/t$  de  $8$  para  $18$  foi o parâmetro que mais afetou a capacidade resistente do pilar. Por fim, não houve diferença significativa na força resistente quando a relação  $L/D$  aumentou de  $3$  para  $5$ . Ao comparar as forças normais resistentes previstas pela simulação numérica e recomendações normativas, o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) se destacou, com resultados próximos dos obtidos na modelagem. A ABNT NBR 8800 (2008) e a AS/NZS 2327 (2016) foram conservadores, com resultados na faixa de  $80\%$  dos valores previstos pela modelagem. Vale destacar que essas normas não se aplicam a concretos reciclados.

**Palavras-chave:** pilares mistos preenchidos, concreto reciclado, simulação numérica, compressão axial, revisão sistemática, força normal resistente.

## ABSTRACT

---

Part of the waste generated in civil construction, especially waste concrete, can be used as replacement of natural aggregates. Aiming to expand the use of concrete with recycled aggregates in composite columns, the aim of this study was to evaluate the behavior of composite columns filled with recycled concrete subjected to concentric load. For this, numerical simulation was developed in software Abaqus. First, a systematic review of the literature (SRL) on circular cross-section composite columns filled with recycled concrete was conducted. Most of the available studies are related to experimental results showing an increase in ultimate load due to the use of recycled concrete. Numerical models were developed in software Abaqus® and a sensitivity analysis was conducted to evaluate the influence of parameters such as finite element mesh density, constitutive models of recycled concrete, damage model parameters, steel-concrete friction coefficient, Poisson's ratio and modulus of elasticity of recycled concrete. Among the parameters evaluated, the most significant was the constitutive model of recycled concrete. Compared to experimental results, the numerical model properly predicted the ultimate load capacity, the Load vs. axial strain behavior of the column, and the strains in steel tube and concrete core. The validated numerical model was used to evaluate the influence of steel tube diameter ( $D=114.3$  mm;  $219.1$  mm and  $323.8$  mm), height-diameter ratio ( $L/D=3$ ,  $4$  and  $5$ ); diameter-thickness ratio ( $D/t=8.4$ ;  $18.1$  and  $28.6$ ) and yield strength of steel ( $f_y=300$  MPa and  $400$  MPa), totaling 54 models. Regarding the ultimate load capacity, decreases were found when  $D/t$  went from 8 to 18 and from 18 to 28. There was also an increase in the ultimate load capacity when the yield stress of the steel went from 300 MPa to 400 MPa. Changing the  $D/t$  ratio from 8 to 18 was the parameter that most affected the resistant capacity of the column. Finally, there was no significant difference in the strength when the  $L/D$  ratio increased from 3 to 5. The values of ultimate load predicted using numerical modelling and Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) standard procedure were very close each other. Regarding to ABNT NBR 8800 (2008) and AS/NZS 2327 (2016), both standard procedures were conservative with results about 80% of the values from numerical modelling. It is worth noting that these standards do not apply to recycled concrete.

**Keywords:** concrete filled steel tube columns, recycled concrete, numerical simulation, axial compression, systematic review, ultimate load capacity.

## SUMÁRIO

---

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>6</b>
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	6
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	11
1.3.	OBJETIVOS.....	13
1.4.	METODOLOGIA .....	13
1.5.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS .....	15
<b>2.</b>	<b>PILAR MISTO DE SEÇÃO CIRCULAR PREENCHIDO COM CONCRETO RECICLADO</b> .....	<b>17</b>
2.1.	PROPRIEDADES DO CONCRETO RECICLADO .....	17
2.2.	EFEITO DE CONFINAMENTO E COMPORTAMENTO DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS DE SEÇÃO CIRCULAR .....	28
2.3.	PREVISÃO DA FORÇA NORMAL RESISTENTE À COMPRESSÃO AXIAL CENTRADA.....	35
2.4.	ANÁLISE COMPARATIVA: FORÇA NORMAL RESISTENTE .....	41
<b>3.</b>	<b>REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA</b> .....	<b>47</b>
3.1.	DESENVOLVIMENTO DA RSL.....	47
3.1.1.	<i>PLANEJAMENTO</i> .....	47
3.1.2.	<i>EXECUÇÃO</i> .....	49
3.1.3.	<i>SUMARIZAÇÃO</i> .....	50
3.2.	RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA .....	51
<b>4.</b>	<b>MODELAGEM NUMÉRICA</b> .....	<b>64</b>
4.1.	DADOS DE REFERÊNCIA PARA VALIDAÇÃO.....	64
4.2.	MODELO NUMÉRICO.....	66
4.2.1.	<i>GEOMETRIA, VÍNCULOS E SUPERFÍCIES DE CONTATO</i> .....	66
4.2.2.	<i>RELAÇÕES CONSTITUTIVAS E CRITÉRIO DE FALHA: PERFIL DE AÇO</i> .....	67
4.2.3.	<i>RELAÇÕES CONSTITUTIVAS E CRITÉRIO DE FALHA: NÚCLEO DE CONCRETO</i>	

4.2.4.	CARREGAMENTO E CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA .....	74
4.3.	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO NUMÉRICO .....	74
4.3.1.	DENSIDADE DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS .....	75
4.3.2.	INFLUÊNCIA DO MODELO CONSTITUTIVO E DOS PARÂMETROS DO MODELO DE DANO DO CONCRETO .....	77
4.3.3.	CONTATO ENTRE AÇO E CONCRETO RECICLADO .....	83
4.3.4.	COEFICIENTE DE POISSON DO CONCRETO RECICLADO .....	84
4.3.5.	MÓDULO DE ELASTICIDADE DO NÚCLEO DE CONCRETO .....	85
4.4.	CARACTERÍSTICAS DO MODELO NUMÉRICO VALIDADO .....	87
4.4.1.	COMPORTAMENTO DO PILAR MISTO .....	88
4.4.2.	COMPORTAMENTO DOS COMPONENTES DO PILAR MISTO .....	89
4.4.3.	COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA .....	90
<b>5.</b>	<b>ESTUDO PARAMÉTRICO .....</b>	<b>95</b>
5.1.	COMPORTAMENTO GLOBAL .....	96
5.1.1.	RELAÇÃO $L/D$ .....	96
5.1.2.	RELAÇÃO $D/t$ .....	101
5.1.3.	RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO DO AÇO .....	104
5.2.	FORÇA NORMAL RESISTENTE .....	109
5.2.1.	RELAÇÃO $L/D$ .....	109
5.2.2.	RELAÇÃO $D/t$ .....	111
5.2.3.	RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO DO AÇO .....	114
5.3.	ANÁLISE COMPARATIVA DA FORÇA NORMAL RESISTENTE: MODELAGEM NUMÉRICA, NORMAS TÉCNICAS E MODELOS ANALÍTICOS .....	117
5.4.	ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	121
5.4.1.	COMPARAÇÃO FORÇA PREVISTA VS. FORÇA SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....	121
5.4.2.	INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS AVALIADOS .....	122
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>128</b>
6.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	130
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>131</b>





# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A construção civil é um setor essencial para medir o progresso de um país, mas também é uma grande fonte de resíduos, representando um desafio ambiental e administrativo que afeta todas as nações e impulsiona a busca global por soluções sustentáveis.

Os impactos ambientais se iniciam na extração da matéria-prima, sobretudo dos agregados graúdos e miúdos, que modificam de forma irreversível a paisagem e a biodiversidade local e regional, causando impactos ambientais diversos. Embora a construção civil seja responsável por uma série de subprodutos oriundos da produção dos seus componentes, o foco do presente estudo reside em um subproduto específico que são os resíduos de concreto. Nesse contexto, a ABNT NBR 15116 (2021) define resíduos de construção e demolição como subprodutos de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e aqueles resultantes da preparação e da escavação de terrenos. Os resíduos são agrupados em classes sendo que apenas aqueles da classe A são definidos como recicláveis e reutilizáveis (ABNT NBR 15116, 2021). São exemplos de resíduos classe A: resíduos de tijolos, telhas, concretos e argamassas. Alguns desses podem ser triturados e transformados em agregados que substituem o agregado natural.

Há diversos estudos que avaliam e quantificam a produção anual de resíduos de construção e demolição (RCD) que, em sua maioria, são sólidos provenientes de obras, demolições, reparos ou adequações de edificações.

Em contexto mundial, o Conselho Mundial de Desenvolvimento Sustentável<sup>1</sup> verificou que Europa, Estados Unidos e Japão produziram, em 2009, 900 milhões de toneladas de RCD. Passados cinco anos, em 2014, a produção anual de resíduos atingiu 3752 milhões sendo 858 milhões produzidos pela Europa, 534 milhões nos Estados Unidos e 2360 milhões na China; estes valores são preocupantes uma vez que os resíduos levam muito tempo para se decompor (ROSADO *et al.*, 2019). Ainda nesse contexto, na Austrália, em 2020, cerca de 27 milhões de toneladas de RCD foram produzidas, o que corresponde a 44% de toda a produção de resíduos do país (KABIRIFAR *et al.*, 2021)). Ainda mais preocupante é que menos de 60% destes resíduos são reaproveitados (reciclagem ou reutilização).

Na Espanha, em 2018, foram gerados 0,81ton/hab/ano (OLIVEIRA, 2021a). Em 2014

---

<sup>1</sup> Disponível em: <<https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Recycling-Concrete>> Acesso em 29 de março de 2022.

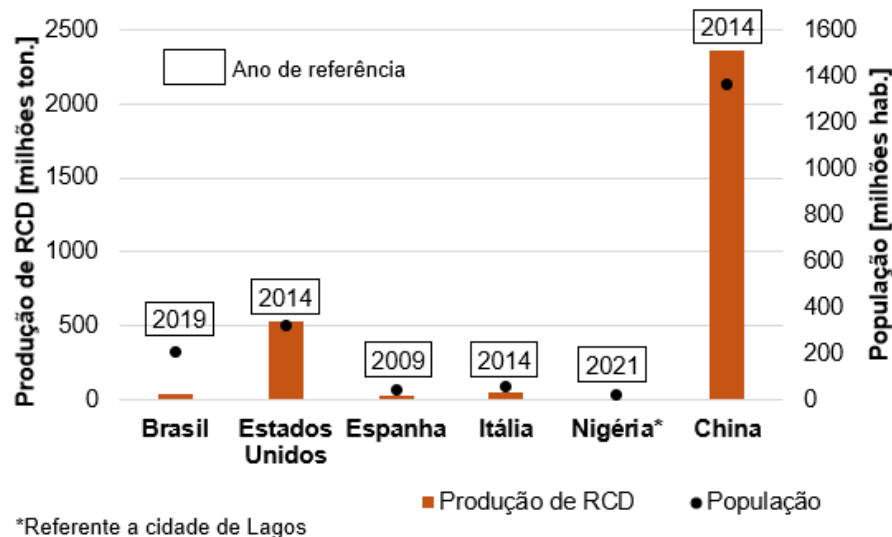
a Itália gerou cerca 51 milhões de toneladas de RCD, o que corresponde a 0,85 ton/habitante (BORGHI; PANTINI; RIGAMONTI, 2018).

Em países em desenvolvimento como a Nigéria, é difícil encontrar dados sobre a produção de resíduos de construção pois o descarte ilegal é predominante. Além disso, a geração de resíduos é um indicador de como países em desenvolvimento constroem menos e, portanto, geram menos resíduos de construção. Na cidade nigeriana de Lagos, em 2021, que possui 21 milhões de habitantes, foram gerados aproximadamente 4,8 milhões de toneladas de RCD, que corresponde a 0,23 ton/hab/ano, valor bem inferior ao gerado por países desenvolvidos (ABOGINIJE; AIGBAVBOA; THWALA, 2021).

A produção de RCD por habitante-ano correspondente à Itália e à Espanha foi, respectivamente de 0,85 e 0,81, mostrando que países desenvolvidos geram maior quantidade de RCD. No Brasil, em 2019 foram produzidos 45 milhões de toneladas de RCD o que corresponde a 0,21 ton/hab/ano<sup>2</sup>. Em comparação com a produção de 2010, houve aumento de 35% no volume de resíduos de construção e demolição. O mais preocupante é que no Brasil, em 2016, apenas 21% dos resíduos de RCD eram reciclados enquanto na Holanda este percentual era de 90% (TEIXEIRA *et al.*, 2018).

Os dados de produção de resíduos de construção e demolição citados até aqui foram organizados no Gráfico 1-1.

**Gráfico 1-1: Produção de resíduos de construção e demolição (milhões ton/por habitante-ano)**



Fonte: Elaborada pelo autor

A partir dos dados do Gráfico 1-1, fica evidente a disparidade na produção de RCD; enquanto o Brasil gera 0,21 ton/hab/ano a China produz 1,73 ton/hab/ano, valor representa

<sup>2</sup> Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>> Acesso em 02 de novembro de 2021.

8,2 vezes a produção brasileira. Apesar da alta produção chinesa de resíduos, o país incentiva pesquisas voltadas à reciclagem de RCD. Na revisão sistemática realizada nesse trabalho, 71% dos documentos encontrados foram de origem chinesa. Porém, apesar dos incentivos governamentais, o país recicla apenas 10% dos seus resíduos de construção e demolição (HUANG *et al.*, 2018; SHEN; PENG; GUO, 2018; YUAN *et al.*, 2022).

No Brasil, o tímido uso dos resíduos de construção e demolição se dá por diversas razões, destacando-se o desconhecimento do potencial dos resíduos como material de construção civil. Outro fator relevante é a falta de incentivo para a reciclagem; em 2019, apenas 21% dos resíduos de construção foram reciclados (RAMOS, 2022). A ABNT NBR 15116 (2021) permite o uso do RCD não somente para elementos sem funções estruturais (reparos e pavimentos). A versão publicada em 2021 permite o uso de resíduos oriundos unicamente de concretos, em elementos estruturais, com substituição máxima de 20% do agregado graúdo natural. Em países europeus como Portugal, Espanha, Reino Unido e Alemanha, o uso de agregados reciclados não é opcional. Em tais países é obrigatório o uso de agregados reciclados em pelo menos 20% dos concretos produzidos com fins estruturais, desde que o agregado atenda aos pré-requisitos das normas locais (ESTOLANO *et al.*, 2018).

O concreto com agregados de resíduos de construção e demolição (RCD) é caracterizado pela substituição total ou parcial dos agregados naturais por agregados de RCD. Devido à grande variabilidade desses resíduos, para produção de concretos estruturais, é recomendável que sejam empregados apenas agregados reciclados oriundos de resíduos de concreto. Assim sendo, o concreto reciclado é produzido utilizando agregados oriundos da reciclagem de concretos antigos, que substituem parte ou todo o agregado natural. Tais agregados de resíduos de concreto (ARC) resultam da britagem de elementos de concreto e, a depender da granulometria, podem ser miúdos ou graúdos. Ao longo deste texto, os agregados de resíduos de concreto serão denominados, simplificada e, **agregados reciclados**. Da mesma forma, concretos confeccionados com agregados de resíduos de concreto serão aqui denominados **concretos reciclados**.

A grande heterogeneidade dos agregados reciclados impacta diretamente em diversas propriedades do concreto reciclado. Esta heterogeneidade está associada a fatores como separação inadequada de resíduos, a coleta em locais diversos e a composição heterogênea. Assim, concretos com agregados reciclados requerem atenção especial. A fim de inibir a heterogeneidade desse agregado, a ABNT NBR 15116 (2021) apresenta alguns requisitos para a composição dos agregados reciclados utilizados em concretos estruturais. A Tabela 1-1 apresenta estes requisitos.

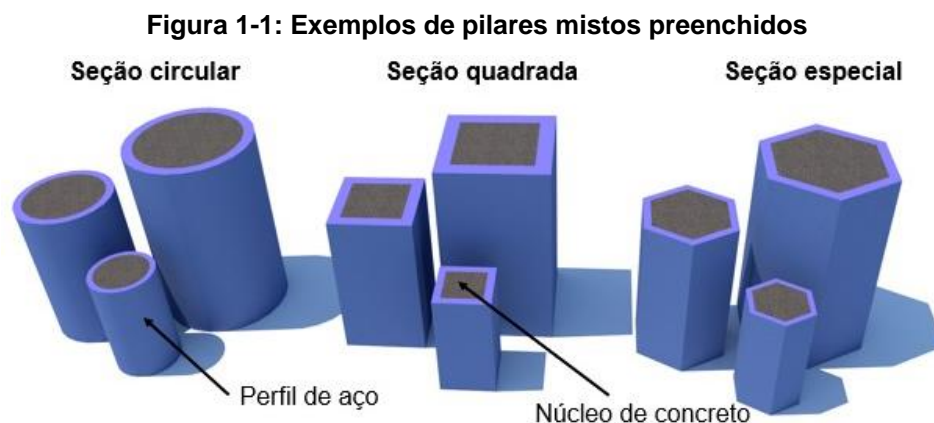
**Tabela 1-1: Requisitos para composição dos agregados reciclados utilizados em concretos com finalidades estruturais. Fonte: ABNT NBR 15116 (2021)**

<b>Características</b>	<b>Limites</b>
Materiais indesejáveis: madeira, plástico, betume, vidros, gesso, etc.	< 1%
Argila em torrões	< 3%
Sulfatos	< 0,1%
Cloretos	< 0,1%
Materiais finos (<0,075 mm)	< 10%
Cerâmica vermelha ou branca não polida	0%
Absorção de água	< 7%

Fonte: Adpatada da ABNT NBR 15116 (2021)

Devido à variabilidade na composição dos agregados reciclados, propriedades mecânicas do concreto como resistência à compressão e módulo de elasticidade são impactadas pelo uso do ARC. Essas propriedades devem ser controladas a fim de atender aos requisitos decorrentes da finalidade do concreto.

Para viabilizar o uso dos concretos reciclados para fins estruturais, é fundamental o desenvolvimento de estudos voltados à aplicação deste tipo de concreto em elementos estruturais. Neste contexto, a aplicação do concreto reciclado a elementos mistos de aço e concreto vem sendo investigada em diversos países. Uma possibilidade é a sua aplicação a pilares mistos preenchidos, que consiste em perfil tubular de aço preenchido com concreto estrutural (Figura 1-1).



Fonte: Elaborada pelo autor

A associação aço-concreto na forma de pilar preenchido traz benefícios como os destacados a seguir:

- O perfil tubular atua como fôrma permanente, reduzindo o tempo de execução da

estrutura e o volume de resíduos gerados. O perfil de aço também atua como armadura, dispensando a necessidade de montagem de armaduras;

- A presença do concreto no interior do tubo de aço aumenta a resistência do pilar misto a altas temperaturas podendo, em alguns casos, dispensar outras medidas protetivas;
- Em relação a elementos em concreto armado, pilares mistos preenchidos apresentam maior rigidez, maior resistência ao fogo, e maior capacidade resistente;
- Em relação a elementos de aço, pilares preenchidos são menos suscetíveis a instabilidades locais e globais. Além disso, apresentam maior capacidade resistente;
- Aumento na ductilidade do elemento misto devido à ação conjunta aço-concreto e ao efeito de confinamento. Em consequência disso, mesmo o concreto sendo um material frágil, ao ser envolvido pelo perfil de aço, ocorre aumento da ductilidade do concreto.

Pilares preenchidos apresentam efeito de confinamento, responsável por modificar o comportamento do núcleo de concreto. Nos pilares de seção circular, tal efeito pode ser tão intenso que, além de modificar o comportamento, pode aumentar a força normal resistente do elemento misto. Ao ser comprimido axialmente, o concreto tende a se expandir lateralmente e é contido pelo tubo de aço. Nesta situação o concreto está impedido de se expandir e se encontra em um estado triaxial de tensões. O perfil de aço, por sua vez, fica em um estado biaxial de tensões. A deformação do concreto à compressão e a consequente expansão lateral mobilizam o efeito de confinamento. A intensidade do efeito de confinamento depende, dentro outros fatores, da deformabilidade do material confinado (núcleo de concreto). Além disso, a intensidade do efeito de confinamento está diretamente relacionada à deformabilidade do concreto; quanto mais deformável, maior pode ser o benefício desse comportamento. É notório que o concreto reciclado é mais deformável que o concreto com agregados naturais (concreto convencional). Esta maior deformabilidade do concreto reciclado pode ampliar o efeito de confinamento observado nos pilares mistos preenchidos de seção circular.

O concreto reciclado vem sendo estudado desde o final da Segunda Guerra Mundial, enquanto estudos de pilares mistos tiveram início no começo do século XX. Apesar dos muitos anos de pesquisa em cada um dos temas isoladamente, a aplicação do concreto reciclado a pilares mistos é uma temática bastante recente e em franco desenvolvimento. No Brasil, Azevedo (2018) e Gerin (2020) foram pioneiras no estudo de pilares mistos preenchidos com concreto reciclado. A tese de Azevedo (2018) e a dissertação de Gerin (2020) são dois marcos da pesquisa brasileira em relação à aplicação do concreto reciclado a elementos mistos de aço e concreto e mostram que os estudos brasileiros nesta área ainda são incipientes.

Existem normas técnicas nacionais e estrangeiras que abordam os pilares mistos de

aço e concreto, porém, nenhuma delas prevê o uso do concreto reciclado. Assim sendo, as formulações se baseiam unicamente no concreto convencional (exclusivamente com agregados naturais).

Dois fatores definem o comportamento e a capacidade resistente dos pilares mistos: o comportamento dos componentes e a interação entre eles. No que se refere ao comportamento dos componentes, além das características geométricas, propriedades mecânicas como resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto e resistência ao escoamento do aço são extremamente relevantes. Quanto à interação aço-concreto, no caso do pilar preenchido de seção circular, o efeito de confinamento pode beneficiar o concreto bem como o pilar misto. Portanto, ao verificar a segurança estrutural de um pilar misto preenchido, todas essas características devem ser levadas em consideração.

No presente estudo serão investigados pilares preenchidos de seção circular submetidos à compressão axial centrada.

## **1.2. JUSTIFICATIVA**

É de conhecimento mundial que a busca por soluções sustentáveis mobiliza e movimenta a comunidade científica. A busca por alternativas para minimizar o volume de resíduos descartados e reduzir a extração de recursos naturais é urgente e deve ser fortemente incentivada pelo setor da construção civil. Assim, a reutilização de resíduos de concreto em novas edificações é uma forma eficiente de dar destinação adequada a parte dos resíduos gerados pela construção civil e, ao mesmo tempo, reduzir a extração de recursos naturais.

O agregado representa cerca de 70 a 80% do volume do concreto. Assim, as propriedades mecânicas do concreto reciclado são altamente dependentes das características dos agregados. A origem diversa dos agregados reciclados causa grande variabilidade das suas propriedades impactando diretamente nas propriedades do concreto reciclado. A heterogeneidade do agregado reciclado pode ser constatada pelos valores de massa específica e absorção de água do agregado reciclado correspondentes a diversas regiões do Brasil (Tabela 2-1). As referências citadas na Tabela 2-1 visam exemplificar a variabilidade de algumas propriedades do agregado reciclado coletado em território nacional.

**Tabela 1-2: Comparação da massa específica e absorção do agregado reciclado (AR) em relação ao agregado natural (NA) nas 5 regiões do Brasil**

Região	Referência	Massa específica [g/cm <sup>3</sup> ]		Absorção [%]	
		Agregado natural	Agregado reciclado	Agregado natural	Agregado reciclado
Sudeste	Gerin (2020)	2,85	2,42 (-15,1%)	1,60	5,70 (+256%)
Sul	Kazmierczak <i>et al.</i> (2019)	2,55	2,33 (-8,6%)	3,46	10,47 (+202%)
Centro-Oeste	Araújo <i>et al.</i> (2016)	2,67	2,58 (-3,3%)	1,29	6,69 (+419%)
Nordeste	Estolano <i>et al.</i> (2018)	2,61	2,44 (-6,5%)	1,12	7,55 (+574%)
Norte	Não encontrado para o ARC graúdo, os estudos se concentram na utilização de materiais naturais, como lama vermelha, lodo, etc.				

Fonte: Elaborada pelo autor

Desenvolver alternativas para a aplicação do concreto reciclado é um caminho necessário e urgente para ampliar o volume de resíduos de concreto reincorporado à indústria da construção. Os pilares mistos preenchidos se apresentam como uma alternativa sustentável pois permitem dispensar fôrmas, reduzir o tempo de construção e o volume de resíduos gerados. Além disso, pilares preenchidos apresentam efeito de confinamento, responsável por melhorar as características mecânicas do concreto confinado. Nos pilares de seção circular, tal efeito pode ser tão intenso que, além de modificar o comportamento, pode aumentar a força normal resistente do elemento misto. Um dos fatores que alteram a intensidade do confinamento é a deformabilidade do material confinado; a maior deformabilidade do concreto reciclado em relação ao concreto convencional pode ampliar o efeito de confinamento. Assim, ao confinar o concreto reciclado com o tubo de aço, pode-se tirar partido da sua maior deformabilidade e obter uma associação aço-concreto estruturalmente eficiente e ambientalmente sustentável.

A aplicação do concreto reciclado a pilares preenchidos é bastante recente. Buscas na base de dados *Scopus* considerando, separadamente, os termos “*circular concrete filled steel tube*” e “*recycled aggregate concrete*” retornaram, respectivamente, 1596 e 8468 documentos. Porém, a junção dos dois termos resultou em 98 documentos; apenas 1 documento com resultados de estudos desenvolvidos com agregados reciclados do Brasil.

Portanto, apesar de ser uma linha bastante promissora, há poucos estudos nacionais sobre o tema. Azevedo (2018) e Gerin (2020) avaliaram experimentalmente pilares mistos de seção circular preenchidos com concreto reciclado. Estes estudos brasileiros são bastante recentes e foram concluídos há menos de 5 anos. Isto corrobora a necessidade de estudos nacionais sobre o tema.



Naturalmente, o uso do concreto reciclado em elementos estruturais está atrelado à disponibilidade de modelos teóricos que permitam prever, com precisão adequada, a capacidade resistente do elemento estrutural. Neste contexto, visando ampliar o uso do concreto reciclado para fins estruturais, no presente estudo foi construído um modelo numérico representativo do pilar misto preenchido com concreto reciclado. Este modelo numérico permite ampliar o banco de dados existentes e colaborar para construção de modelos analíticos mais precisos para prever a capacidade resistente do pilar. Diferente dos ensaios experimentais, em que há questões de custo, transporte e disponibilidade de equipamentos, a simulação numérica consegue produzir uma quantidade maior de resultados com menor demanda de recursos.

Assim, o presente estudo vem contribuir para a ampliação do banco de dados referente a pilares mistos de seção circular preenchidos com concreto reciclado. A carência de estudos nacionais e estrangeiros sobre este tema, aliada à conseqüente ausência de recomendações normativas quanto ao uso de concretos reciclados em elementos mistos justificam o desenvolvimento do presente estudo. Assim sendo, esse estudo poderá contribuir com dados que auxiliem no preenchimento desta lacuna do conhecimento.

### 1.3. OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivo principal avaliar o comportamento de pilares mistos de seção circular preenchidos com concreto reciclado e submetidos à compressão axial centrada. A partir deste objetivo principal, foram definidos os objetivos específicos a seguir:

1. Verificar a influência de parâmetros como diâmetro, espessura do tubo de aço, esbeltez do pilar e resistência ao escoamento do aço sobre a força normal resistente.
2. Identificar, dentre os parâmetros avaliados, qual tem impacto mais relevante sobre o comportamento e capacidade resistente do pilar misto de seção circular preenchido com concreto reciclado;
3. Avaliar a possibilidade de aplicar as recomendações normativas nacionais e estrangeiras desenvolvidas para pilares preenchidos com concreto convencional a pilares com concreto reciclado.

### 1.4. METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em 5 etapas apresentadas nos tópicos abaixo:

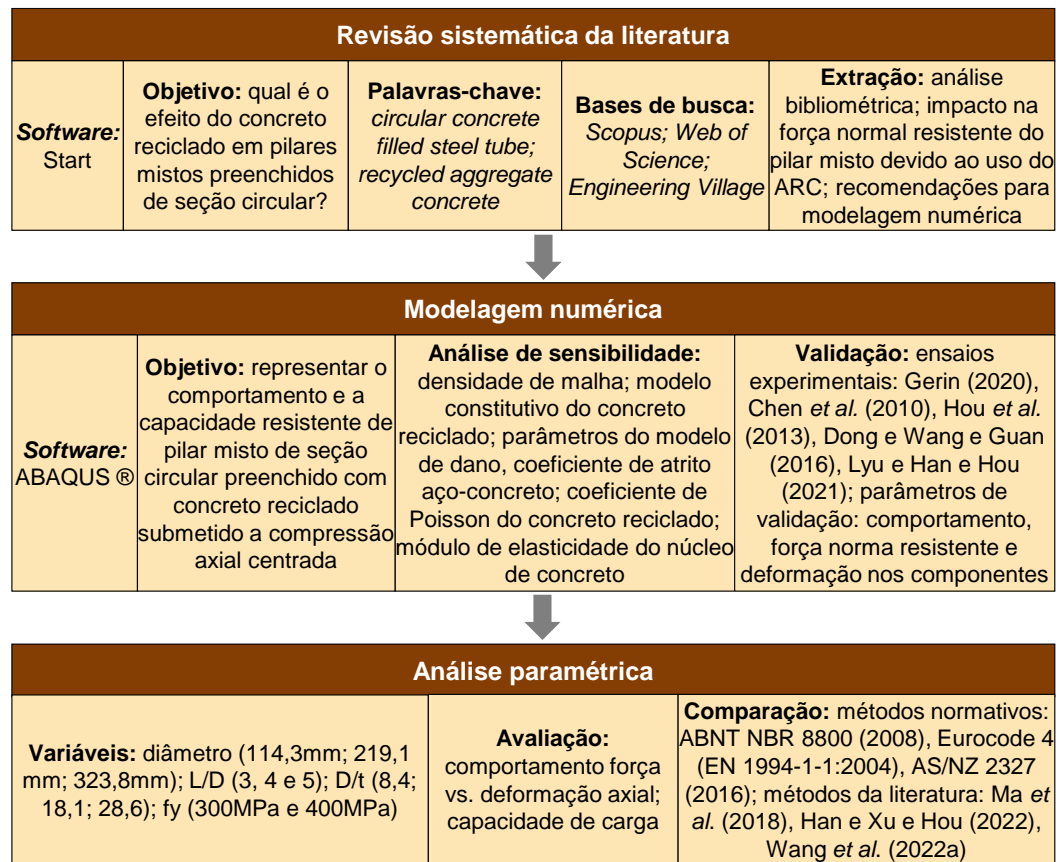
- **Revisão sistemática da literatura:** realizada com auxílio do *software* Start no intuito identificar o atual estado do conhecimento sobre pilares mistos de seção circular preenchidos com concreto reciclado. Nesta etapa, foram selecionados apenas

documentos aderentes ao objetivo deste estudo. Os documentos foram selecionados em três bases de pesquisa (Scopus, Web of Science e Engineering Village). No total, foram encontrados 21 documentos, dos quais extraídas informações que comparem o pilar misto com concreto reciclado ao pilar com concreto convencional, como: porcentagem de substituição do agregado graúdo natural por ARC, força normal resistente, comportamento força vs. deformação, modelos constitutivos para o concreto reciclado e confinado, além da criação de análises bibliométricas.

- **Construção e Validação do modelo numérico:** nesta etapa, utilizando o *software* Abaqus®, foram definidas propriedades do modelo numérico como tipo de elemento finito, densidade da malha, propriedades dos materiais, forma de aplicação do carregamento e vínculos, visando representar o comportamento de pilares mistos preenchidos com concreto reciclado e submetidos à compressão axial centrada. Resultados experimentais de Gerin (2020), Chen *et al.* (2010), Hou *et al.* (2013), Dong e Wang e Guan (2016) e Lyu e Han e Hou (2021) foram utilizados para validação do modelo numérico. A análise de sensibilidade do modelo numérico foi realizada comparando os resultados a respostas experimentais, variando características como: densidade de malha, modelo constitutivo e parâmetros do modelo de dano do concreto, coeficiente de atrito aço-concreto, coeficiente de Poisson do concreto reciclado e módulo de elasticidade do concreto reciclado.
- **Estudo paramétrico:** o modelo numérico validado foi utilizado para avaliar a influência de parâmetros geométricos e de resistência dos materiais no comportamento e a capacidade resistente de pilares preenchidos com concreto reciclado. Os seguintes parâmetros foram avaliados: espessura ( $t$ ) e diâmetro ( $D$ ) do tubo de aço, comprimento efetivo do pilar ( $L$ ) e resistência ao escoamento do aço ( $f_y$ ). Foram investigados: relação altura/diâmetro ( $L/D$ ) igual a 3, 4 e 5; relação diâmetro/espessura ( $D/t$ ) de 8,4; 18,1 e 28,6; e resistência ao escoamento de 300 MPa e 400 MPa, totalizando 54 modelos. No estudo paramétrico, a resistência à compressão do concreto foi mantida constante e igual a 38,66 MPa.
- **Análise de resultados:** análises comparativas permitiram identificar relações entre os parâmetros investigados e o comportamento Força vs. Deformação do pilar preenchido bem como da força normal resistente. Adicionalmente, foi avaliada a aplicabilidade de algumas normas técnicas, originalmente desenvolvidas para pilares preenchidos com concreto convencional, a pilares mistos com concreto reciclado.

Na Figura 1-2 é apresentado um fluxograma com as etapas realizadas neste estudo.

Figura 1-2: Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborada pelo autor

## 1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esta dissertação foi dividida em sete capítulos, sendo que no primeiro são apresentados os objetivos, justificativas, metodologia e uma contextualização geral quanto ao concreto reciclado e ao pilar misto preenchido de seção circular.

O segundo capítulo apresenta uma revisão geral das propriedades do concreto reciclado, com ênfase em propriedades mecânicas como resistência à compressão e módulo de elasticidade. Apresenta também características do pilar misto preenchido, como efeito de confinamento e aspectos que alteram seu comportamento e capacidade resistente. Por fim, são apresentados métodos normativos e da literatura para previsão da força normal resistente.

O terceiro capítulo é dedicado à revisão sistemática da literatura envolvendo o pilar misto preenchido com concreto reciclado de seção circular, com detalhes de todo o protocolo adotado. Análises bibliométricas e metodologias para construção do modelo numérico são apresentadas neste capítulo.

O quarto capítulo é dedicado à construção do modelo numérico incluindo as

referências para validação do modelo numérico. Detalhes sobre estratégias de construção do modelo, geometria, vínculos e superfícies de contato, bem como relações constitutivas, carregamentos e critérios de convergência são apresentados ao longo do capítulo. A seguir, é apresentada a sensibilidade do modelo numérico a parâmetros como densidade de malha de elementos finitos, influência do modelo constitutivo e parâmetros do modelo de dano do concreto, contato entre aço-concreto, coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade do núcleo de concreto. Por fim, o modelo numérico final é validado para a resposta força vs. deformação e comportamento dos componentes (perfil de aço e núcleo de concreto).

O capítulo 5 descreve o estudo paramétrico no qual foram avaliadas a variação no diâmetro, nas relações  $L/D$  e  $D/t$ , e resistência ao escoamento do perfil de aço. As análises comparativas foram realizadas por meio de gráficos força vs. deformação e força normal resistente. Por fim, forças normais resistentes oriundas das simulações numéricas, das recomendações de normas técnicas e de modelos analíticos foram comparadas.

As conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 6.

## 2. PILAR MISTO DE SEÇÃO CIRCULAR PREENCHIDO COM CONCRETO RECICLADO

Esse capítulo foi dividido em 4 itens: 1) Propriedades do concreto reciclado, 2) efeito de confinamento e comportamento de pilares mistos preenchidos, 3) previsão da força normal resistente à compressão axial centrada e 4) análise comparativa dos valores de força normal resistente previstos por modelos normativos, modelos analíticos da literatura e experimentais.

### 2.1. PROPRIEDADES DO CONCRETO RECICLADO

O agregado graúdo formado a partir do resíduo de concreto (ARC) é um material muito heterogêneo pois contém agregados graúdos naturais do concreto de origem, agregados graúdos naturais com argamassa aderida e fragmentos soltos de argamassa. Uma das maiores diferenças do concreto reciclado em relação ao concreto convencional é a presença de duas zonas de transição (ZT). A zona de transição, também presente no concreto convencional, é a interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento; ela divide os dois componentes e pode representar o elo mais fraco do concreto pois é nela que a ruptura mecânica tende a acontecer. No concreto reciclado existem duas zonas de transição: a primeira entre o agregado graúdo natural e a argamassa antiga e a segunda entre o ARC e a nova pasta de argamassa (Figura 2-1). A presença de uma nova ZT aumenta a fragilidade do concreto e gera um número maior de regiões em que as tensões são elevadas. Além disso, essa nova zona de transição (entre o agregado natural e a argamassa antiga) é mais porosa devido à fissuração mais intensa (XIAO *et al.*, 2012; KHOURY *et al.*, 2018; KAZMIERCZAK *et al.*, 2019; JAYASURIYA *et al.*, 2021).

**Figura 2-1: Composição do ARC**



Fonte: adaptado de Jayasuriya *et al.* (2021)

É fato que as características do agregado reciclado afetam as características do novo concreto. A argamassa aderida possui alta porosidade e menor densidade que as rochas que compõem os agregados naturais. Nesse sentido, ao comparar o ARC a agregados naturais há consenso quanto à menor densidade, maior absorção de água e menor resistência mecânica (MORETTI, 2014; CAMPOS *et al.*, 2018; KAZMIERCZAK *et al.*, 2019; GERIN, 2020; FURINI; TRIGO, 2022). Porém, devido à variabilidade na composição do agregado reciclado, não há uma faixa padrão para densidade ou a absorção de água do ARC. A Tabela 2-1 apresenta um conjunto de valores de massa específica e absorção do agregado natural (referência) e do reciclado. Os valores de massa específica apresentam variação pequena, indo de 2,33 g/cm<sup>3</sup> a 2,46 g/cm<sup>3</sup>, variação de 5% entre os valores extremos. No caso da absorção de água, a variação é significativa: os valores extremos foram 4,16% e 10,47%. A amplitude dos valores mostra a grande variabilidade da absorção. Vale ressaltar que todos os valores apresentados na Tabela 2-1 são nacionais.

**Tabela 2-1: Comparação da massa específica e absorção do agregado reciclado (AR) em relação ao agregado natural (NA) (continua)**

Autor	Agregado natural	Agregado reciclado	Agregado natural	Agregado reciclado
	Massa específica [g/cm <sup>3</sup> ]	Massa específica [g/cm <sup>3</sup> ]	Absorção [%]	Absorção [%]
Leite (2001)	3,09	2,51 (-18,7%)	-	4,95
Gonçalves (2001)	2,88	2,61 (-9,4%)	1,9	4,9 (+159%)
Angulo <i>et al.</i> (2004)	-	2,19	-	6,2
Buttler (2007)	2,78	2,59 (-6,8%)	0,73	3,48 (+376%)
Gonçalves (2011)	2,55	2,33 (-8,6%)	3,46	10,47 (+203%)
Baiochi <i>et al.</i> (2013)	2,89	2,25 (-22,1%)	1,31	7,06 (+439%)

**Tabela 2-1: Comparação da massa específica e absorção do agregado reciclado (AR) em relação ao agregado natural (NA) (continuação)**

Autor	Agregado natural	Agregado reciclado	Agregado natural	Agregado reciclado
	Massa específica [g/cm <sup>3</sup> ]	Massa específica [g/cm <sup>3</sup> ]	Absorção [%]	Absorção [%]
Moretti (2014)	2,85	2,46 (-13,7%)	1,10	4,16 (+278%)
Araújo <i>et al.</i> (2016)	2,67	2,58 (-3,3%)	1,29	6,69 (+419%)
Campos <i>et al.</i> (2018)	2,72	2,45 (-9,9%)	0,22	5,60 (+2445%)
Estolano <i>et al.</i> (2018)	2,61	2,44 (-6,5%)	1,12	7,55 (+574%)
Kazmierczak <i>et al.</i> (2019)	2,55	2,33 (-8,6%)	3,46	10,47 (+202%)
Gerin (2020)	2,85	2,42 (-15,1%)	1,60	5,70 (+256%)
Zhang <i>et al.</i> (2022)	2,78	2,61 (-6,1%)	0,90	7,70 (+756%)
Furini e Trigo (2022)	2,90	2,42 (-16,5%)	0,00	8,00
Tang <i>et al.</i> (2022)	2,78	2,61 (-6,1%)	0,90	7,70 (+756%)
Mistri <i>et al.</i> (2023)	2,38	2,26 (-5,0%)	0,63	5,40 (+757%)

Fonte: Elaborada pelo autor

Devido à heterogeneidade e difícil padronização, a maioria dos estudos estão voltados à produção de concretos não estruturais ou, quando estruturais, consideram a adição de materiais finos como sílica, cinzas volantes, *etc.* A grande variabilidade dos agregados de resíduos de concreto se reflete nas propriedades dos concretos reciclados e dificulta a previsão de suas propriedades mecânicas. É fato que concretos reciclados são mais porosos, possuem maior absorção de água e maior índice de vazios do que concretos com agregados naturais. Essas características podem comprometer a aplicação dos agregados naturais a concretos estruturais pois são responsáveis pelo aumento da deformabilidade e redução da resistência. A variabilidade das propriedades dos concretos reciclados decorre da variabilidade dos agregados de resíduos; assim, é difícil prever características como resistência à compressão e módulo de elasticidade.

De forma similar ao agregado reciclado, o concreto reciclado também apresenta maior absorção e menor densidade se comparado ao concreto convencional, causados também pela argamassa antiga aderida ao ARC (ESTOLANO *et al.*, 2018; FIOL *et al.*, 2018; GERIN, 2020; SALLES *et al.*, 2021; AFRICANO, 2021). E da mesma forma dos agregados, não é possível prever quão variável são essas propriedades físicas do concreto. A ausência de correlações matemáticas que relacionem características do agregado reciclado com características do concreto reciclado dificulta sua utilização. A Tabela 2-2 ilustra a absorção e densidade do concreto reciclado com 100% de substituição de agregado reciclado em

comparação ao concreto convencional (referência). Fica evidente que a heterogeneidade se mantém conforme observada no ARC, pois o concreto além de ser uma mistura de vários materiais, pode ser concebido de diferentes formas, seja pela composição ou método de mistura.

**Tabela 2-2: Comparação da densidade e absorção do concreto reciclado com 100% de substituição em relação ao concreto convencional**

Autor	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]		Absorção [%]	
	Concreto convencional	Concreto reciclado	Concreto convencional	Concreto reciclado
Estolano <i>et al.</i> (2018)	2,37	2,09 (-11,8%)	2,57	6,15 (+139%)
Fiol <i>et al.</i> (2018)	2,43	2,35 (-3,3%)	2,95	3,05 (+3,4%)
Gerin (2020)	2,67	2,57 (-3,7%)	6,28	7,27 (+15,8%)
Africano (2021)	2,39	2,35 (-1,7%)	2,48	2,83 (+14,1%)
Salles <i>et al.</i> (2021)	-	-	4,71	8,29 (+76,0%)
Adessina e Fraj e Barthélémy (2023)	2,56	2,48 (-3,1%)	-	-
Momotaz <i>et al.</i> (2023)	2,28	2,24 (-1,8%)	6,84	8,69 (+27,1%)

Fonte: Elaborada pelo autor

Em relação às propriedades do concreto em estado fresco, a trabalhabilidade é diretamente afetada. Devido às maiores porosidade e rugosidade, o agregado reciclado absorve parte da água da mistura; isto reduz significativamente a trabalhabilidade do concreto. Alguns autores sugerem 1) a pré-molhagem dos agregados (XIAO *et al.*, 2012; VERIAN; ASHRAF; CAO, 2018; KAZMIERCZAK *et al.*, 2019), 2) a utilização de traços mais fluidos (FERREIRA; DE BRITO; BARRA, 2011), 3) a adição de superplastificantes (GONÇALVES, 2001; LEITE, 2001; MORETTI, 2014), ou 4) correção da relação água/cimento do traço do concreto (OLIVEIRA, 2021b) para minimizar os impactos do uso de agregados reciclados. A comparação entre valores de trabalhabilidade de concretos de referência e com 100% de agregados reciclados mostra a variabilidade dos resultados (Tabela 2-3). Nos estudos citados, foram utilizados os mesmos traços de concreto e o agregado reciclado foi a única variável avaliada.



**Tabela 2-3: Abatimento do tronco de cone de concretos reciclados com 100% de substituição e concretos convencionais**

<b>Autor</b>	<b>Concreto convencional [mm]</b>	<b>Concreto reciclado [mm]</b>
Fiol <i>et al.</i> (2018)	680	550 (-19,1%)
Nili e Sasanipour e Aslani (2019)	765	745 (-2,6%)
Gerin (2020)	235	210 (-10,6%)
Africano (2021)	90	25 (-72,2%)
Salles <i>et al.</i> (2021)	240	0 (-100,0%)
Allujami <i>et al.</i> (2022)	102	80 (-21,6%)

Fonte: Elaborada pelo autor

Dada sua importância, são comuns os estudos que buscam implementar técnicas para melhorar a trabalhabilidade do concreto reciclado. Por exemplo, Tam e Gao e Tam (2005) desenvolveram o método de mistura TSMA (*two stage mixing approach*), que consiste na adição em duas etapas: na primeira etapa é utilizada metade da água para preencher os poros do agregado de resíduo de concreto; na segunda é adicionada a água necessária para as reações do cimento. Isso reduz a capacidade de absorção do agregado, aumentando a densidade do concreto, melhorando a trabalhabilidade e propriedades mecânicas como resistência à compressão e módulo de elasticidade longitudinal (TAM; GAO; TAM, 2005; ANDAL; SHEHATA; ZACARIAS, 2016).

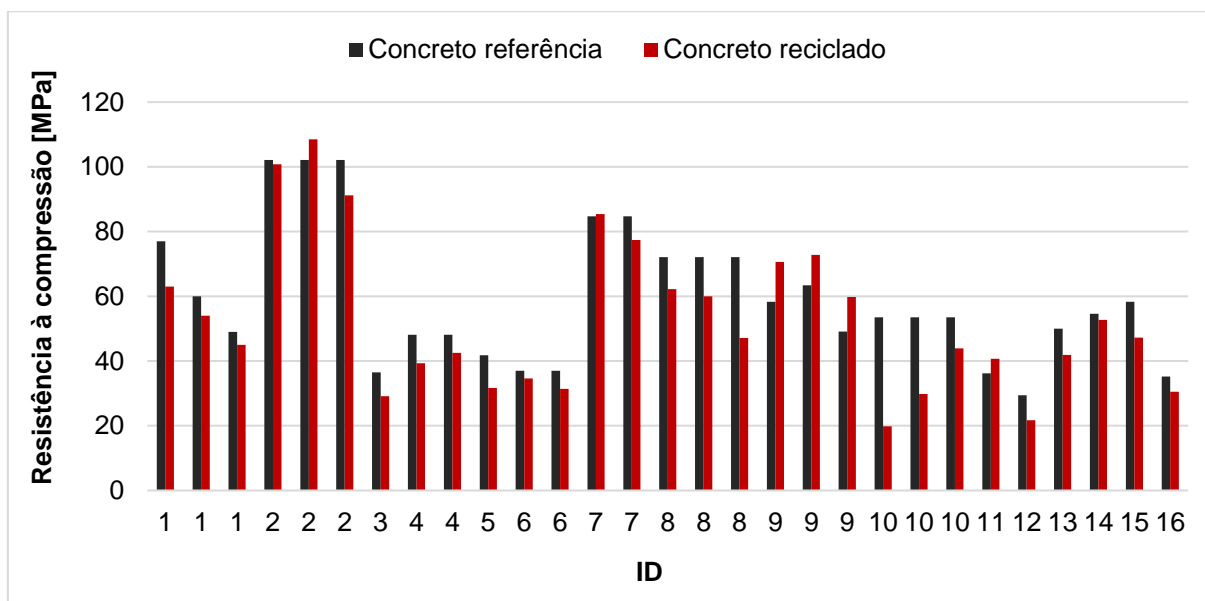
Os estudos sobre concretos reciclados com finalidades estruturais usualmente buscam avaliar a resistência mecânica e a deformabilidade. Há diversos fatores que alteram a resistência à compressão quando se utiliza ARC substituindo o agregado natural. Um deles é a redução da relação água/cimento efetiva devido à alta absorção de água do ARC; a maior absorção de água reduz a relação água-cimento aumentando a resistência à compressão (ANDAL; SHEHATA; ZACARIAS, 2016; JUNAK; SICAKOVA, 2017; FIGUEIREDO *et al.*, 2020). Contudo, isto leva a redução na trabalhabilidade, podendo comprometer a moldabilidade do concreto reciclado. Outro importante fator é a quantidade de argamassa aderida aos agregados naturais antigos e os fragmentos soltos, que constituem regiões mais fissuradas e de menor resistência, diminuindo a resistência à compressão do concreto (ANDAL; SHEHATA; ZACARIAS, 2016). A combinação desses e outros fatores dificulta a previsão da resistência à compressão de concretos reciclados. Nesse contexto, a Tabela 2-4 mostra a variação da resistência à compressão do concreto reciclado para um mesmo teor de substituição, podendo ocorrer aumentos ou reduções (Gráfico 2-1).

**Tabela 2-4: Influência da substituição total do agregado natural graúdo por agregado reciclado nos valores de resistência à compressão**

ID	Autor	Concreto de referência [MPa]	Concreto reciclado [MPa]	
1	Barbudo <i>et al.</i> (2013)	77,0	63,0 (-18,2%)	
1		60,0	54,0 (-10,0%)	
1		49,0	45,0 (-8,2%)	
2	Andreu e Miren (2014)	102,1	100,8 (-1,3%)	
2			108,5 (+6,3%)	
2			91,2 (-10,7%)	
3	Folino e Xargay (2014)	36,5	29,1 (-20,3%)	
4	Adams <i>et al.</i> (2016)	48,1	39,3 (-18,3%)	
4			42,5 (-11,6%)	
5	Arora e Singh (2016)	41,8	31,7 (-24,2%)	
6	Andal e Shehata e Zacarias (2016)	37,0	34,6 (-6,5%)	
6			31,4 (-15,1%)	
7	Afroughsabet e Biolzi e Ozbakkaloglu (2017)	84,7	85,4 (+0,8%)	
7			77,4 (-8,6%)	
8	Dimitriou e Savva e Petrou (2018)	72,1	62,2 (-13,7%)	
8			60,0 (-16,8%)	
8			47,1 (-34,7%)	
9	Fiol <i>et al.</i> (2018)	58,3	70,6 (+21,1%)	
9			63,4	72,8 (+14,8%)
9			49,1	59,8 (+21,8%)
10	Guo <i>et al.</i> (2020)	53,5	19,8 (-63,0%)	
10			29,8 (-44,3%)	
10			43,9 (-17,9%)	
11	Gerin (2020)	36,2	40,7 (+18,0%)	
12	Africano (2021)	29,4	21,7 (-26,2%)	
13	Salles <i>et al.</i> (2021)	50,0	41,9 (-16,2%)	
14	Zhang <i>et al.</i> (2022)	54,6	52,7 (-3,5%)	
15	Tang <i>et al.</i> (2022)	58,3	47,2 (-19,0%)	
16	Mistri <i>et al.</i> (2023)	35,2	30,5 (-13,4%)	

Fonte: Elaborada pelo autor

**Gráfico 2-1: Comparação entre valores de resistência à compressão de concretos reciclados com 100% de substituição e concretos de referência (apenas agregado natural)**



Fonte: Elaborada pelo autor

A partir da Tabela 2-4 e do Gráfico 2-1 verifica-se que, dentre os 29 resultados avaliados, 23 deles apresentaram reduções da resistência à compressão enquanto 6 apresentaram aumento em relação ao concreto de referência. Portanto, houve um número maior de reduções do que aumentos na resistência à compressão, porém não é possível concluir que esse comportamento sempre irá se repetir.

Os aumentos médio e máximo foram, respectivamente, 11,3% e 21,8%. Por outro lado, houve redução média 18,3% e redução máxima de 63,0%. A resistência à compressão depende diretamente das características do agregado reciclado, sobretudo da quantidade da argamassa aderida e da relação água/cimento efetiva.

Corroborando essa ideia, o estado da arte elaborado por Verian e Ashraf e Cao (2018) mostrou aumento de até 30% e redução de até 20% na resistência à compressão para substituição total do agregado natural graúdo por ARC. Já Kisku *et al.* (2017) encontraram reduções de até 20% e aumentos de até 25%. Essa variação de resistência é causada por diversos motivos, dentre eles a zona de transição adicional do ARC e a relação água/cimento efetiva da mistura (KISKU *et al.*, 2017).

Além disso, Oliveira (2021) mostrou que dos 217 resultados de resistência à compressão de concretos reciclados disponíveis na literatura, 150 apresentaram redução na resistência e 67 mostraram aumento. Adicionalmente, foi observada grande amplitude dos valores; nos concretos com 100% de substituição houve variações entre 0,2% e 63% na resistência à compressão em relação ao concreto de referência (OLIVEIRA, 2021b).

Além da resistência à compressão, o módulo de elasticidade também é impactado pelo

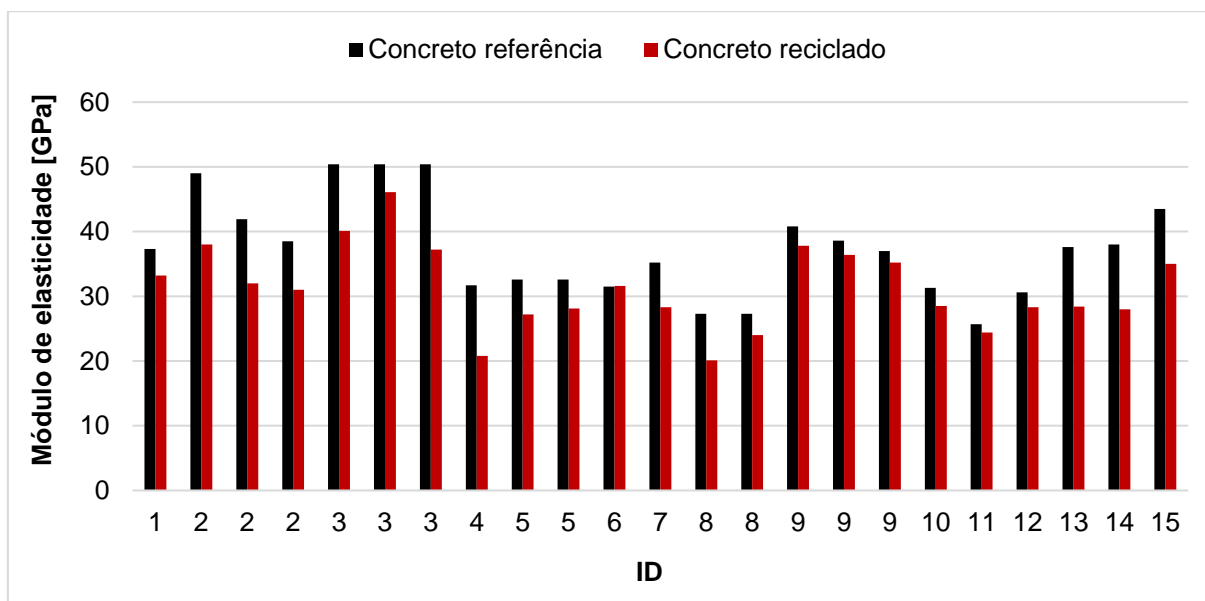
uso do ARC. Diferentemente da resistência à compressão, o módulo de elasticidade tende a seguir um padrão. Em geral, como o concreto reciclado é mais poroso que o convencional, sua deformabilidade tende a ser maior e, com isso, o módulo de elasticidade diminui (BARBUDO *et al.*, 2013; RANGEL, 2019; SALLES *et al.*, 2021; FURINI; TRIGO, 2022). A Tabela 2-5 ilustra valores de módulo de elasticidade de concretos com 100% de substituição e, para todos os dados avaliados, ocorreu redução no módulo de elasticidade (Gráfico 2-2).

**Tabela 2-5: Influência da substituição total do agregado graúdo por agregado reciclado no módulo de elasticidade**

ID	Autor	Concreto de referência [GPa]	Concreto reciclado [GPa]	
1	Gonçalves (2001)	37,3	33,2 (-11,0%)	
2	Barbudo <i>et al.</i> (2013)	49,0	38,0 (-22,4%)	
2		41,9	32,0 (-23,6%)	
2		38,5	31,0 (-19,5%)	
3	Andreu e Miren (2014)	50,4	40,1 (-20,4%)	
3			46,1 (-8,5%)	
3			37,2 (-26,2%)	
4	Folino e Xargay (2014)	31,7	20,8 (-34,4%)	
5	Adams <i>et al.</i> (2016)	32,6	27,2 (-16,6%)	
5			28,1 (-13,8%)	
6	Campos <i>et al.</i> (2018)	31,5	31,6 (+0,3%)	
7	Junior (2018)	35,2	28,3 (-19,6%)	
8	Dimitriou e Savva e Petrou (2018)	27,3	20,1 (-26,4%)	
8			24,0 (-12,1%)	
9	Fiol <i>et al.</i> (2018)	40,8	37,8 (-7,4%)	
9			38,6	36,4 (-5,7%)
9			37,0	35,2 (-4,9%)
10	Gerin (2020)	31,3	28,5 (-9,0%)	
11	Africano (2021)	25,7	24,4 (-5,0%)	
12	Salles <i>et al.</i> (2021)	30,6	28,3 (-7,5%)	
13	Zhang <i>et al.</i> (2022)	37,6	28,4 (-24,5%)	
14	Tang <i>et al.</i> (2022)	38,0	28,0 (-26,3%)	
15	Adessina e Fraj e Barthélémy (2023)	43,5	35,0 (-19,5%)	

Fonte: Elaborada pelo autor

**Gráfico 2-2: Comparação entre valores do módulo de elasticidade de concretos reciclados com 100% de substituição e concretos de referência (apenas agregado natural)**



Fonte: Elaborada pelo autor

De forma geral, a resistência à compressão pode sofrer reduções ou aumentos em relação ao concreto de referência, a depender do tratamento prévio dos agregados reciclados e da correção de água da mistura. Quanto ao módulo de elasticidade, os resultados disponíveis mostram redução devido à menor massa específica do agregado reciclado (Gráfico 2-2).

Uma vez que a substituição total pode impactar desfavoravelmente as características do concreto reciclado, vários estudos avaliaram menores teores de substituição com, por exemplo, substituições parciais de 30%, 50%, 70%, *etc.* Nestes casos, características como resistência à compressão e módulo de elasticidade também são afetadas. A resistência à compressão apresenta comportamento diverso, sem relação proporcional entre o teor de substituição e a resistência à compressão. Uma síntese de valores de resistência a compressão para diferentes teores de substituição é apresentada na Tabela 2-6 e Gráfico 2-3.

**Tabela 2-6: Comparação entre valores de resistência à compressão de concretos reciclados com diferentes teores de substituição e concretos de referência (apenas agregado natural) (continua)**

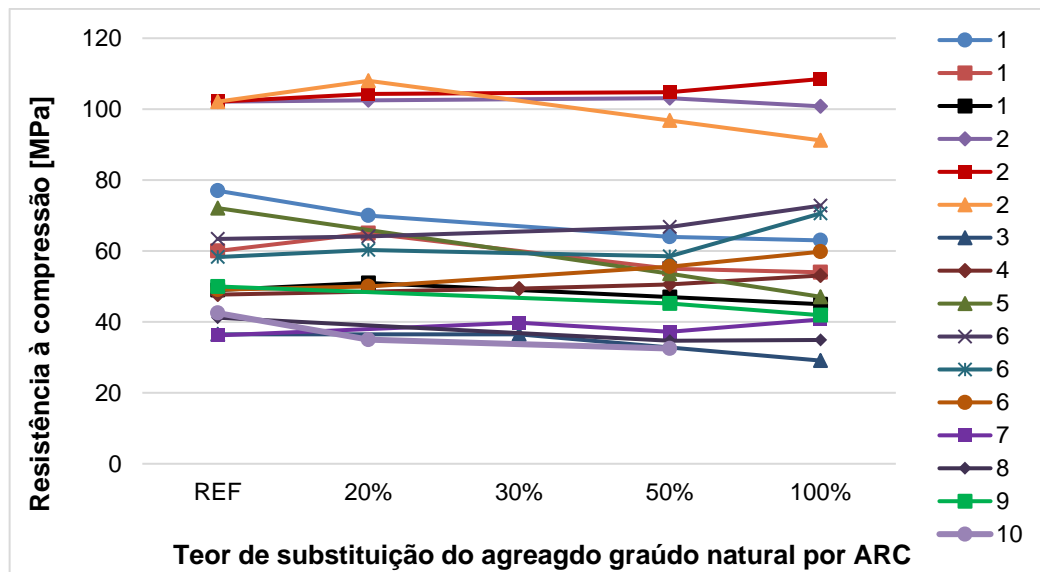
ID	Autor	Concreto de referência [MPa]	Concreto reciclado [MPa]			
			20%	30%	50%	100%
1	Barbudo <i>et al.</i> (2013)	77,0	70,0 (-9,1%)	-	64,0 (-16,9%)	63,0 (-18,2%)
1		60,0	65,0 (+8,3%)	-	55,0 (-8,3%)	54,0 (-10,0%)
1		49,0	51,0 (+4,1%)	-	47,0 (-4,1%)	45,0 (-8,2%)

**Tabela 2-6: Comparação entre valores de resistência à compressão de concretos reciclados com diferentes teores de substituição e concretos de referência (apenas agregado natural) (continuação)**

ID	Autor	Concreto de referência [MPa]	Concreto reciclado [MPa]			
			20%	30%	50%	100%
2	Andreu e Miren (2014)	102,1	102,5 (+0,4%)	-	103,1 (+1,0%)	100,8 (-1,3%)
2			104,3 (+2,2%)	-	104,8 (+2,6%)	108,5 (+6,3%)
2			108,0 (+5,8%)	-	96,8 (-5,2%)	91,2 (-10,7%)
3	Folino e Xargay (2014)	36,5	-	36,5 (-)	-	29,1 (-20,3%)
4	Junior (2018)	47,7	-	49,4 (+3,6%)	50,6 (+6,1%)	53,1 (-19,6%)
5	Dimitriou e Savva e Petrou (2018)	72,1	-	-	64,2 (-11,0%)	60,2 (-16,5%)
5			-	-	53,6 (-25,7%)	47,1 (-34,7%)
6	Fiol <i>et al.</i> (2018)	63,4	64,1 (+1,1%)	-	66,8 (+5,4%)	72,8 (+14,8%)
6		58,3	60,3 (+3,4%)	-	58,5 (+0,3%)	70,6 (+21,1%)
6		49,1	50,0 (+1,8%)	-	55,6 (+13,2%)	59,8 (+21,8%)
7	Gerin (2020)	36,2	-	39,8 (+9,9%)	37,2 (+2,8%)	40,7 (+12,4%)
8	Africano (2021)	41,2	-	-	34,7 (-15,8%)	34,9 (-15,3%)
9	Salles <i>et al.</i> (2021)	50,0	-	-	45,2 (-9,6%)	41,9 (-16,2%)
10	Silva <i>et al.</i> (2023)	42,5	35,0 (-17,6%)	-	32,5 (-23,5%)	-

Fonte: Elaborada pelo autor

**Gráfico 2-3: Comparação entre valores de resistência à compressão de concretos reciclados com diferentes teores de substituição**



Fonte: Elaborada pelo autor

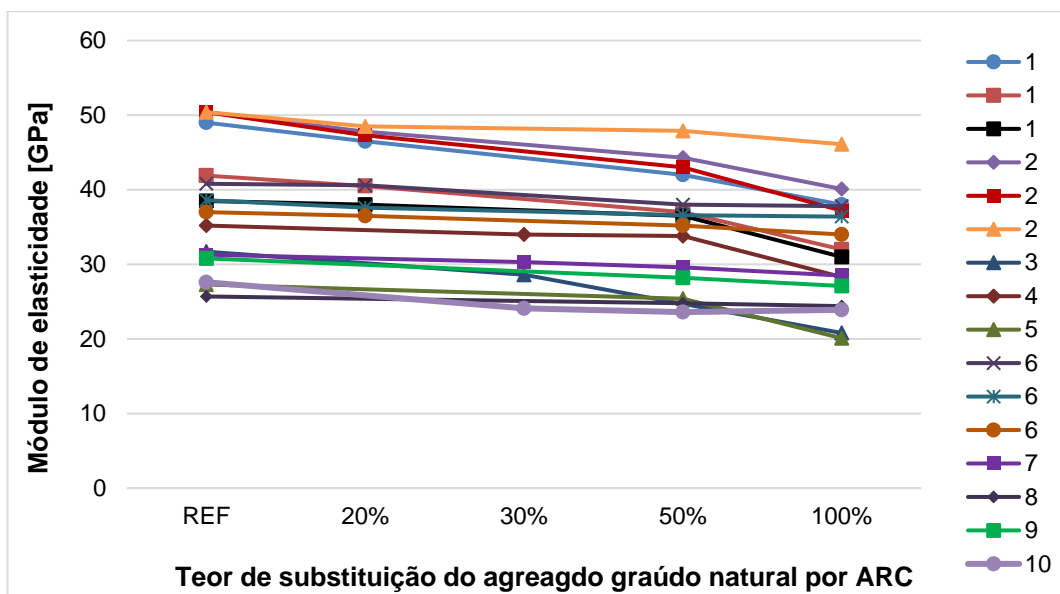
Já o módulo de elasticidade, como depende diretamente da densidade do concreto, tende a seguir um padrão; maiores teores de substituição causam maiores reduções do módulo de elasticidade (Tabela 2-7, Gráfico 2-4).

**Tabela 2-7: Comparação entre valores do módulo de elasticidade de concretos reciclados com diferentes teores de substituição e concretos de referência (apenas agregado natural)**

ID	Autor	Concreto de referência [GPa]	Concreto reciclado [GPa]			
			20%	30%	50%	100%
1	Barbudo <i>et al.</i> (2013)	49,0	46,5 (-5,1%)	-	42,0 (-14,3%)	38,0 (-22,4%)
1		41,9	40,5 (-3,3%)	-	37,0 (-11,7%)	32,0 (-23,6%)
1		38,5	38,0 (-1,3%)	-	36,5 (-5,2%)	31,0 (-19,5%)
2	Andreu e Miren (2014)	50,4	47,8 (-5,2%)	-	44,3 (-12,1%)	40,1 (-20,4%)
2			47,3 (-6,2%)	-	43,0 (-14,7%)	37,2 (-26,2%)
2			48,5 (-3,8%)	-	47,9 (-5,0%)	46,1 (-8,5%)
3	Folino e Xargay (2014)	31,7	-	28,6 (-9,8%)	-	20,8 (-34,4%)
4	Junior (2018)	35,2	-	34,0 (-3,4%)	33,8 (-4,0%)	28,3 (-19,6%)
5	Dimitriou e Savva e Petrou (2018)	27,3	-	-	25,9 (-5,1%)	24,0 (-12,1%)
5			-	-	25,4 (-7,0%)	20,1 (-26,4%)
6	Fiol <i>et al.</i> (2018)	40,8	40,6 (-0,5%)	-	38,0 (-6,9%)	37,8 (-7,4%)
6		38,6	37,6 (-2,6%)	-	36,6 (-5,2%)	36,4 (-5,7%)
6		37,0	36,5 (-1,4%)	-	35,2 (-4,9%)	34,0 (-8,1%)
7	Gerin (2020)	31,3	-	30,3 (3,2%)	29,6 (-5,4%)	28,5 (-8,9%)
8	Africano (2021)	25,7	-	-	24,8 (-3,5%)	24,4 (-5,1%)
9	Salles <i>et al.</i> (2021)	30,8	-	-	28,2 (-8,4%)	27,1 (-12,0%)
10	Cui <i>et al.</i> (2023)	27,6	-	24,1 (-12,7%)	23,6 (-15,5%)	23,9 (-13,4%)

Fonte: Elaborada pelo autor

**Gráfico 2-4: Comparação entre valores do módulo de elasticidade de concretos reciclados com diferentes teores de substituição e concretos de referência (apenas agregado natural)**



Fonte: Elaborada pelo autor

Portanto, fica evidente que o concreto reciclado pode apresentar uma variabilidade considerável em suas características mecânicas. Porém, concretos com 100% de agregado graúdo reciclado podem apresentar valores de resistência a compressão e módulo de elasticidade compatíveis com concretos estruturais.

## 2.2. EFEITO DE CONFINAMENTO E COMPORTAMENTO DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS DE SEÇÃO CIRCULAR

Os documentos apresentados na Tabela 2-8 abordam estudos de pilares mistos preenchidos de seção circular com ênfase no uso do concreto reciclado. A Tabela 2-8 apresenta uma pequena síntese de cada documento.

Dentre as características do pilar misto preenchido de seção circular, destaca-se o efeito de confinamento. Este efeito surge devido à restrição à expansão do concreto e pode levar a força normal resistente a ultrapassar a soma das parcelas resistentes dos componentes de aço e de concreto (JOHANSSON; GYLLTOFT, 2002; OLIVEIRA, 2008; ZHAO *et al.*, 2018; GERIN, 2020).



Tabela 2-8: Síntese dos documentos do presente capítulo

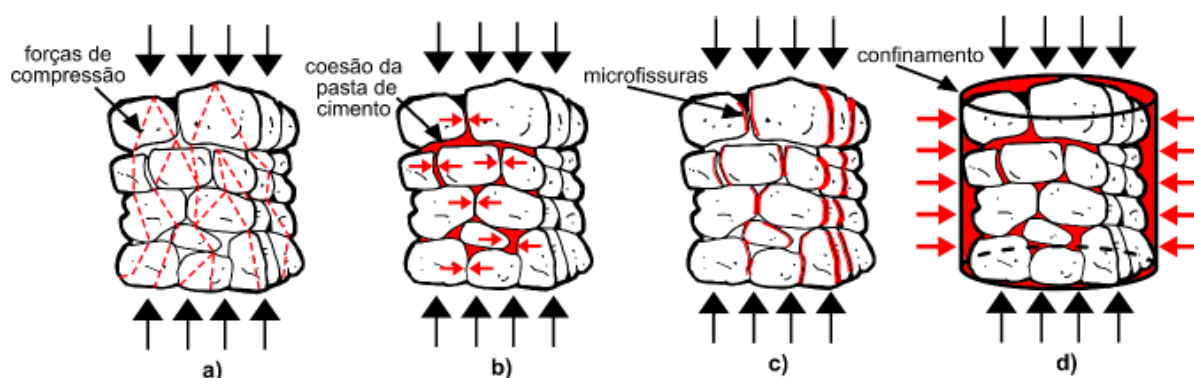
Documento	Tipo de estudo	Solicitação	Desenvolvimento de pesquisa
Chen <i>et al.</i> (2010)	Experimental	Compressão centrada	Ensaio de 22 pilares mistos de seção circular preenchidos com concreto reciclado
Mohanraj e Kandasamy e Malathy (2011)	Experimental	Compressão centrada	Apresentação de perfis quadrados de aço feitos com concreto reciclado sob compressão axial
Yang e Ma (2013)	Experimental	Compressão centrada	Estudo de pilares e vigas mistas utilizando concreto reciclado
Tam e Wang e Tao (2014)	Experimental	Compressão centrada	Avaliação de aço de qualidade inferior em pilares mistos de aço-concreto, utilizando também concreto reciclado
Chen <i>et al.</i> (2014)	Experimental	Compressão centrada	Comparação de pilares mistos feitos com concreto convencional e concreto reciclado
Wang e Chen e Geng (2015)	Experimental	Compressão centrada	Ensaio de 39 pilares mistos contento concreto reciclado, variando diversos parâmetros
Dong e Wang e Guan (2016)	Experimental	Compressão centrada	Avaliação de um total de 10 pilares mistos de seção circular com concreto reciclado
Chen <i>et al.</i> (2017)	Experimental	Compressão centrada e excêntrica	Combinação de carregamentos em pilares mistos feitos com concreto reciclado
Ma <i>et al.</i> (2018)	Experimental	Compressão centrada	Estudo de pilares mistos de seção circular sob compressão centrada
Ma <i>et al.</i> (2019a)	Experimental	Compressão centrada	Avaliação de pilares mistos quadrados, variando alguns parâmetros
Ma <i>et al.</i> (2019b)	Experimental	Compressão excêntrica	Avaliação de carregamentos excêntricos em pilares mistos com concreto reciclado
Xu <i>et al.</i> (2019)	Teórico	-	Desenvolvimento de equações para estimar a rigidez equivalente de pilares mistos com concreto reciclado
Nour e Güneyisi (2019)	Teórico	-	Estudo de equações para estimar a força resistente normal de pilares mistos com concreto reciclado
Gerin (2020)	Experimental	Compressão centrada	Estudo de pilares mistos circulares sob diferentes aplicações de cargas
Azevedo <i>et al.</i> (2021)	Experimental	Compressão centrada	Investigação de pilares com concreto reciclado variando o diâmetro e a resistência ao escoamento do perfil de aço
Lyu e Han e Hou (2021)	Experimental / Numérico	Compressão centrada	Desenvolvimento do modelo numérico com base nos modelos experimentais de pilares mistos com concreto reciclado
Zhao <i>et al.</i> (2021)	Experimental	Compressão centrada	Avaliação do uso de agregados graúdos e miúdos reciclados em pilares mistos

Fonte: Elaborada pelo autor

De Nardin (1999) divide o efeito de confinamento em duas fases. A primeira acontece nos primeiros estágios de carregamento, quando as deformações longitudinais no concreto são maiores que no aço, devido aos coeficientes de Poisson. Com isso, surgem tensões radiais nos componentes, o concreto se apresenta sob estado triaxial de tensões, já o aço está em um estado biaxial de tensões. Na segunda fase as tensões no aço atingem a resistência ao escoamento e o perfil não consegue mais conter a expansão do concreto. Desse modo, se o carregamento é mantido, ocorre esmagamento do concreto e flambagem local do aço.

Gerin (2020), por outro lado, divide o confinamento do concreto pelo tubo de aço em 4 etapas (Figura 2-2). Em uma primeira etapa as tensões percorrem as partículas de concreto (Figura 2-2a); para haver equilíbrio, surgem forças laterais (Figura 2-2b), em seguida surgem microfissuras (Figura 2-2c) e, com a expansão do concreto e a contenção do perfil de aço, o efeito de confinamento é mobilizado (Figura 2-2d).

**Figura 2-2: Etapas do confinamento do concreto pelo tubo de aço**



Fonte: Gerin (2020)

Diversas variáveis interferem no efeito de confinamento, como: excentricidade da força, esbeltez local, índice de esbeltez do pilar misto, resistência dos materiais (aço e concreto) e forma da seção transversal. Até o momento, devido à complexidade do efeito de confinamento, este é levado em conta de forma simplificada nas normas técnicas vigentes. Por isso, diversos autores têm desenvolvido modelos matemáticos que representem, de forma mais adequada, o confinamento do concreto pelo tubo de aço (JOHANSSON; GYLLTOFT, 2002; , HATZIGEORGIOU, 2008; ZHAO *et al.*, 2018).

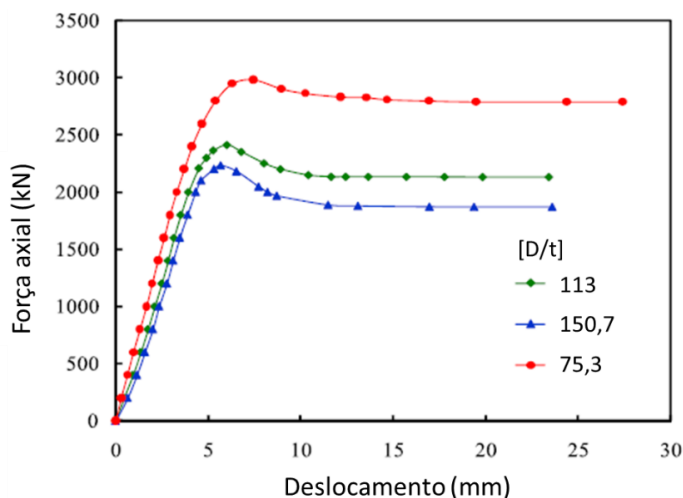
Dentre os elementos que alteram a intensidade do efeito de confinamento, aqueles relacionados ao concreto se destacam. A resistência à compressão altera tanto a capacidade resistente, quanto o comportamento do pilar misto (OLIVEIRA, 2008; ZHAO *et al.*, 2018). Zhao *et al.* (2018) variaram a resistência à compressão do concreto de 28 MPa a 52 MPa e observaram que o exemplar com concreto de maior resistência, atingiu a ruptura mais

rapidamente. Dessa forma, a falha ocorreu com menores deformações que os exemplares de menor resistência, indicando uma menor intensidade no efeito de confinamento. O aumento da resistência à compressão do concreto leva ao aumento da capacidade resistente do pilar, porém, o comportamento se torna menos dúctil devido à menor deformabilidade do concreto e, conseqüentemente, o efeito de confinamento é menor (XU *et al.*, 2019; NOUR; GÜNEYISI, 2019; GERIN, 2020).

Outro fator que influencia o efeito de confinamento é a esbeltez do pilar misto. No que se refere a esbeltez global (Comprimento L / Diâmetro D), Chen *et al.* (2017), Ma *et al.* (2018) e Yu *et al.* (2020) constataram, experimentalmente, que quanto maior a esbeltez, menor a força normal resistente. Isso está diretamente ligado à ocorrência de falha por instabilidade antes que o pico de resistência dos materiais seja atingido. Nesse sentido, a intensidade do efeito de confinamento é menor porque o concreto não atinge níveis de deformação suficientes para mobilizar efetivamente o confinamento pois a falha por instabilidade ocorre antes. A redução na capacidade resistente também está ligada à resistência do concreto, quanto maior essa, mais acentuada é a queda na força normal resistente com o aumento da esbeltez (OLIVEIRA, 2008).

O estudo da influência da esbeltez local (Diâmetro D / espessura t) visa utilizar perfis de aço de menor espessura e, conseqüentemente, reduzir o consumo de aço. Porém, essa redução afeta diretamente a força normal resistente e o comportamento da curva Tensão vs. Deformação. Mohanraj e Kandasamy e Malathy (2011), Wang e Chen e Geng (2015), Ma *et al.* (2018) e Ma *et al.* (2019a) avaliaram experimentalmente a influência da relação D/t e verificaram que, quanto maior a esbeltez, menor a força normal resistente do pilar; a expansão lateral do concreto causa instabilidade local do perfil de aço reduzindo o efeito de confinamento e a capacidade resistente. A Figura 2-3 ilustra a influência da esbeltez local sobre o comportamento e a capacidade resistente de pilares mistos preenchidos. A grande maioria das normas técnicas impõe limites para a relação D/t a fim de evitar a falha por instabilidade local.

**Figura 2-3: Influência da relação D/t no comportamento do pilar preenchido de seção circular**



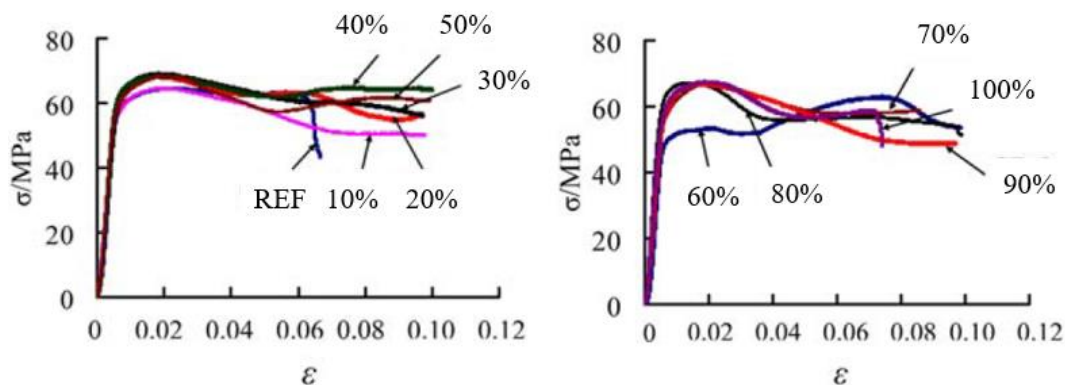
Fonte: Adaptado de Ma (2018)

A forma da seção transversal também impacta no efeito de confinamento, e isso é refletido no uso do concreto reciclado nos pilares mistos preenchidos. Yang e Ma (2013) observaram que pilares preenchidos de seção circular apresentaram valores de força resistente maiores que os pilares de seção quadrada. A substituição total do agregado graúdo natural por agregado reciclado resultou em redução de cerca de 6% na força normal resistente dos pilares de seção circular enquanto naqueles de seção quadrada a redução foi de 10%. Esta diferença pode ser atribuída ao maior efeito de confinamento nas seções circulares.

No que se refere à força normal resistente de pilares preenchidos com concreto reciclado, os estudos disponíveis na literatura mostram que o procedimento padrão de investigação é variar o teor de agregado reciclado e avaliar o efeito dessa variação sobre a força normal resistente (MA *et al.*, 2018; MA *et al.* 2019b; GERIN, 2020; AZEVEDO *et al.*, 2021).

O efeito do teor de substituição sobre o comportamento de pilares mistos foi avaliado por Chen *et al.* (2014) por meio de curvas experimentais Tensão vs. Deformação (Figura 2-4) para teores entre 10% e 100%. No trecho ascendente (Figura 2-4) não houve influência significativa; porém, no trecho pós-pico houve variação de comportamento em função do teor de substituição. Esta variação no comportamento pós-pico pode ser resultado da variação na intensidade do confinamento que, por sua vez, foi gerada pela variação no teor de agregado reciclado no concreto.

**Figura 2-4: Influência do teor de substituição no comportamento Tensão vs. Deformação de pilares mistos preenchidos com concreto reciclado**



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2014)

Azevedo *et al.* (2021) ensaiaram 27 pilares preenchidos com concreto reciclado; as variáveis analisadas foram a relação diâmetro/espessura, o teor de agregado reciclado e o comprimento do pilar misto. A análise do confinamento se baseou em subtrair, da força normal resistente total obtida experimentalmente, as parcelas resistentes atribuídas ao concreto e ao aço ( $A_c \cdot f_{ck}$  e  $A_s \cdot f_y$ , respectivamente). Foi obtido aumento médio de 27% na força normal resistente em relação à soma das parcelas resistentes correspondentes a cada componente. A diferença foi atribuída ao efeito de confinamento. Estes resultados indicam a necessidade de levar em conta, de forma adequada, o efeito de confinamento.

Assim como ocorre em pilares preenchidos com concreto convencional, naqueles preenchidos com concreto reciclado, a força normal resistente depende, além da contribuição dos componentes, das instabilidades do perfil tubular. Neste caso, quanto maior a esbeltez do elemento misto, menor sua capacidade resistente. Além disso, o aumento da esbeltez global reduz o efeito de confinamento, acentuando a redução da capacidade resistente e antecipando o escoamento do aço do perfil ou a ocorrência de instabilidade por flexão.

A Tabela 2-9 e Gráfico 2-5 ilustram valores de força normal resistente de pilares mistos de seção circular preenchidos com concreto reciclado e substituição total do agregado graúdo. Nesta tabela foram incluídos os valores de resistência à compressão do concreto convencional e reciclado utilizados nos pilares mistos.

**Tabela 2-9: Força normal resistente de pilares de seção circular preenchidos com concreto reciclado (substituição total) e com concreto convencional**

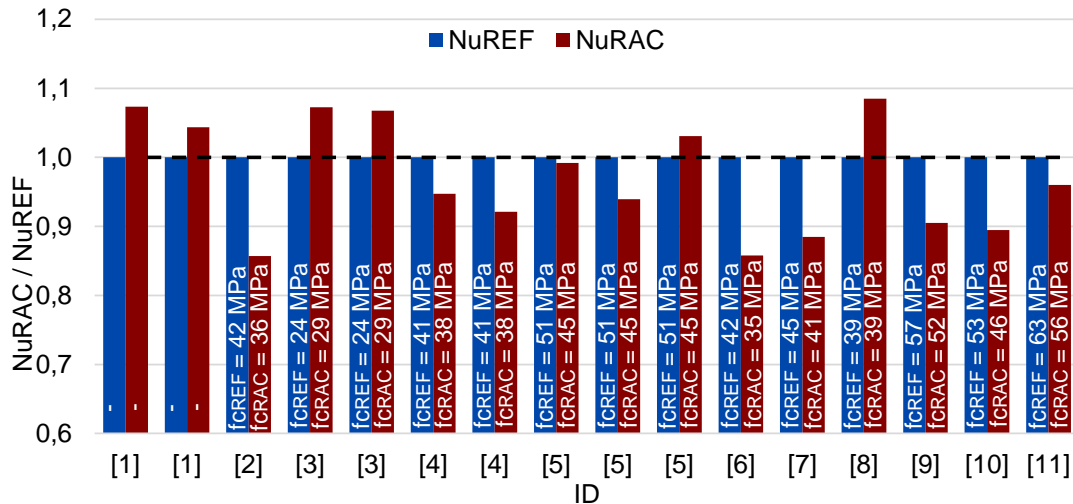
ID	Documento	$f_{cref}$ [MPa]	$f_{cRAC}$ [MPa]	$N_{uref}$ [kN]	$N_{uRAC}$ [kN]
1	Chen <i>et al.</i> (2010)	-	-	504,0	540,7 (+7,3%)
1				636,4	680,0 (+34,9%)
2	Hou <i>et al.</i> (2013)	42,1	35,5 (-15,6%)	650	557 (-14,3%)
3	Chen <i>et al.</i> (2014a)	23,6	29,2 (+23,7%)	504,4	541,0 (+7,3%)
3				636,8	679,7 (+6,7%)
4	Tam e Wang e Tao (2014)	41,2	37,8 (-8,2%)	1211,6	1147,5 (-5,3%)
4				1707,5	1573,1 (-7,9%)
5	Wang e Chen e Geng (2015)	50,6	45,3 (-10,4%)	1115,0	1106,0 (-0,8%)
5				1520,0	1428,0 (-6,1%)
5				1336,0	1377,0 (+ 3,1%)
6	Dong e Wang e Guan (2016)	42,0	34,5 (-17,8%)	650,0	557,5 (-14,2%)
7	Ma <i>et al.</i> (2018)	45,0	41,3 (-8,2%)	2727,2	2412,7 (-11,53%)
8	Gerin (2020)	39,4	38,7 (-1,8%)	1229,2	1377,1 (+12,0%)
9	Lyu e Han e Hou (2021)	57,2	51,6 (-9,8%)	1679,1	1519,4 (-9,5%)
10	Zhao <i>et al.</i> (2021)	53,2	45,7 (-14,1%)	1759,0	1574,0 (-10,5%)
11	Han e Xu e Hou (2022)	62,5	56,3 (-10,0%)	2857,3	2743,5 (-4,0%)

$f_{cref}$ : resistência à compressão do concreto de referência (agregados naturais)  
 $f_{cRAC}$ : resistência à compressão do concreto reciclado (ARC)  
 $N_{uref}$ : força normal resistente do pilar preenchido com concreto de referência  
 $N_{uRAC}$ : força normal resistente do pilar preenchido com concreto reciclado

Fonte: Elaborada pelo autor

Os dados apresentados até o momento evidenciam a influência da substituição do agregado reciclado nos valores da força normal resistente. Contudo, a influência pode estar relacionada à variação da resistência dos concretos reciclados em relação aos concretos de referência. Pelo Gráfico 2-5, há relação direta entre a resistência à compressão e a força normal resistente; na grande maioria dos casos, pilares preenchidos com concretos cuja resistência à compressão diminuiu devido ao uso do ARC, apresentaram redução na força normal resistente. Em contrapartida, quando a substituição do agregado natural por ARC resultou em aumento da resistência do concreto, a força resistida pelo pilar também aumentou [ID 3, Gráfico 2-5]. Houve apenas um caso que não seguiu esse comportamento (ID 5, Gráfico 2-5), em que houve redução da resistência à compressão e aumento da força normal resistente.

**Gráfico 2-5: Força normal resistente de pilares preenchidos com concreto reciclado (substituição total) e com concreto convencional**



Fonte: Elaborada pelo autor

A variação da força normal resistente pode não estar relacionada apenas à resistência à compressão do concreto. Por exemplo, os três resultados de Wang e Chen e Geng (2015) [ID 5] apresentados na Tabela 2-9 e Gráfico 2-5, mostram variação apenas das características geométricas. Para cada configuração, foi realizada um ensaio de pilar preenchido com concreto convencional e reciclado, e os valores de força resistente para pilares com concreto reciclado oscilaram, dois dos ensaios apresentaram redução e um ensaio aumento.

### 2.3. PREVISÃO DA FORÇA NORMAL RESISTENTE À COMPRESSÃO AXIAL CENTRADA

Atualmente, existem diversas normas que apresentam recomendações para a verificação de pilares mistos à compressão axial centrada. Dentre estas normas estão a ABNT NBR 8800 (2008), o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) e a AS/NZS 2327 (2016). É importante ressaltar que até o momento não há norma nacional ou estrangeira que contemple o uso de concretos reciclados em elementos mistos de aço e concreto.

A ABNT NBR 8800 (2008), o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) e a AS/NZS 2327 (2016) adotam a Equação (2-1) para previsão da força normal resistente a compressão axial.

$$N_{Rd} = \chi \cdot N_{pl,Rd} \quad (2-1)$$

Sendo:

$N_{Rd}$ : Força normal resistente a compressão axial centrada, valor de cálculo;

$N_{pl,Rd}$ : Força normal resistente à plastificação total da seção mista, valor de cálculo;

$\chi$ : coeficiente que leva em conta a instabilidade por flexão.

Contudo, a falha por instabilidade local não é prevista e, a fim de evitá-la, a ABNT NBR 8800 (2008), o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) e a AS/NZS 2327 (2016) limitam a relação diâmetro-espessura ( $D/t$ ), respectivamente aos limites mostrados nas Equações (2-2), (2-3) e (2-4).

$$\frac{D}{t} \leq \frac{0,15E_a}{f_{yd}} \quad (2-2)$$

$$\frac{D}{t} \leq 90 \frac{235}{f_{yd}} \quad (2-3)$$

$$\frac{D}{t} \leq \frac{0,19E_a}{f_{yd}} \quad (2-4)$$

Sendo:

D: Diâmetro do perfil de aço;

t: Espessura do perfil de aço;

$E_a$ : Módulo de elasticidade do perfil de aço;

$f_{yd}$ : Resistência ao escoamento do perfil de aço, valor de cálculo.

Além disso, há limitações para a resistência dos materiais (Tabela 2-10).

**Tabela 2-10: Limitações de resistência dos materiais para cada norma**

Norma	Resistência ao escoamento do perfil de aço	Resistência à compressão do concreto
ABNT NBR 8800 (2008)	$250 \leq f_y \leq 450$	$20 \leq f_{ck} \leq 50$
Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004)	$235 \leq f_y \leq 460$	$20 \leq f_{ck} \leq 60$
AS/NZS 2327 (2016)	$f_y \leq 690$	$20 \leq f_{ck} \leq 50$

Fonte: Elaborada pelo autor

A força normal resistente à plastificação total  $N_{pl,Rd}$  leva em conta a contribuição de cada componente da seção mista bem como o efeito de confinamento. A ABNT NBR 8800 (2008) considera o efeito de confinamento de forma simplificada, por meio do parâmetro  $\alpha$ , que vale 0,95 para pilares circulares e 0,85 para os demais pilares mistos. Já o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) diferentemente da ABNT NBR 8800 (2008), ao levar em conta o efeito de confinamento do pilar misto preenchido, considera: coeficiente que leva em conta o efeito de confinamento, a relação entre espessura e diâmetro do tubo e a relação entre resistências do aço e do concreto. Por fim, a AS/NZS 2327 (2016) também adota um modelo mais detalhado, considerando um fator de redução para o perfil de aço, e um modelo similar ao do Eurocode



4 (EN 1994-1-1:2004) para o concreto, porém com um fator adicional de redução.

Assim, a força normal resistente à plastificação total da seção mista circular pode ser estimada, segundo a ABNT NBR 8800 (2008), o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) e a AS/NZS 2327 (2016) pelas Equações (2-5), (2-6) e (2-7).

$$N_{pl,Rd} = f_{yd} \cdot A_a + \alpha f_{cd} \cdot A_c + f_{sd} \cdot A_s \quad (2-5)$$

$$N_{pl,Rd} = \eta_a \cdot f_{yd} \cdot A_a + f_{cd} \cdot A_c \left( 1 + \eta_c \cdot \frac{t}{D} \cdot \frac{f_{yk}}{f_{ck}} \right) + f_{sd} \cdot A_s \quad (2-6)$$

$$N_{pl,Rd} = \varphi \cdot k_f \cdot \eta_a \cdot f_{yd} \cdot A_a + \varphi_c \cdot f_{cd} \cdot A_c \left( 1 + \eta_c \cdot \frac{t}{D} \cdot \frac{f_{yk}}{f_{ck}} \right) + \varphi \cdot f_{sd} \cdot A_s \quad (2-7)$$

Sendo:

$f_{yd}$ : Resistência ao escoamento do perfil de aço, valor de cálculo;

$A_a$ : Área da seção transversal do perfil de aço;

$\alpha$ : Fator que leva em conta o efeito de confinamento;

$A_c$ : Área da seção transversal de concreto;

$f_{cd}$ : Resistência à compressão do concreto, valor de cálculo;

$f_{sd}$ : Resistência ao escoamento das armaduras longitudinais, valor de cálculo;

$A_s$ : Área da seção transversal das armaduras longitudinais;

$\eta_a$ : Coeficiente redutor devido ao efeito de confinamento na seção de aço;

$\eta_c$ : Coeficiente que leva em conta o efeito de confinamento na seção de concreto;

$D$ : Diâmetro externo do perfil de aço;

$t$ : Espessura do perfil de aço;

$\varphi$ : Fator de redução do aço em função do carregamento, dado através de tabela;

$\varphi_c$ : Fator de redução do concreto em função do carregamento, dado através de tabela;

$k_f$ : Fator de forma;

Os coeficientes  $\eta_a$ ,  $\eta_c$  e  $k_f$  são determinados pelas Equações (2-8), (2-9) e (2-10), respectivamente.

$$\eta_a = 0,25 \cdot (3 + 2\lambda_{o,m}) \leq 1,0 \quad (2-8)$$

$$\eta_c = 4,9 - 18,5 \cdot \lambda_{o,m} + 17 \cdot (\lambda_{o,m})^2 \geq 0,0 \quad (2-9)$$

$$k_f = \frac{A_e}{A_g} \quad (2-10)$$

Sendo:

$\lambda_{o,m}$ : índice de esbelteza reduzido do pilar misto.

$A_e$ : Área efetiva da seção;

$A_g$ : Área bruta da seção;

Dessa forma, a esbelteza modificada  $\lambda_{o,m}$  e a área  $A_e$  são definidos pelas Equações (2-11) e (2-12).

$$\lambda_{o,m} = \sqrt{\frac{N_{pL,R}}{N_e}} \quad (2-11)$$

$$A_e = \text{MENOR} \left( \frac{\pi \cdot \left( D \cdot \sqrt{\frac{125}{\lambda_e}} \right)^2}{4}; \frac{\pi \cdot \left( D \cdot \left( \frac{375}{\lambda_e} \right)^2 \right)^2}{4} \right) \quad (2-12)$$

Sendo:

$N_e$ : Força crítica de flambagem elástica;

$\lambda_e$ : Parâmetro de esbelteza.

Por fim,  $N_e$  e  $\lambda_e$  podem ser calculados pelas Equações (2-13) e (2-14).

$$N_e = \frac{\pi^2 \cdot (EI)_e}{(KL)^2} \quad (2-13)$$

$$\lambda_e = \frac{D \cdot f_y}{250t} \quad (2-14)$$

Sendo:

$N_{pL,R}$ : Normal de plastificação, considerando valores característicos de resistência dos materiais;

$N_e$ : Força crítica de flambagem elástica;

$(EI)_e$ : Rigidez efetiva a flexão;

$K$ : Coeficiente que leva em conta as condições de vinculação;

$L$ : Comprimento efetivo.

O coeficiente  $\chi$  está ligado à instabilidade por flexo-compressão. Para a ABNT NBR 8800 (2008) este parâmetro depende do índice de esbelteza modificado do pilar misto, considerando apenas uma curva de resistência, composta por dois trechos. As Equações (2-15) e (2-16) ilustram esse cálculo.

$$\lambda_{o,m} \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658\lambda_{o,m}^2 \quad (2-15)$$

$$\lambda_{o,m} > 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{\lambda_{o,m}^2} \quad (2-16)$$

O Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004), por outro lado, considera quatro curvas de

resistência, a depender do tipo de perfil de aço. O coeficiente  $\chi$  é determinado pela Equação (2-17) e depende do índice de esbelteza reduzida do pilar misto e do parâmetro  $\alpha$  que leva em conta as imperfeições iniciais (Equação (2-18)).

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{o,m}^2}} \leq 1,0 \quad (2-17)$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\lambda_{o,m} - 0,2) + \lambda_{o,m}^2] \quad (2-18)$$

Sendo:

$\alpha$ : Valor que considera o efeito das imperfeições locais e depende da curva de resistência Tabela 2-11).

**Tabela 2-11: Fator de imperfeição ( $\alpha$ ) para pilares mistos preenchidos de seção circular**

Classe de resistência	S235 / S275 / S355 / S420	S460
Perfis laminados a quente	Curva a - $\alpha = 0,21$	Curva a <sub>0</sub> - $\alpha = 0,13$
Perfis laminados a frio	Curva c - $\alpha = 0,49$	Curva c - $\alpha = 0,49$

Fonte: Elaborada pelo autor

Já a AS/NZS 2327 (2016) apresenta as Equações (2-19) a (2-24) segundo as quais o parâmetro  $\chi$  depende de diversos parâmetros, inclusive da taxa de armadura longitudinal.

$$\chi = \xi \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{90}{\xi \lambda} \right)^2} \right] \quad (2-19)$$

$$\xi = \frac{\left( \frac{\lambda}{90} \right)^2 + 1 + \eta}{2 \left( \frac{\lambda}{90} \right)^2} \quad (2-20)$$

$$\lambda = \lambda_{\eta} + \alpha_a \cdot \alpha_b \quad (2-21)$$

$$\eta = 0,00326(\lambda - 13,5) \geq 0 \quad (2-22)$$

$$\lambda_{\eta} = 90\lambda_{o,m} \quad (2-23)$$

$$\alpha_a = \frac{2100(\lambda_{\eta} - 13,5)}{\lambda_{\eta}^2 - 15,3\lambda_{\eta} + 2050} \quad (2-24)$$

Sendo:

$\alpha_b$ : Valor que depende do tipo de seção transversal e da taxa de armadura longitudinal. Para seções circulares sem armadura longitudinal,  $\alpha_b=0$ .

Portanto, embora os três procedimentos normativos apresentados tenham abordagens diversas, nenhum deles se aplica a concretos reciclados.

Assim sendo, para prever a força normal resistente de pilares mistos preenchidos com concreto reciclado, é necessário recorrer a propostas de pesquisadores como Ma *et al.* (2018), Nour e Güneyisi (2019), Han e Xu e Hou (2022), Wang *et al.* (2022a) e Chen *et al.* (2023) cujas formulações se baseiam em resultados experimentais (Tabela 2-12).

Neste contexto, as Equações (2-25), (2-26) e (2-27) correspondem à proposta de Ma *et al.* (2018). O conjunto de Equações (2-28) a (2-33) propostas por Nour e Güneyisi (2019) mostram um procedimento diferente daqueles apresentados até o momento. Diferentemente dos modelos anteriores (Equações (2-5), (2-6) e (2-7)), as equações de Nour e Güneyisi (2019) foram produzidas através de algoritmo genético com base em resultados experimentais. Assim, o conjunto de 5 equações consideram as características geométricas, o teor de agregado reciclado ( $r$ ) e a resistência dos materiais.

Por fim, o terceiro, quarto e quinto modelos são mais simplistas, foram desenvolvidos por Han e Xu e Hou (2022) (Equação (2-34)), Wang *et al.* (2022a) (Equação (2-35)) e Chen *et al.* (2023) (Equação (2-36)), respectivamente.

**Tabela 2-12: Modelos analíticos para previsão da força normal resistente de pilares preenchidos com concreto reciclado (continua)**

Modelo	Formulações	Equações
Ma <i>et al.</i> (2018)	$N_{Rd} = \left[ 0,658 \frac{N_{pl,Rd}}{N_e} \right] \cdot N_{pl,Rd}$	(2-25)
	$N_{pl,Rd} = f_{yd} \cdot A_a + \alpha \cdot C_2 f_{cd} \cdot A_c + f_{sd} \cdot A_s$	(2-26)
	$\alpha = 1 - 0,015 \cdot r^2 - 0,079 \cdot r$	(2-27)
Nour e Güneyisi (2019)	$N_{pl,Rd} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5$	(2-28)
	$N_1 = \frac{(398,606 \cdot t + t \cdot L) \cdot (-18,43) - \sqrt{r}}{D}$	(2-29)
	$N_2 = \tan^{-1} \left( (f_y - 31,85) - \left( \frac{L \cdot 2r}{f_{yk}} \right) \right) \cdot D$	(2-30)
	$N_3 = 4,62 + t \cdot (2f_{ck} + D + 17,01)$	(2-31)
	$N_4 = \left( D + \left( \frac{f_{ck} + t}{2f_{ck} + 6,1 + f_{yk} - L} \right) \right) \cdot t$	(2-32)
	$N_5 = (D - \exp(t)) \cdot t$	(2-33)

**Tabela 2-12: Modelos analíticos para previsão da força normal resistente de pilares preenchidos com concreto reciclado (continuação)**

Modelo	Formulações	Equações
Han e Xu e Hou (2022)	$N_{pl,Rd} = \frac{\left(1,14 + 1,02 \cdot \frac{A_a \cdot f_{yk}}{A_c \cdot f_{ck}}\right) \cdot f_{ck} \cdot A_{sc}}{\gamma_{cs1}}$	<b>(2-34)</b>
Wang <i>et al.</i> (2022a)	$N_{pl,Rd} = f_{ck} \cdot A_c + 1,7 \cdot f_{yk} \cdot A_a$	<b>(2-35)</b>
Chen <i>et al.</i> (2023)	$N_{pl,Rd} = \frac{N_{REF}}{\gamma_{cs2}}$	<b>(2-36)</b>
<p>Sendo:</p> <p><math>C_2</math>: 0,95 para seções circulares</p> <p>D: Diâmetro externo do perfil de aço</p> <p><math>f_{yk}</math>: Resistência característica ao escoamento do perfil de aço</p> <p>L: Altura do pilar misto</p> <p><math>N_{REF}</math>: Valores de previsões normativas, para o pilar misto com concreto convencional</p> <p>r: teor de substituição do agregado graúdo natural por ARC</p> <p>t: Espessura do perfil de aço</p> <p><math>\gamma_{cs1}</math>: constante que depende do material e do tipo de uso dos pilares mistos com concreto reciclado</p> <p><math>\gamma_{cs2}</math>: Constante que depende de características físicas e geométricas, além de qual norma técnica foi utilizada para calcular <math>N_{REF}</math>.</p>		

Fonte: Elaborada pelo autor

Verifica-se que as formulações propostas são bastante diversas e que o uso de concretos reciclados requer adequações nas formulações existentes ou o desenvolvimento de novas formulações a fim representar, adequadamente, as particularidades deste tipo de concreto.

## 2.4. ANÁLISE COMPARATIVA: FORÇA NORMAL RESISTENTE

A revisão sistemática de literatura permitiu identificar estudos experimentais sobre pilares mistos preenchidos com concreto reciclado e submetidos a compressão axial centrada. Os dados correspondentes aos modelos ensaiados bem como os valores de força normal resistente foram extraídos nos ensaios. Valores experimentais de força última foram comparados a valores previstos por meio de modelos analíticos apresentados no item anterior. Além destes modelos, a força normal resistente também foi prevista utilizando as formulações normativas. Isto foi feito a fim de avaliar a aplicabilidade das formulações normativas a pilares mistos confeccionados com concreto reciclado.

Assim sendo, foram consideradas as recomendações da ABNT NBR 8800 (2008), do Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) e da AS/NZS 2327 (2016), além dos procedimentos de Ma *et al.* (2018), Nour e Güneyisi (2019), Han e Xu e Hou (2022) e Wang *et al.* (2022a). Nesta análise, os coeficientes de ponderação da resistência dos materiais foram adotados iguais a 1,0.

Enquanto a ABNT NBR 8800 (2008), o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) e a AS/NZS 2327 (2016) não incluem o concreto reciclado, as propostas de Ma *et al.* (2018) e Nour e Güneyisi (2019) apresentam variáveis que levam em conta a presença de agregado reciclado. Todos os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2-13.

**Tabela 2-13: Comparação da força normal resistente de pilares preenchidos com concreto reciclado considerando 100% de agregado reciclado (continua)**

ID	Documento	Experimental [kN]		ABNT NBR 8800 (2008) [kN]	EN 1994-1-1 (2004) [kN]	AS/NZS 2327 (2016) [kN]	Ma <i>et al.</i> (2018) [kN]	Nour e Güneyisi (2019) [kN]	Han e Xu e Hou (2022)	Wang <i>et al.</i> (2022a)
		REF.	RAC.							
1	Chen <i>et al.</i> (2010)	504	541	381 (-30%)	468 (-13%)	360 (-33%)	368 (-32%)	612 (+13%)	454 (-16%)	557 (+3%)
1		649	678	534 (-21%)	654 (-4%)	479 (-29%)	511 (-25%)	822 (+21%)	689 (+2%)	842 (+24%)
2	Chen <i>et al.</i> (2014)	504	541	380 (-30%)	471 (-13%)	361 (-33%)	366 (-32%)	610 (+13%)	450 (-17%)	553 (+2%)
2		637	680	535 (-21%)	654 (-4%)	492 (-28%)	511 (-25%)	823 (+21%)	619 (-9%)	751 (+10%)
3	Tam e Wang e Tao (2014)	1212	1148	922 (-20%)	1107 (-4%)	826 (-28%)	877 (-24%)	1281 (+12%)	1105 (-4%)	1303 (+14%)
3		1708	1573	1322 (-16%)	1571	1162 (-26%)	1253 (-20%)	1661 (+6%)	1477 (-6%)	1677 (+7%)
4	Wang e Chen e Geng (2015)	1115	1106	810 (-27%)	964 (-13%)	713 (-36%)	768 (-31%)	1262 (+14%)	1004 (-9%)	1143 (+3%)
4			1096	810 (-26%)	964 (-12%)	713 (-35%)	768 (-30%)	1262 (+15%)	1001 (-9%)	1139 (+4%)
4		1520	1428	983 (-31%)	1192 (-17%)	905 (-37%)	942 (-34%)	1557 (+9%)	1223 (-14%)	1446 (+1%)
4		1336	1377	1013 (-26%)	1229 (-11%)	939 (-32%)	974 (-29%)	1584 (+15%)	1192 (-13%)	1399 (+2%)
5	Dong e Wang e Guan (2016)	650	558	489 (-12%)	578 (+4%)	418 (-25%)	460 (-18%)	680 (+22%)	756 (+35%)	797 (+43%)
6	Ma <i>et al.</i> (2018)	2727	2413	1974 (-18%)	2251 (-7%)	1457 (-40%)	1834 (-24%)	1736 (-28%)	2180 (-10%)	2225 (-8%)
7	Gerin (2020)	1229	1377	1255 (-9%)	1552 (+13%)	1228 (-11%)	1227 (-11%)	1246 (-10%)	1621 (+18%)	1952 (+42%)

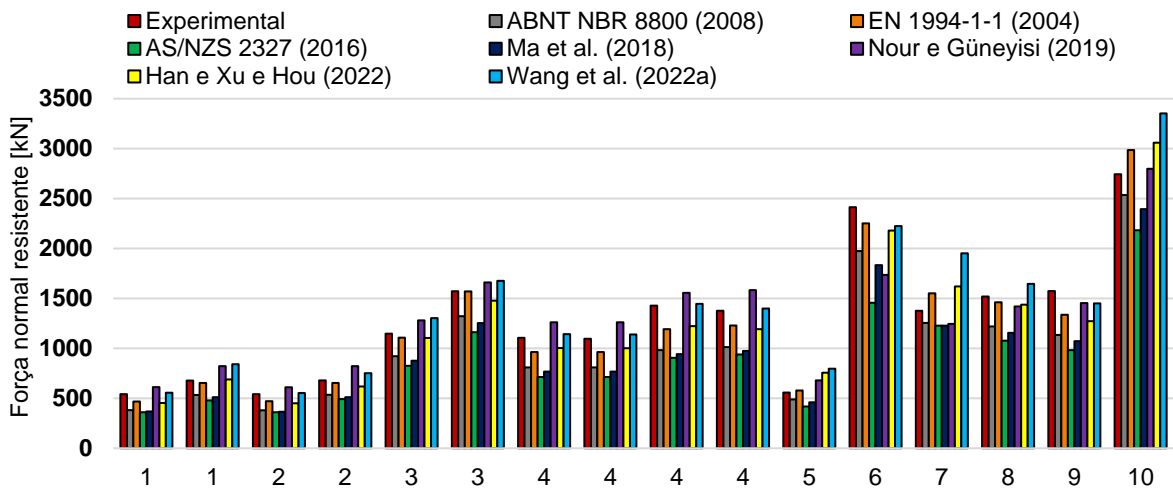
**Tabela 2-13: Comparação da força normal resistente de pilares preenchidos com concreto reciclado considerando 100% de agregado reciclado (continuação)**

ID	Documento	Experimental [kN]		ABNT NBR 8800 (2008) [kN]	EN 1994-1-1 (2004) [kN]	AS/NZS 2327 (2016) [kN]	Ma et al. (2018) [kN]	Nour e Güneyisi (2019) [kN]	Han e Xu e Hou (2022)	Wang et al. (2022a)
		REF.	RAC.							
8	Lyu e Han e Hou (2021)	1679	1519	1220 (-20%)	1461 (-4%)	1077 (-29%)	1156 (-24%)	1420 (-7%)	1438 (-5%)	1646 (+8%)
9	Zhao et al. (2021)	1759	1574	1135 (-28%)	1336 (-15%)	983 (-38%)	1073 (-32%)	1454 (-8%)	1273 (-19%)	1451 (-8%)
10	Han e Xu e Hou (2022)	2857	2743	2535 (-8%)	2985 (+9%)	2183 (-20%)	2394 (-13%)	2798 (+2%)	3060 (+12%)	3352 (+22%)

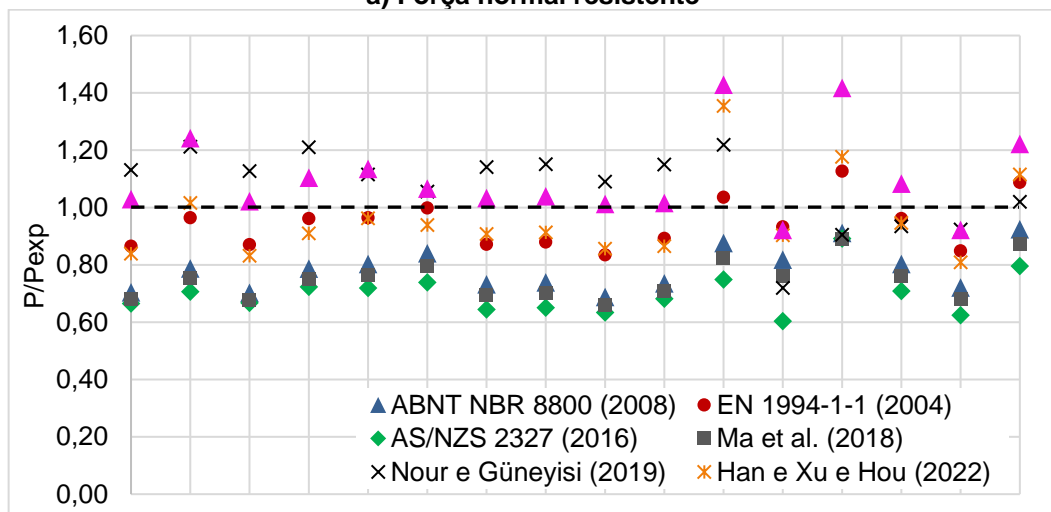
Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados da Tabela 2-13 foram organizados graficamente (Gráfico 2-6a, b).

**Gráfico 2-6: Força normal resistente considerando concretos reciclados com 100% de agregado reciclado: valores experimentais, normativos e analíticos**



**a) Força normal resistente**



**b) Relação Força prevista / Força experimental**

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 2-14 mostra as variações de força máxima obtidas para os diversos métodos avaliados. As variações foram calculadas considerando valores absolutos, ou seja, sem levar em conta se a variação foi positiva ou negativa.

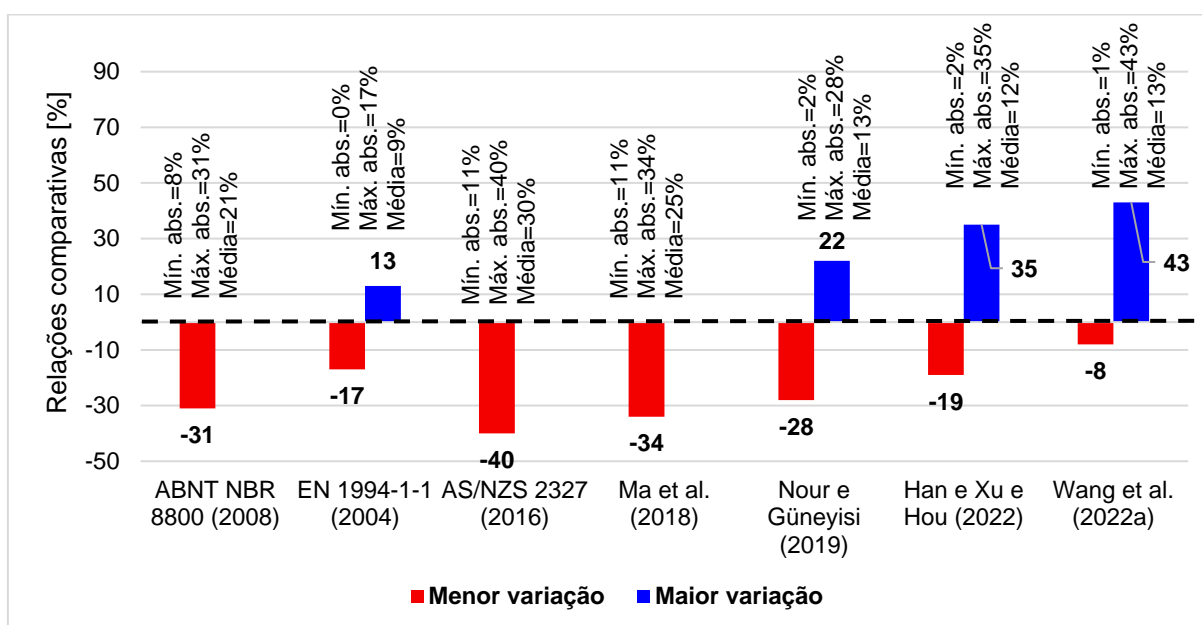
**Tabela 2-14: Relações comparativas entre os métodos avaliados**

Modelos de previsão	Mínima diferença (absoluto)	Máxima diferença (absoluto)	Média	Desvio padrão	CV	Amplitude de variação (menor e maior diferença registradas)
ABNT NBR 8800 (2008)	8%	31%	21,4%	7,2%	33%	-31% / -
EN 1994-1-1 (2004)	0%	17%	8,9%	4,9%	55%	-17% / +13%
AS/NZS 2327 (2016)	11%	40%	30,0%	7,1%	24%	-40% / -
Ma <i>et al.</i> (2018)	11%	34%	25,3%	6,7%	27%	-34% / -
Nour e Güneyisi (2019)	2%	28%	13,5%	6,6%	49%	-28% / +22%
Han e Xu e Hou (2022)	2%	35%	12,4%	7,7%	62%	-19% / +35%
Wang <i>et al.</i> (2022a)	1%	43%	12,6%	13,1%	104%	-8% / +43%

Fonte: Elaborada pelo autor

A partir da Tabela 2-14 foi construído o Gráfico 2-7 a fim de ilustrar os resultados.

**Gráfico 2-7: Relações comparativas entre os métodos avaliados**



Fonte: Elaborada pelo autor



Em relação à previsão da força normal resistente, conclui-se que:

- O modelo de Ma *et al.* (2018) foi bastante conservador e subestimou a força normal resistente (Gráfico 2-6-b).
- Já o modelo de Nour e Güneyisi (2019) superestimou a força normal resistente em algumas situações (até 22% superior) e, em outras situações, subestimou em até 28% o valor experimental (Tabela 2-14).
- Os modelos mais recentes, de Han e Xu e Hou (2022) e Wang *et al.* (2022a), apresentaram boa correlação com valores experimentais. Porém, para a maioria dos casos, sobretudo para o modelo de Wang *et al.* (2022a), a força normal resistente foi superestimada, o que não é recomendável pois os modelos são usados para estimar a capacidade resistente do pilar (Gráfico 2-6-b). Além disso, esse último modelo chegou a apresentar CV de 104%.

Portanto, os modelos da literatura se distanciaram do valor experimental com médias variando entre 12,4% e 25,3% do valor de referência. Isso pode ter acontecido porque o conjunto de resultados experimentais é pequeno e, portanto, gera equações não muito precisas.

Cabe ressaltar que os valores de força máxima foram calculados considerando valores característicos de resistência dos materiais, ou seja, sem a consideração dos coeficientes de ponderação. O método para consideração da resistência característica do concreto foi recomendado pela ABNT NBR 12655 (2022). Contudo, em uma situação de projeto, existiriam coeficiente de minoração das resistências dos materiais. Se esses coeficientes fossem utilizados para o cálculo da força normal resistente, a distribuição dos pontos no Gráfico 2-6 seria diferente e, muito provavelmente, alguns valores previstos estariam abaixo do valor de referência.

Em relação aos procedimentos normativos, a ABNT NBR 8800 (2008) subestimou a força normal resistente em todos os casos avaliados (Gráfico 2-6-b). Isto pode ser consequência da consideração simplista do efeito de confinamento, uma vez que o concreto reciclado é mais deformável e pode amplificar este efeito.

Já a AS/NZS 2327 (2016), devido à maior quantidade de fatores de redução em relação aos demais métodos, 2 a mais que o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) e 3 a mais que a ABNT NBR 8800 (2008), se mostrou conservadora. Todos os resultados previstos ficaram abaixo dos experimentais, com redução média de 30% e diferença máxima de 40% em relação aos valores experimentais (Tabela 2-14).

O Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004), que considera o efeito de confinamento de forma mais completa, resultou em valores previstos mais próximos dos valores experimentais. A média de variação (8,9%) mostra que os valores previstos se aproximaram dos experimentais,

porém, em alguns casos, os valores superestimam aqueles de referência (Gráfico 2-6-b). Entre os métodos avaliados, o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) foi que melhor previu os resultados encontrados experimentalmente.

Portanto, os poucos dados não permitem concluir qual o melhor método para prever a força normal resistente. Apesar do Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) ter apresentado boas previsões, o conjunto avaliado é pequeno e o mesmo comportamento pode não se repetir para um conjunto maior de dados.

## 3. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Com o intuito de elaborar o estado da arte sobre pilares mistos circulares preenchidos com concreto reciclado foi realizada uma revisão sistemática da literatura (RSL). Para isso foi utilizado o software Start, desenvolvido pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), e um protocolo elaborado no próprio programa. As atividades da revisão sistemática incluíram o planejamento, a execução e a sumarização.

### 3.1. DESENVOLVIMENTO DA RSL

#### 3.1.1. PLANEJAMENTO

Antes de iniciar o processo de busca nas bases de dados, foram definidas as variáveis que compõem o protocolo. Na Tabela 3-1 são apresentadas as questões-chave para a revisão sistemática.

**Tabela 3-1: Questão principal e guia da RSL**

<b>Questão principal</b>	Qual o efeito do concreto reciclado em pilares mistos preenchidos de seção circular?
<b>Tipo de documentos</b>	Artigos em que os autores aplicaram concretos reciclados a pilares mistos preenchidos de seção circular
<b>Avaliação</b>	Qual foi o impacto do concreto reciclado nos pilares mistos preenchidos de seção circular?
<b>Resultado</b>	estado da arte sobre o impacto do concreto reciclado em pilares mistos preenchidos de seção circular
<b>Aplicação</b>	Encontrar as lacunas do conhecimento em relação a pilares mistos preenchidos com concreto reciclado

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Tabela 3-2 são apresentadas as principais características da revisão sistemática. Os critérios de inclusão e exclusão foram aplicados à etapa de execução. O critério de

exclusão que inclui palavras-chave de documentos com temas não aderentes ao estudo como aqueles que avaliaram novos materiais ou outras condições de carregamento, foi inserido diretamente em cada uma das três bases de dados utilizadas. Isto foi feito utilizando o comando “AND NOT” que permite excluir documentos que contém essas palavras.

A pesquisa em cada banco de dados considerou, na primeira rodada de seleção, a presença das palavras-chave no título, no resumo ou nas palavras-chaves dos autores. Contudo, para a base de dados *Web of Science* a limitação a estes tópicos (título, resumo e palavras-chave) retornou 1 documento. Então, a busca das palavras-chave foi ampliada para todo documento. Além disso, um documento foi inserido manualmente: Gerin (2020), cujos resultados ainda não foram publicados em periódicos.

**Tabela 3-2: Variáveis da revisão sistemática de literatura (continua)**

<b>Palavras-chave (Strings)</b>	<i>Circular concrete filled steel tube</i> <i>Recycled aggregate concrete</i>
<b>Bases de busca</b>	<i>Scopus</i> <i>Web of Science</i> <i>Engineering Village</i>
<b>Pesquisa na Base: Scopus</b>	1: <i>TITLE-ABS-KEY (circular AND concrete AND filled AND steel AND tube) TITLE-ABS-KEY (recycled AND aggregate AND concrete AND NOT seismic AND NOT fire AND NOT frp AND NOT cfrp AND NOT fiber)</i> 2: <i>TITLE-ABS-KEY (circular) TITLE-ABS-KEY (concrete) TITLE-ABS-KEY (filled) TITLE-ABS-KEY (steel) : TITLE-ABS-KEY (tube) TITLE-ABS-KEY (recycled) TITLE-ABS-KEY (aggregate) TITLE-ABS-KEY (concrete AND NOT seismic AND NOT fire AND NOT frp AND NOT cfrp AND NOT fiber)</i>
<b>Pesquisa na Base: Web of Science</b>	1: <i>ALL=(ALL(circular concrete filled steel tube) AND ALL(recycled aggregate concrete) NOT(seismic) NOT(fire) NOT(frp) NOT(cfrp) NOT(fiber))</i> 2: <i>ALL=(ALL(circular) AND ALL(concrete) AND ALL(filled) AND ALL(steel) AND ALL(tube) AND ALL(recycled) AND ALL(aggregate) AND ALL(concrete) NOT(seismic) NOT(fire) NOT(frp) NOT(cfrp) NOT(fiber))</i>

Tabela 3-2: Variáveis da revisão sistemática de literatura (continuação)

<b>Pesquisa na Base: Engineering Village</b>	<p>1: (((<i>circular concrete filled steel tube</i>) WN KY) AND ((<i>recycled aggregate concrete</i>) WN KY)) NOT ((<i>seismic OR fire OR frp OR cfrp OR fiber</i>) WN KY))</p> <p>2: (((<i>circular</i>) WN KY) AND ((<i>concrete</i>) WN KY) AND ((<i>filled</i>) WN KY) AND ((<i>steel</i>) WN KY) AND ((<i>tube</i>) WN KY) AND ((<i>recycled</i>) WN KY)) AND ((<i>aggregate</i>) WN KY)) AND ((<i>concrete</i>) WN KY)) NOT ((<i>seismic OR fire OR frp OR cfrp OR fiber</i>) WN KY))</p>
<b>Critérios de seleção das bases</b>	<p>Compatíveis com o <i>software</i> Start</p> <p>Exportem arquivos no formato BibTex</p> <p>Encontrem artigos relacionados a engenharia civil</p>
<b>Idioma</b>	Inglês
<b>Período</b>	Sem restrição
<b>Data de pesquisa nas bases</b>	09 de março de 2023
<b>Critérios de inclusão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avaliou concretos reciclados em pilares mistos preenchidos de seção circular</li> <li>- Possui título ou resumo abordando a utilização de concretos reciclados em pilares mistos preenchidos de seção circular</li> </ul>
<b>Critérios de exclusão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não utilizou concretos reciclados em pilares preenchidos de seção circular</li> <li>- Título ou resumo não abordam utilização de concretos reciclados em pilares mistos preenchidos de seção circular</li> <li>- Documentos que estudam outros materiais e condições de carregamento e exposição (títulos, resumos ou palavras-chave com termos como "<i>seismic</i>" ou "<i>fire</i>" ou "<i>FRP</i>" ou "<i>CFRP</i>" ou "<i>fiber</i>")</li> <li>- Artigos com idioma diferente do inglês</li> <li>- Documentos indisponíveis para visualização mesmo com IP universitário</li> <li>- Título corrompido na exportação da base para o Start</li> </ul>

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.1.2. EXECUÇÃO

Diferentemente da primeira etapa, em que a busca foi realizada em cada base de

dados, na execução os artigos previamente encontrados em cada base foram importados para o *software* Start. Feito isso o próprio programa identifica e descarta documentos duplicados.

Foi realizada uma leitura primária do título, resumo e palavras-chave, caso o tema do documento não fosse aderente à proposta, o mesmo era excluído. Em seguida, se o documento atender a todos os critérios de inclusão, é aceito. Caso atenda a um único critério de exclusão, o estudo não será aceito. Nesta etapa, a seleção ocorre após a leitura na íntegra de cada documento. Uma vez aceito, o documento passa para a etapa de sumarização.

Para avaliar a aderência dos artigos selecionados é possível atribuir, no *software* Start, uma pontuação baseada nas palavras-chave fornecidas para a revisão sistemática. Foram atribuídas pontuações diferentes para palavras-chave que aparecem no título, no resumo ou nas palavras-chave do documento. Esta atribuição gera uma pontuação para cada documento; quanto maior a pontuação, maior a relevância e a aderência do documento ao tema.

### 3.1.3. SUMARIZAÇÃO

Por fim, a etapa de sumarização consiste em avaliar cada documento na íntegra, identificar e extrair, de cada um, as informações mais relevantes. Para isso, o *Start* disponibiliza diversos tipos de extração de dados; dentre elas, há uma que permite selecionar quais variáveis o respectivo documento atende. Na Tabela 3-3 estão listados quais dados foram extraídos de cada documento selecionado e avaliado.

**Tabela 3-3: Extração de dados dos documentos (continua)**

<b>Extração</b>	<b>Variáveis</b>
O estudo é numérico, experimental ou teórico?	{Numérico} / {Experimental} / {Teórico}
Houve redução ou aumento da força normal resistente nos pilares mistos preenchidos de seção circular com concreto reciclado?	{Sim} / {Não}
Houve alteração do comportamento dos pilares mistos preenchidos de seção circular com concreto reciclado?	{Sim} / {Não}
Quais porcentagens de substituição do agregado graúdo natural por ARC e seu respectivo aumento ou redução na força normal resistente?	(Extração manual)

**Tabela 3-3: Extração de dados dos documentos (continuação)**

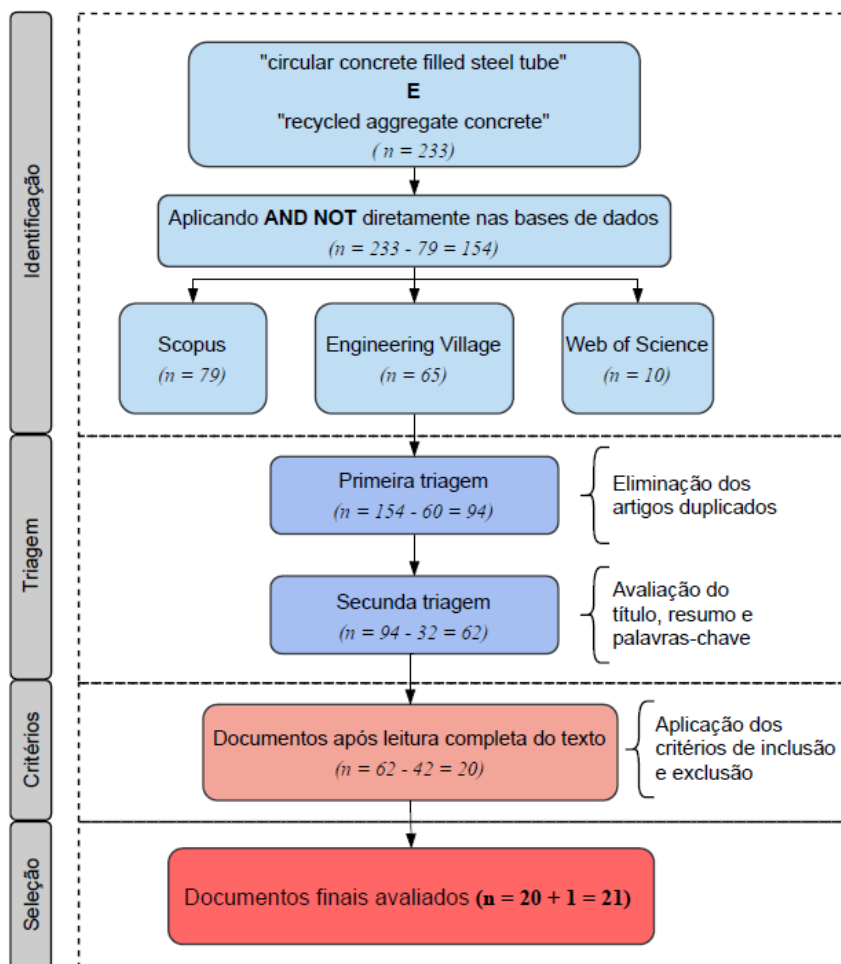
<b>Extração</b>	<b>Variáveis</b>
Qual tipo de curva foi observado no gráfico Força vs. Deformação?	{Elastoplástico perfeito} / {Elastoplástico com encruamento positivo} / {Elastoplástico com encruamento negativo}
Se o estudo for numérico, descreva: Modelo constitutivo do concreto, coeficientes de contato entre paredes do perfil, parâmetros de dano do concreto:	(Extração manual)
Qual relação L/D observada?	(Extração manual)

Fonte: Elaborada pelo autor

### **3.2. RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA**

A partir dos documentos selecionados na revisão sistemática foi elaborado o atual estado do conhecimento sobre pilares mistos de seção circular preenchidos com concreto reciclado. A Figura 3-1 ilustra as etapas e o número de documentos selecionados após a aplicação de cada um dos filtros.

**Figura 3-1: Filtros da revisão sistemática**



Fonte: Elaborada pelo autor

A busca inicial resultou em 233 documentos, resultantes da aplicação apenas das palavras-chave "circular concrete filled steel tube" e "recycled aggregate concrete" nas bases de dados. Na sequência, foi aplicado o conector "AND NOT" em cada uma das bases, seguido da leitura do título, resumo e palavras-chave, com posterior aplicação dos critérios de inclusão e exclusão do texto na íntegra e, por fim, os documentos foram avaliados individualmente. Os documentos não redigidos em inglês e/ou indisponíveis para visualização foram excluídos. Finda esta etapa, resultaram 21 documentos que foram então avaliados na íntegra.

A Tabela 3-4 apresenta uma síntese de cada um dos 21 documentos, breve discussão de seu conteúdo e alguns resultados.



Os resultados da Tabela 3-4 se referem a:

- Houve redução ou aumento da força normal resistente nos pilares mistos preenchidos de seção circular com concreto reciclado?
- Houve alteração do comportamento dos pilares mistos preenchidos de seção circular com concreto reciclado?
- Se o estudo for numérico, descreva: Modelo constitutivo do concreto, coeficientes de contato entre paredes do perfil, parâmetros de dano do concreto:
- Quais porcentagens de substituição do agregado graúdo natural por ARC e sua respectiva variação (aumento ou redução) na força normal resistente?
- Comportamento Força vs. deformação?
- Qual relação L/D foi investigada?

**Tabela 3-4: Documentos selecionados na revisão sistemática, destacando resultados obtidos (continua)**

Documento	Tipo de estudo	Síntese do conteúdo	a)	b)	c)	d)		e)	f)
						Subs.	Vari.		
Yang e Han (2006)	Experimental	Ensaio de 24 pilares mistos preenchidos	Redução	Sim	-	25% a 50%	-9% a -2%	Elastoplástico com encruamento negativo	10
Yang e Han e Zhu (2009)	Experimental	Ensaio de flexão excêntrica em 13 pilares	Redução	Sim	-	25% a 50%	-8% a -1%	Elastoplástico com encruamento negativo	9,1
Chen <i>et al.</i> (2010)	Experimental	Ensaio de 22 modelos variando coeficiente de confinamento	Aumento	Sim	-	10% a 100%	0% a 7%	Elastoplástico com encruamento negativo	3,2
Mohanraj e Kandasamy e Malathy (2011)	Experimental	Pilares preenchidos de seção circular e variação do tipo de agregado reciclado	Aumento	Sim	-	25%	0% a 4%	Elastoplástico com encruamento negativo	3,9 a 11,8
Hou <i>et al.</i> (2013)	Experimental	Avaliação de agregados reciclados de diferentes fontes, empregando o concreto a pilares mistos	Redução Aumento	Sim	-	25% a 100%	-14% a 6%	Elastoplástico com encruamento negativo	3,5

Tabela 3-4: Documentos selecionados na revisão sistemática, destacando resultados obtidos (continuação)

Documento	Tipo de estudo	Síntese do conteúdo	a)	b)	c)	d)		d)	f)
						Subs.	Vari.		
Chen <i>et al.</i> (2014a)	Experimental	Avaliação de 11 pilares curtos e 11 pilares longos preenchidos com concreto reciclado	Aumento	Sim	-	10% a 100%	0% a 7%	Elastoplástico com encruamento negativo	3,2
Chen <i>et al.</i> (2014b)	Experimental	Ensaio de 31 modelos para verificação da interação do concreto reciclado e as paredes do tubo de aço	Aumento	Sim	-	25% a 100%	2% a 7%	Elastoplástico com encruamento negativo	1,9 a 2,9
Dong e Wang e Guan (2016)	Experimental	Ensaio de 10 modelos; variação da forma da seção: circular e quadrada	Reduziu	Sim	-	25% a 100%	-14% a 1%	Elastoplástico com encruamento negativo	3,5
Ma <i>et al.</i> (2018)	Experimental	Ensaio de 11 modelos variando relação diâmetro/espessura, seção transversal e altura do pilar	Reduziu	Sim	-	30% a 100%	-23% a 9%	Elastoplástico com encruamento negativo	2,6 a 8,0
Nour e Güneyisi (2019)	Teórico	Desenvolvimento de modelos para prever a força normal resistente de pilares mistos com concreto reciclado	-	Sim	-	-	-	-	-
Bai e Liu (2019)	Numérico Teórico	Estudo do deslizamento entre o concreto e aço de pilares mistos em modelos numéricos	-	-	Modelo constitutivo de Bai e Liu (2019) Coeficiente de atrito de 0,6 Coeficiente de Poisson de 0,3	-	-	-	-
Xu <i>et al.</i> (2019)	Teórico	Prescrição de modelos para encontrar uma rigidez efetiva de pilares mistos de concretos reciclados	-	Sim	-	-	-	-	-

Tabela 3-4: Documentos selecionados na revisão sistemática, destacando resultados obtidos (continuação)

Documento	Tipo de estudo	Síntese do conteúdo	a)	b)	c)	d)		d)	f)
						Subs.	Vari.		
Ma <i>et al.</i> (2019b)	Experimental	Ensaio de 17 modelos para estudar cargas excêntricas em pilares mistos	Reduziu	Sim	-	50% a 100%	-30% a 5%	Elastoplástico com encruamento negativo	3,9 a 9,6
Gerin (2020)	Experimental	Ensaio de 6 pilares mistos de seção circular com concreto reciclado, segundo trabalho nacional sobre o tema	Aumentou	Sim	-	30% a 100%	3% a 9%	Elastoplástico com encruamento positivo	3,0
Azevedo <i>et al.</i> (2021)	Experimental	Ensaio de 23 pilares mistos com concreto reciclado	Aumentou	Sim	-	30% a 50%	-7% a 4%	Elastoplástico perfeito, com encruamento positivo e negativo	2,5 a 3,6
He <i>et al.</i> (2021)	Numérico Experimental	Ensaio e modelagem numérica. Avaliação do comportamento a flexo-compressão em pilares mistos com concreto reciclado	Reduziu	Sim	Modelo constitutivo de Lyu e Han e Hou (2021) Coeficiente de atrito de 0,6 Parâmetros do CDP Coeficiente de 30°; 0,1; 1,16; 0,667 e 0,01 Poisson de 0,2	50% a 100%	-10% a -1%	Elastoplástico perfeito, com encruamento positivo e negativo	3,0
Lyu e Han e Hou (2021)	Numérico Experimental	Ensaio de 32 exemplares e simulação numérica	Reduziu	Sim	Modelo constitutivo de Lyu e Han e Hou (2021) Coeficiente de atrito de 0,2 Parâmetros do CDP de 30°; 0,1; 1,16; 0,667 Coeficiente de Poisson de 0,2	35% a 70%	-15% a -3%	Elastoplástico com encruamento negativo	4,0 a 13,5

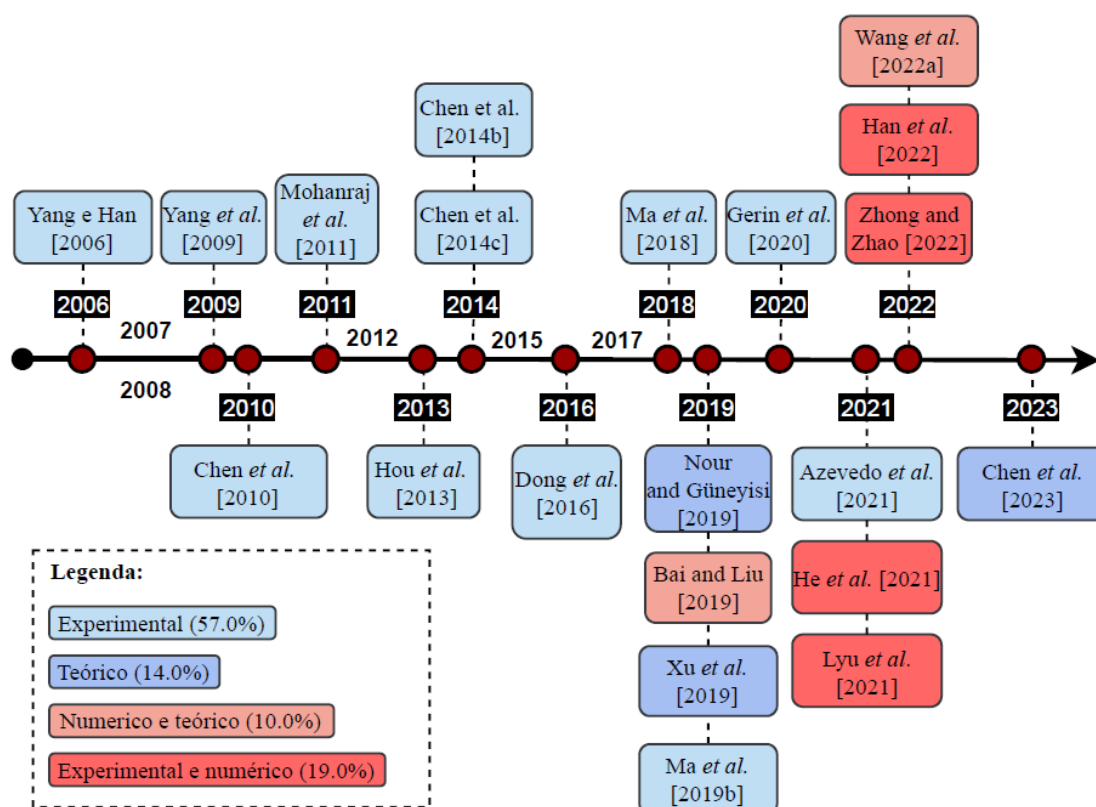
Tabela 3-4: Documentos selecionados na revisão sistemática, destacando resultados obtidos (continuação)

Documento	Tipo de estudo	Síntese do conteúdo	a)	b)	c)	d)		d)	f)
						Subs.	Vari.		
Han e Xu e Hou (2022)	Numérico Experimental	Avaliação de 36 pilares mistos com foco no carregamento axial e no escorregamento aço-concreto	Reduziu	Sim	Modelo constitutivo de Lyu e Han e Hou (2021) Coeficiente de atrito de 0,25	50% a 100%	-2% a -5%	Elastoplástico com encruamento negativo	3,0
Wang <i>et al.</i> (2022a)	Numérico Teórico	Estudo do efeito de confinamento usando simulações numéricas e teóricas	-	-	Modelo constitutivo de Wang <i>et al.</i> (2022a) Coeficiente de atrito de 0,5 Parâmetros do CDP de 40°; 0,1; 1,225; 0,667; 0,05	-	-	-	-
Zhong e Zhao (2022)	Numérico Experimental	Ensaio de 12 modelos com carga axial excêntrica e construção de modelo numérico	Reduziu	Sim	Modificação do modelo constitutivo de Lyu e Han e Hou (2021) Coeficiente de atrito de 0,25 Coeficiente de Poisson de 0,2	35% a 70%	-4% a -18%	Elastoplástico com encruamento negativo	3,0
Chen <i>et al.</i> (2023)	Teórico	Avaliação teórica de pilares preenchidos, proposta de modelo de previsão da força normal resistente	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor

No que se refere à distribuição temporal das publicações, é notável o aumento de publicações nos últimos 5 anos (Figura 3-2), uma vez que se busca, com o avanço da ciência e da tecnologia, desenvolver soluções cada vez mais sustentáveis. A distribuição territorial desses documentos foram: 15 na China, 1 na Somália, 1 na Índia, 2 em Singapura e 2 no Brasil. Desse modo, apenas 2 no lado oeste do planeta. Além disso, a Figura 3-2 mostra a distribuição dos 21 documentos quanto à metodologia utilizada para investigar pilares mistos preenchidos com concreto reciclado.

**Figura 3-2: Distribuição temporal dos documentos selecionados e metodologia utilizada**



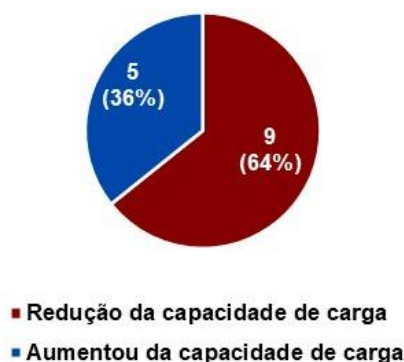
Fonte: Elaborada pelo autor

Nos estudos selecionados predomina a análise experimental, com 57% do total. Isto indica dois aspectos importantes: 1) trata-se de um tema novo de investigação experimental para compreender o comportamento dos pilares preenchidos com concreto reciclado; 2) como há poucos resultados experimentais para validação de modelagens computacionais, poucos estudos utilizaram esta estratégia. Portanto, ao simular pilares mistos preenchidos com concreto reciclado, é preciso observar quais particularidades este tipo de concreto traz ao processo de simulação, bem como avaliar como os parâmetros da modelagem afetam a resposta do modelo numérico.

O Gráfico 3-1 mostra que grande parte dos documentos selecionados (62%) registrou

redução na capacidade resistente do pilar preenchido devido ao uso do concreto reciclado (apenas compressão axial centrada). Além disso, também foi observada mudança no comportamento Força vs. Deformação do pilar. À primeira vista (Gráfico 3-1), parece que a substituição do agregado natural por reciclado leva a redução da força normal resistente de pilares preenchidos submetidos à compressão axial centrada.

**Gráfico 3-1: Efeito do concreto reciclado na força normal resistente de pilares preenchidos**



Fonte: Elaborada pelo autor

Contudo, a variação da força normal resistente do pilar misto pode estar associada à variação da resistência do concreto. Na Tabela 3-5 há um conjunto de resistências do concreto de referência e reciclado bem como os respectivos valores de força normal resistente. Para esta comparação foram considerados apenas dados à substituição total do agregado graúdo natural.

**Tabela 3-5: Comparação entre valores de forças resistentes para pilares preenchidos com concreto de referência e reciclado (continua)**

ID	Documento	L/D	D/t	$f_{cref}$ [MPa]	$f_{cRAC}$ [MPa]	$N_{uref}$ [kN]	$N_{uRAC}$ [kN]
1	Chen <i>et al.</i> (2010)	3,2	35,0	-	-	504	541 (+7,3%)
		3,2	56,0			642	670 (+4,4%)
2	Hou <i>et al.</i> (2013)	3,5	67,1	42,1	35,5 (-15,6%)	650	557 (-14,3%)
3	Chen <i>et al.</i> (2014a)	3,4	35,0	23,6	29,2 (+23,7%)	504,4	541,0 (+7,3%)
		3,3	55,0			636,8	679,7 (+6,7%)
4	Dong e Wang e Guan (2016)	3,5	63,3	42,0	34,5 (-17,8%)	650,0	557,5 (-14,2%)
5	Ma <i>et al.</i> (2018)	2,7	113,0	45,0	41,3 (-8,2%)	2727,2	2412,7 (-11,53%)
6	Gerin (2020)	3,0	18,1	39,4	38,7 (-1,8%)	1269,2	1377,2 (+8,5%)
7	Lyu e Han e Hou (2021)	3,0	48,0	57,2	51,6 (-9,8%)	1679,1	1519,4 (-9,5%)
8	Han e Xu e Hou (2022)	3,0	40,5	62,5	56,3 (-10,0%)	2857,3	2743,5 (-4,0%)

**Tabela 3-5: Comparação entre valores de forças resistentes para pilares preenchidos com concreto de referência e reciclado (continuação)**

Sendo:

$f_{c\text{ref}}$ : resistência à compressão do concreto de referência (agregados naturais)

$f_{c\text{RAC}}$ : resistência à compressão do concreto reciclado (ARC)

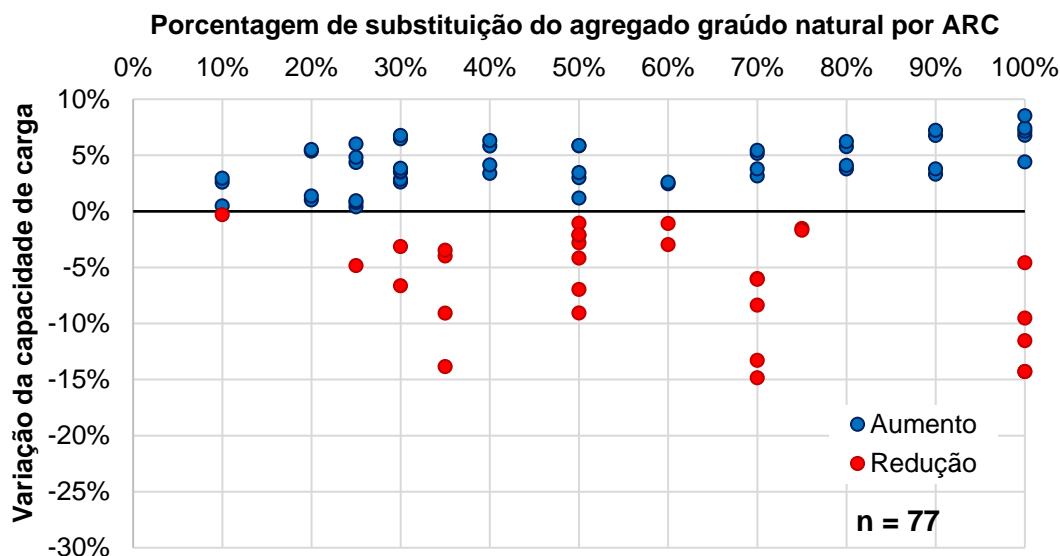
$N_{u\text{ref}}$ : força normal resistente do pilar misto preenchido de referência

$N_{u\text{RAC}}$ : força normal resistente do pilar misto com concreto reciclado

Fonte: Elaborada pelo autor

Adicionalmente, visando relacionar a variação da força resistente ao teor de agregado reciclado, foram extraídos, de cada documento selecionado, os valores de força normal resistente de pilares preenchidos com concreto reciclado e de referência (concreto com agregados naturais). O Gráfico 3-2 foi construído utilizando os percentuais de variação da força resistente em função do teor de agregado reciclado e tomando como referência o pilar com concreto convencional (referência). Para isso foram considerados 77 resultados experimentais.

**Gráfico 3-2: Variação da força normal resistente de pilares preenchidos com concreto reciclado em relação pilares preenchidos com concreto convencional**



Fonte: Elaborada pelo autor

O conjunto de dados (Gráfico 3-2) mostra aumento máximo de 8,5% e redução de 14,9%. Além disso, foram observados aumento médio de 4,2% e redução média de 6,5% na força normal resistente. Apesar dos esforços, não foi possível estabelecer relação de tendência entre o teor de agregado reciclado e a respectiva variação na força normal resistente dos pilares mistos. Contudo, os aumentos foram menos significativos que as reduções, indicando uma leve tendência de redução da força resistente.

Portanto, dois aspectos importantes merecem destaque. O primeiro é que não é

possível estabelecer o percentual ideal de substituição do agregado graúdo natural por reciclado de forma a não impactar na força normal resistente. Mas, aparentemente, a substituição total leva a uma maior redução na força normal resistente. O segundo aspecto é o potencial de utilização do concreto reciclado em pilares mistos preenchidos pois, dos 77 modelos ensaiados, 48 mostraram aumento da força normal resistente enquanto 29 apresentaram redução. Isto parece indicar que o agregado reciclado não causa reduções significativas na capacidade resistente do pilar misto preenchido com concreto reciclado, mostrando seu potencial de aplicação.

Além da força normal resistente, também foi avaliado o comportamento pós-pico por meio da resposta Força vs. Deformação do pilar misto preenchido com concreto reciclado. Uma forma de fazer esta avaliação consiste em utilizar o fator de confinamento, assim denominado por alguns pesquisadores, e dado pela relação entre as contribuições do aço e do concreto para a força normal resistente do pilar (JOHANSSON; GYLLOFT, 2002; TAO; WANG; YU, 2013; GERIN, 2020; HE *et al.*, 2021) expressa na Equação (3-1).

$$\xi = \frac{A_s \cdot f_{yk}}{A_c \cdot f_{ck}} = \alpha \cdot \frac{f_{yk}}{f_{ck}} \quad (3-1)$$

Sendo:

$\xi$ : Fator de confinamento;

$A_s$ : Área da seção transversal do perfil de aço;

$A_c$ : Área da seção transversal de concreto;

$f_{ck}$ : Resistência à compressão do concreto, valor característico;

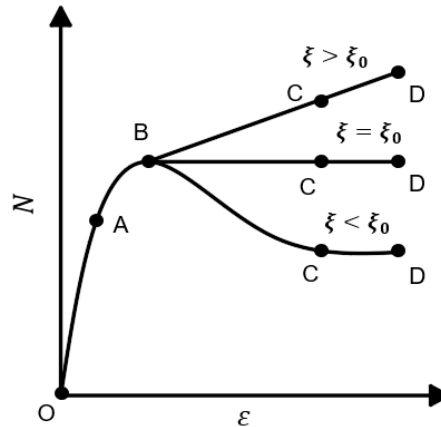
$f_{yk}$ : Resistência ao escoamento do perfil de aço, valor característico;

$\alpha$ : Razão entre as áreas de aço e de concreto, podendo variar de 0,06 a 0,13 (LYU; HAN; HOU, 2021).

Em função do valor do fator de confinamento, foram identificados três comportamentos pós-pico distintos: 1) quando  $\xi > \xi_0$  comportamento elastoplástico com encruamento positivo, caracterizado por aumento da força normal após a tensão atingir a resistência ao escoamento do perfil de aço; 2)  $\xi = \xi_0$  comportamento elastoplástico perfeito, não há variação da força normal após o valor de pico e; 3)  $\xi < \xi_0$  comportamento elastoplástico com encruamento negativo, caracterizado pela redução da força normal após o valor de pico. O parâmetro  $\xi_0$  se refere ao fator de confinamento correspondente ao comportamento elastoplástico perfeito. Não existe um valor fixo para  $\xi_0$ , também chamado de fator crítico, porém alguns autores sugerem que esteja entre 1 e 4,5 (LYU; HAN; HOU, 2021).



**Figura 3-3: Comportamento de pilares mistos preenchidos**



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 3-3 podem ser observados trechos importantes do comportamento Força vs. Deformação do pilar misto. O trecho inicial OA é praticamente linear e vai do início do carregamento até o início da plastificação do perfil de aço. O trecho AB corresponde à plastificação do perfil de aço e definição da força de pico em pilares com comportamento elastoplástico com encruamento negativo. Na sequência, o trecho BC, determinado pelo fator de confinamento, é definido pela plastificação total do perfil de aço. Por fim, o trecho final CD que, para comportamento elastoplástico com encruamento negativo pode se tornar levemente retilíneo devido ao confinamento mais acentuado nessa etapa.

Complementando essa análise, podemos definir o comportamento a partir da relação Força-Deformação utilizando dois pontos distintos, por exemplo, correspondentes às deformações 3‰ e 10‰. Para esta análise devem ser tomadas as forças axiais correspondentes a estas deformações (Equação (3-2)). O resultado da Equação (3-2) se relaciona ao comportamento do pilar conforme expresso na Tabela 3-6.

$$\alpha_F = \frac{F_{\varepsilon-10\text{‰}}}{F_{\varepsilon-3\text{‰}}} \quad (3-2)$$

Sendo:

$\alpha_F$ : Diferença entre força normal resistente para diferentes deformações;

$F_{\varepsilon-y}$ : Força normal resistente referente a deformação "y".

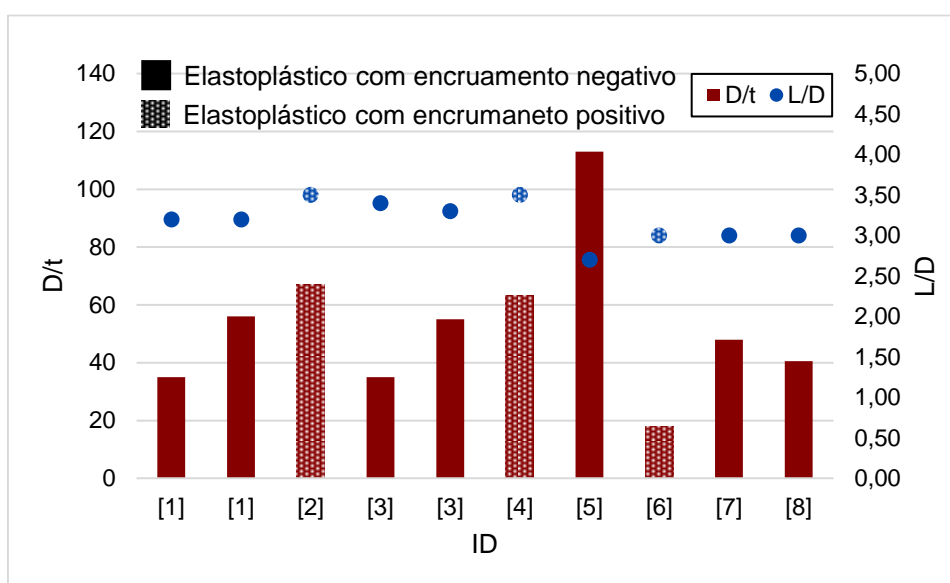
**Tabela 3-6: Análise dos resultados de  $\alpha_{dif}$**

Parâmetro $\alpha$	Classificação Comportamento do pilar
$\alpha_F < 1$	Elastoplástico com encruamento negativo
$\alpha_F \cong 1$	Elastoplástico perfeito
$\alpha_F > 1$	Elastoplástico com encruamento positivo

Fonte: Elaborada pelo autor

Uma vez identificados os três tipos de comportamento Força vs. Deformação possíveis, os dados da revisão sistemática foram avaliados quanto ao comportamento. Neste processo foi verificado que a variação das propriedades mecânicas dos materiais e da geometria dos componentes do pilar pode alterar a resposta do pilar. O Gráfico 3-3 ilustra a distribuição dos resultados da literatura quanto ao tipo de comportamento do pilar preenchido com concreto reciclado. A maioria dos estudos avaliados encontrou respostas Força vs. Deformação com comportamento elastoplástico com encruamento negativo indicando que os pilares perdem capacidade resistente após atingir o pico.

**Gráfico 3-3: Distribuição dos resultados em função do comportamento Força vs. deformação dos modelos ensaiados**



Fonte: Elaborada pelo autor

A influência da esbelteza global do pilar já é bem conhecida: relações altura-diâmetro (L/D) elevadas tendem a gerar respostas Força vs. Deformação com comportamento elastoplástico com encruamento negativo; uma vez atingido o valor de pico, ocorrem instabilidades globais que levam à redução da força residual. No caso de pilares mistos preenchidos submetidos a carregamentos excêntricos, este comportamento é ainda mais evidente (MA *et al.*, 2019b). O efeito da variação da relação L/D pode ser observado no Gráfico 3-3 no qual constam os valores de L/D e os respectivos comportamentos Força vs. Deformação. Os dados foram extraídos dos documentos selecionados na revisão sistemática. Apenas pilares submetidos à compressão axial centrada foram considerados nesta análise.

Portanto, fica evidente que os pilares com comportamento elastoplástico com encruamento negativo não apresentam um padrão em função da relação L/D. Além disso, foram encontrados apenas pilares curtos ( $L/D < 5$ ), com valores de L/D variando entre 2,7 e 3,5. Nesse sentido, os documentos encontrados na revisão sistemática não permitiram

estabelecer relação entre o comportamento Força vs. Deformação dos pilares mistos e a relação altura-diâmetro (L/D).

Na revisão sistemática de literatura, além das análises quantitativas e qualitativas, também foram extraídas informações sobre parâmetros para a modelagem desses elementos mistos no *software* Abaqus®. Dentre os 21 documentos selecionados, apenas 6 utilizaram a simulação numérica como estratégia para investigação e 3 de fato apresentaram parâmetros para modelagem de pilares preenchidos com concreto reciclado. Desse modo, a revisão sistemática permitiu identificar a escassez de estudos voltados à modelagem computacional de pilares mistos com concreto reciclado.

## 4. MODELAGEM NUMÉRICA

Neste capítulo são apresentadas as etapas da modelagem numérica realizada no *software* Abaqus®, incluindo a construção do modelo numérico, características dos materiais, geometria, condições de vinculação e aplicação do carregamento.

Em seguida, foi realizada uma análise de sensibilidade na qual os resultados experimentais de Gerin (2020) foram utilizados como referência. Nesta análise foram identificados os parâmetros mais relevantes para descrever o comportamento do pilar misto preenchido com concreto reciclado bem como os valores numéricos mais adequados. Com o modelo calibrado na etapa de análise de sensibilidade, as deformações nos componentes do pilar misto (perfil de aço e núcleo de concreto), obtidas na simulação numérica, foram comparadas aos resultados experimentais de Gerin (2020).

Por fim, o modelo numérico foi utilizado para descrever o comportamento (força vs. deformação) de pilares mistos preenchidos ensaiados por Chen *et al.* (2010), Hou *et al.* (2013), Dong e Wang e Guan (2016) e Lyu e Han e Hou (2021). Nesta última etapa, foi avaliada a robustez do modelo numérico em representar outros resultados da literatura, além daqueles utilizados na etapa de validação.

### 4.1. DADOS DE REFERÊNCIA PARA VALIDAÇÃO

Foram utilizados os resultados experimentais de Gerin (2020) para validar os modelos numéricos do presente estudo. A Figura 4-1 ilustra os pilares ensaiados.

**Figura 4-1: Modelos ensaiados por Gerin (2020)**



Fonte: Gerin (2020)

Dentre os modelos ensaiados por Gerin (2020), o exemplar CFST-100-CS foi selecionado como referência para a modelagem numérica. Este modelo é composto de um perfil de aço de seção circular e um núcleo de concreto com 100% de substituição do agregado graúdo natural por ARC. As principais características do modelo CFST-100-CS são apresentadas na Tabela 4-1.

**Tabela 4-1: Propriedades dos componentes do pilar misto preenchido com concreto reciclado**

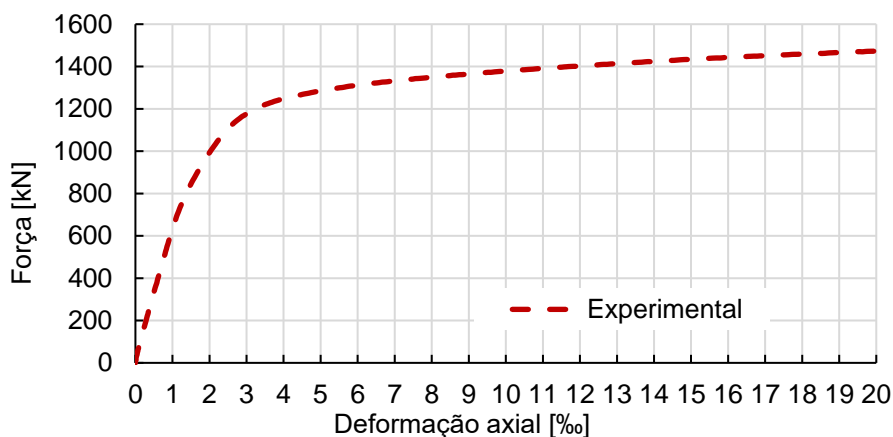
Perfil de aço					
Altura	Diâmetro	Espessura	Módulo de elasticidade	Resistência ao escoamento	Resistência última
345 mm	114,3 mm	6,3 mm	200 GPa	453,08 MPa	478,97 MPa
Núcleo de concreto					
Substituição do agregado graúdo natural por agregado de resíduo de concreto (ARC)			Resistência à compressão	Resistência à tração	Módulo de elasticidade
100%			38,66 MPa	3,25 MPa	26,18 GPa

Fonte: Elaborada pelo autor

Os valores do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do aço foram adotados conforme recomendações da ABNT NBR 8800 (2008) respectivamente com valores de 200 GPa e 0,3.

Para validação foi utilizada a relação Força vs. Deformação do Gráfico 4-1. O comportamento (Gráfico 4-1) é classificado como elastoplástico com encruamento positivo e, neste caso, não é possível estabelecer claramente qual o valor da força máxima. Para isso, a exemplo de outros pesquisadores, Gerin (2020) adotou a força correspondente à deformação de 10%. Assim sendo, a força resistente correspondente a esta deformação foi de 1377,15 kN. Vale destacar que este modelo apresentou falha por deformações excessivas, sem ocorrência de instabilidade local ou global.

**Gráfico 4-1: Comportamento Força vs. deformação do exemplar CFST-100-CS**



Fonte: Gerin (2020)

## 4.2. MODELO NUMÉRICO

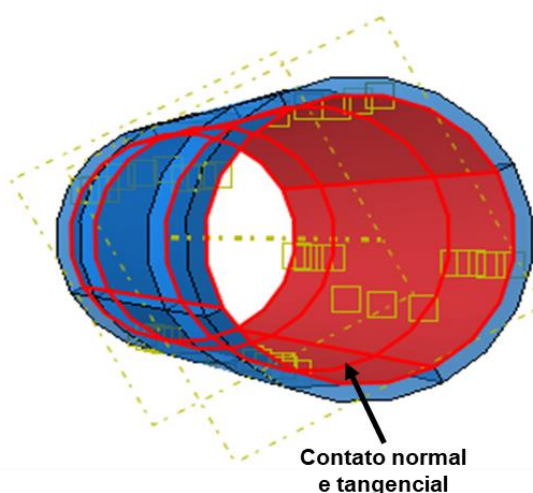
### 4.2.1. GEOMETRIA, VÍNCULOS E SUPERFÍCIES DE CONTATO

O modelo numérico desenvolvido no *software* Abaqus® possui dois componentes: o perfil de aço e o núcleo de concreto. Os componentes foram discretizados com o elemento finito do tipo C3D8R, elemento cúbico (C), tridimensional (3D), com oito nós de integração, 3 graus de liberdade por nó (direções x, y e z) (8) e integração reduzida (R). Esse elemento finito é o mais comumente utilizado em modelos tridimensionais visando representar o comportamento estrutural pois suporta elevadas deformações plásticas. Aqui fica uma ressalva que alguns autores discretizam o perfil de aço com elementos tipo “casca” visando reduzir o tempo de processamento. Isto não foi feito no presente estudo porque o tempo de processamento foi pequeno. Assim, o perfil de aço também foi discretizado com elementos finitos do tipo C3D8R.

Quanto à interação entre aço e concreto, foi utilizado o modelo de contato “*surface to surface*” de forma que o *software* adota uma superfície como mestre e outra subordinada. Assim, a superfície interna do tubo de aço foi considerada mestre e a externa do concreto como subordinada, uma vez que o concreto irá se deformar radialmente e aplicar tensões ao aço.

Para definir as propriedades de contato foram utilizados os comportamentos normal e tangencial. Na direção normal, que se refere ao plano entre a parede do perfil de aço e a parede do concreto foi adotado contato do tipo rígido. Para o comportamento tangencial tipo “*penalty*” foi utilizado o multiplicador de Lagrange para impor restrições, ou seja, um coeficiente de atrito aço-concreto. A Figura 4-2 ilustra a superfície de contato do modelo numérico.

**Figura 4-2: Superfície de contato entre perfil de aço e núcleo de concreto**

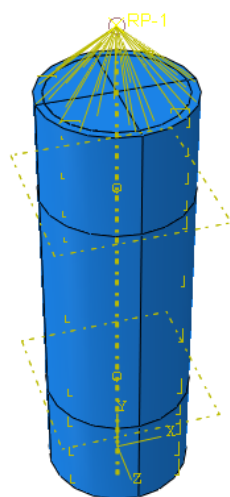


Fonte: Elaborada pelo autor

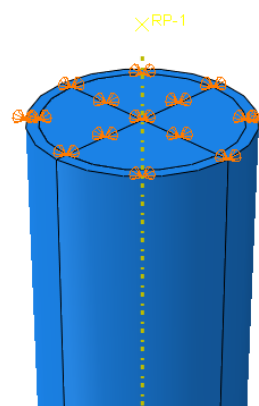
Foi criado um nó mestre no topo do modelo de modo que a carga fosse aplicada concentrada nesse nó e o software a distribuisse em toda superfície superior do pilar, de forma simultânea no aço e no concreto (Figura 4-3 a).

Quanto às restrições, na base do pilar foram impedidas as três translações ( $U_x$ ,  $U_y$  e  $U_z$ ) bem como a rotação na direção Y (eixo do pilar,  $UR_y$ , Figura 4-3 c,d). No topo foram impedidas as translações nas direções X e Z, deixando a direção Y (axial) livre para se deslocar verticalmente (Figura 4-3 b). Vale destacar, que o elemento C3D8R possui apenas 3 graus de liberdade ( $U_x$ ,  $U_y$  e  $U_z$ ), o giro ( $UR_y$ ) foi impedido conforme recomendações de autores da literatura.

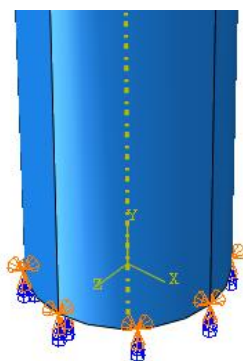
**Figura 4-3: Condições de vinculação**



a) nó mestre no topo



b) restrições na extremidade superior



c) restrições na extremidade inferior



d) Extremidade inferior do ensaio em laboratório

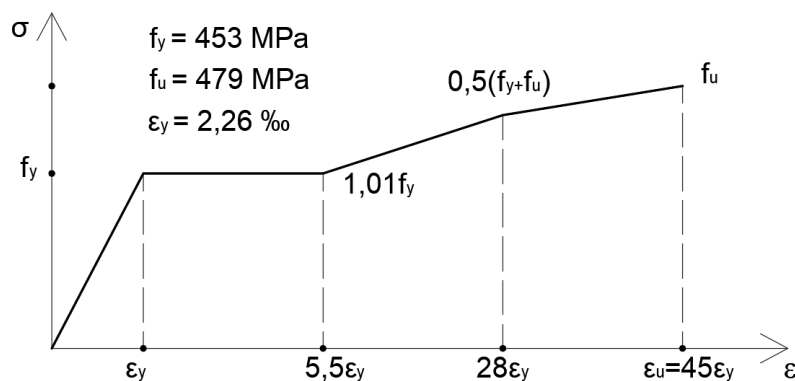
Fonte: Elaborada pelo autor

#### **4.2.2. RELAÇÕES CONSTITUTIVAS E CRITÉRIO DE FALHA: PERFIL DE AÇO**

Para descrever o comportamento do aço do perfil foi utilizado o modelo constitutivo multilinear de Earls (1999), representado graficamente na Figura 4-4). O comportamento do

aço é bem conhecido e sua representação já está bastante consolidada.. Além disso, o modelo constitutivo de Earls (1999) já foi utilizado por diversos autores para descrever o comportamento de perfis de aço (ROSSI *et al.*, 2020; CARVALHO *et al.*, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2022). Assim sendo, não foi feita análise da influência do modelo constitutivo do aço.

**Figura 4-4: Modelo constitutivo do aço, conforme Earls (1999)**



Fonte: Elaborada pelo autor

Para o aço foi considerada a plasticidade conforme critério de *Von Mises*.

#### 4.2.3. RELAÇÕES CONSTITUTIVAS E CRITÉRIO DE FALHA: NÚCLEO DE CONCRETO

O dano do concreto foi representado pelo modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). Esse modelo leva em conta os danos à tração e à compressão, por meio da fissuração e do esmagamento, respectivamente. Assim, ao carregar o elemento, a intensidade do dano varia entre 0 e 1; 0,0 corresponde ao concreto totalmente íntegro e 1,0 ao concreto totalmente danificado. Esse mecanismo foi aplicado em todos os modelos avaliados. As Equações (4-1) e (4-2) ilustram o dano para o concreto à compressão e à tração, respectivamente.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma}{f_{cm}} \quad (4-1)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma}{f_{tm}} \quad (4-2)$$

Sendo:

$\sigma$ : Tensão no concreto;

$f_{cm}$ : Resistência à compressão;

$f_{tm}$ : Resistência à tração.

Para descrever o comportamento à compressão do concreto reciclado, foram avaliados 3 modelos constitutivos (Tabela 4-2): o modelo de Guo (2014), desenvolvido para concretos convencionais, e dois modelos desenvolvidos especificamente para concreto reciclado e que foram identificados na RSL. Para estes modelos foi adotado o valor de



resistência à compressão ( $f_{cm} = 38,7$  MPa) obtido experimentalmente por Gerin (2020).

O modelo de Guo (2014) possui duas variáveis ( $\alpha_a$  e  $\alpha_d$ ) que podem ser modificadas a depender das condições do concreto (proporções de materiais da mistura, classe do concreto, condições de confinamento, etc). As Equações (4-3) a (4-6), da Tabela 4-2, descrevem o comportamento uniaxial do concreto à compressão segundo Guo (2014). Nestas equações,  $\alpha_a$  e  $\alpha_d$  definem a inclinação da relação Tensão vs Deformação do concreto à compressão, ou seja, quanto maiores seus valores, mais rapidamente irá aumentar a tensão no concreto no trecho ascendente ( $\alpha_a$ ) ou diminuir no trecho descendente ( $\alpha_d$ ). O parâmetro  $\alpha_a$  é calculado utilizando a Equação (4-7); em contrapartida,  $\alpha_d$  depende da classe de resistência do concreto.

O segundo modelo avaliado foi o de Lyu e Han e Hou (2021) – Equações (4-9) a (4-14). Diferentemente do modelo de Guo (2014), Lyu e Han e Hou (2021) desenvolveram um modelo específico para concreto reciclado e confinado pelo perfil de aço. Além dos diversos parâmetros relacionados às propriedades mecânicas do concreto, este modelo também depende do teor de substituição do agregado natural por agregado reciclado de concreto.

Por fim, o terceiro modelo avaliado neste estudo foi proposto por Bai e Liu (2019) e também descreve o comportamento uniaxial à compressão do concreto reciclado confinado por tubo de aço, Equações (4-15) a (4-18) – Tabela 4-2.

A Equação (4-8), do Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004), foi utilizada para prever a deformação de pico do concreto,  $\varepsilon_p$ , nos modelos constitutivos de Guo (2014) e Bai e Liu (2019). Embora Guo (2014) apresente diversas formulações para estimar a deformação de pico, não há um consenso quanto à expressão que melhor representa tal deformação. Há, inclusive, diversos autores que fixam a deformação de pico do concreto em 2‰.

**Tabela 4-2: Modelos constitutivos do concreto à compressão (continua)**

	$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}$	(4-3)
	$y = \frac{\sigma}{f_{cm}}$	(4-4)
Modelo de Guo (2014)	$x \leq 1 \rightarrow y = \alpha_a \cdot x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3$	(4-5)
	$x > 1 \rightarrow y = \frac{x}{\alpha_d(x - 1)^2 + x}$	(4-6)
	$\alpha_a = E_0 \cdot \frac{\varepsilon_p}{f_{cm}}$	(4-7)
	$\varepsilon_p = 0,7f_{cm}^{0,31} \leq 2,8 \text{ ‰}$	(4-8)
	Fonte: Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004)	

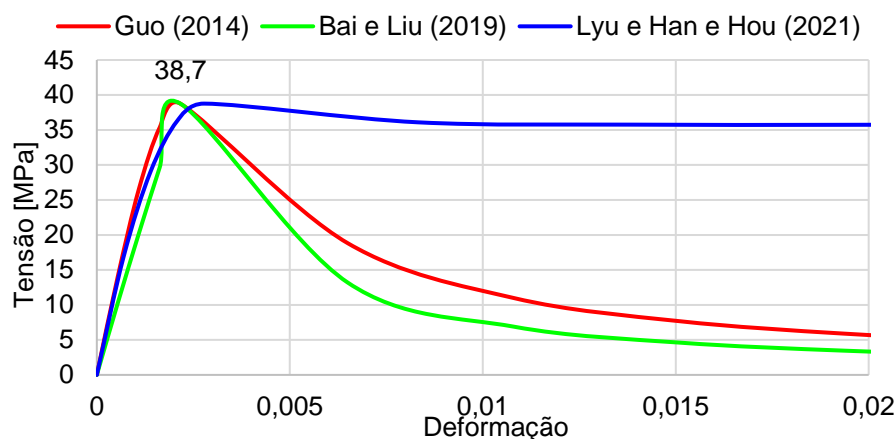
Tabela 4-2: Modelos constitutivos do concreto à compressão (continuação)

Modelo de Lyu e Han e Hou (2021)	$x \leq 1 \rightarrow y = 2x - x^2 \quad (4-9)$
	$x > 1 \rightarrow y = \frac{x}{\beta_0(x-1)^\eta + x} \quad (4-10)$
	$\varepsilon_p = (\varepsilon_c + 800\xi^{0,2}10^{-6}) \left(1 + \frac{r}{\beta}\right) \quad (4-11)$
	$\beta_0 = (2,36 \cdot 10^{-5})^{[0,25+(\xi-0,5)^7]} \cdot f_{cm}^{0,5} \cdot 0,5 \geq 0,12 \quad (4-12)$
	$\varepsilon_c = (1300 + 12,5f_{cm})10^{-6} \quad (4-13)$
	$\beta = 65,715r^2 - 109,43r + 48,989 \quad (4-14)$
Modelo de Bai e Liu (2019)	$x \leq 1 \rightarrow y = a \cdot x + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^2 \quad (4-15)$
	$x > 1 \rightarrow y = \frac{x}{b(x-1)^2 + x} \quad (4-16)$
	$a = 2,2(0,748r^2 - 1,231r + 0,975) \quad (4-17)$
	$b = 0,8(0,6843r + 1,142) \quad (4-18)$
<p>Sendo:</p> <p><math>a</math>: Parâmetro que descreve o trecho ascendente para o modelo de Bai e Liu (2019);</p> <p><math>b</math>: Parâmetro que descreve o trecho descendente para o modelo de Bai e Liu (2019);</p> <p><math>E_0</math>: Módulo de elasticidade do concreto;</p> <p><math>r</math>: Taxa de substituição do agregado graúdo natural por ARC;</p> <p><math>\alpha_a</math>: Parâmetro que descreve o trecho ascendente para o modelo de Guo (2014);</p> <p><math>\alpha_d</math>: Parâmetro que descreve o trecho descendente para o modelo de Guo (2014);</p> <p><math>\varepsilon</math>: deformação axial em um ponto qualquer;</p> <p><math>\varepsilon_p</math>: Deformação de pico do concreto;</p> <p><math>\xi</math>: Fator de confinamento do pilar misto conforme Equação (3-1);</p> <p><math>f_{cm}</math>: Resistência à compressão média do concreto;</p> <p><math>\eta</math>: 2 para pilares de seção circular;</p> <p><math>\sigma</math>: Tensão correspondente à deformação <math>\varepsilon</math>.</p>	

Fonte: Elaborada pelo autor

No Gráfico 4-2 são mostradas as curvas correspondentes aos diversos modelos constitutivos Tabela 4-2, adotados para descrever o comportamento do concreto à compressão, para  $f_{cm} = 38,7$  MPa.

**Gráfico 4-2: Relação tensão-deformação uniaxial para o concreto à compressão**



Fonte: Elaborada pelo autor

O modelo de Bai e Liu (2019), foi inspirado no modelo de Guo (2014), porém os parâmetros relacionados aos ramos ascendentes e descendentes da curva tensão-deformação foram modificados para melhor representar o comportamento do concreto reciclado. O modelo de Guo (2014) apresenta os parâmetros  $\alpha_a$  e  $\alpha_d$  em função das propriedades mecânicas do concreto ( $f_{cm}$ ,  $E_c$ ,  $\varepsilon_p$  e classe de resistência), ao passo que, no modelo de Bai e Liu (2019) esses mesmos parâmetros dependem da taxa de substituição do agregado graúdo natural pelo ARC (Tabela 4-2). Por outro lado, o modelo de Lyu e Han e Hou (2021) descreve o comportamento tensão-deformação do concreto como uma função da seção transversal (quadrada ou circular) do pilar misto. Como o nível de tensão de confinamento depende da forma da seção transversal e a seção circular apresenta maior efeito de confinamento que as demais, esse modelo inclui parâmetros como o fator de confinamento  $\xi$ , mostrado na Equação (3-1).

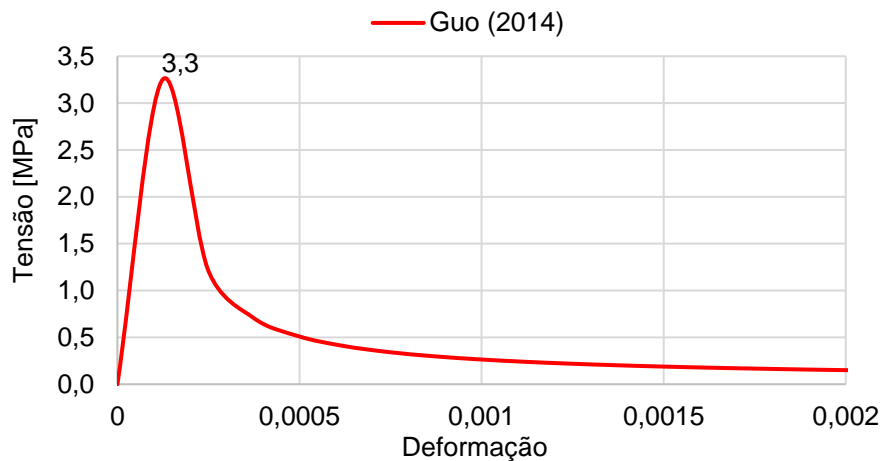
O comportamento à tração do concreto reciclado foi representado unicamente pelo modelo constitutivo de Guo (2014). As Equações (4-19) a (4-22) correspondem ao modelo de Guo (2014) - Tabela 4-3. O parâmetro  $\alpha_t$  (Equação (4-23)) segue o mesmo padrão de  $\alpha_d$  e descreve o trecho descendente da curva Tensão vs. Deformação do concreto à tração. Bai e Liu (2019) descrevem o comportamento do concreto à tração, porém não apresentam todas as equações necessárias. Assim, o modelo constitutivo de Guo (2014) foi inserido no critério de falha *Concrete Damage Plasticity*.

**Tabela 4-3: Modelos constitutivos para descrever o comportamento do concreto à tração**

	$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,p}} \quad (4-19)$
	$y = \frac{\sigma}{f_{tm}} \quad (4-20)$
Modelo de Guo (2014)	$x \leq 1 \rightarrow y = 1,2x - x^6 \quad (4-21)$
	$x > 1 \rightarrow y = \frac{x}{\alpha_t(x-1)^{1,7} + x} \quad (4-22)$
	$\alpha_t = 0,312f_{tm}^2 \quad (4-23)$
Sendo:	
$\varepsilon_{t,p}$ : Deformação de pico do concreto;	
$f_{tm}$ : Resistência à tração média do concreto;	
$\alpha_t$ : Parâmetro que descreve o trecho descendente para o modelo de Guo (2014)	

Fonte: Elaborada pelo autor

No Gráfico 4-3 é mostrado o comportamento do concreto à tração ( $f_{tm} = 3,3$  MPa) para o modelo constitutivo da Tabela 4-3.

**Gráfico 4-3: Relação tensão-deformação uniaxial para o concreto à tração**

Fonte: Elaborada pelo autor

Ainda sobre o modelo de dano *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) para o concreto reciclado, a Tabela 4-4 sintetiza os principais parâmetros necessários para extrapolar o comportamento uniaxial para o multiaxial; os valores recomendados para concretos convencionais foram baseados no manual do Abaqus® e definidos a partir dos estudos de Hillerborg e Modéer e Petersson (1976), Lubliner *et al.* (1989) e Lee e Fenves (1998).

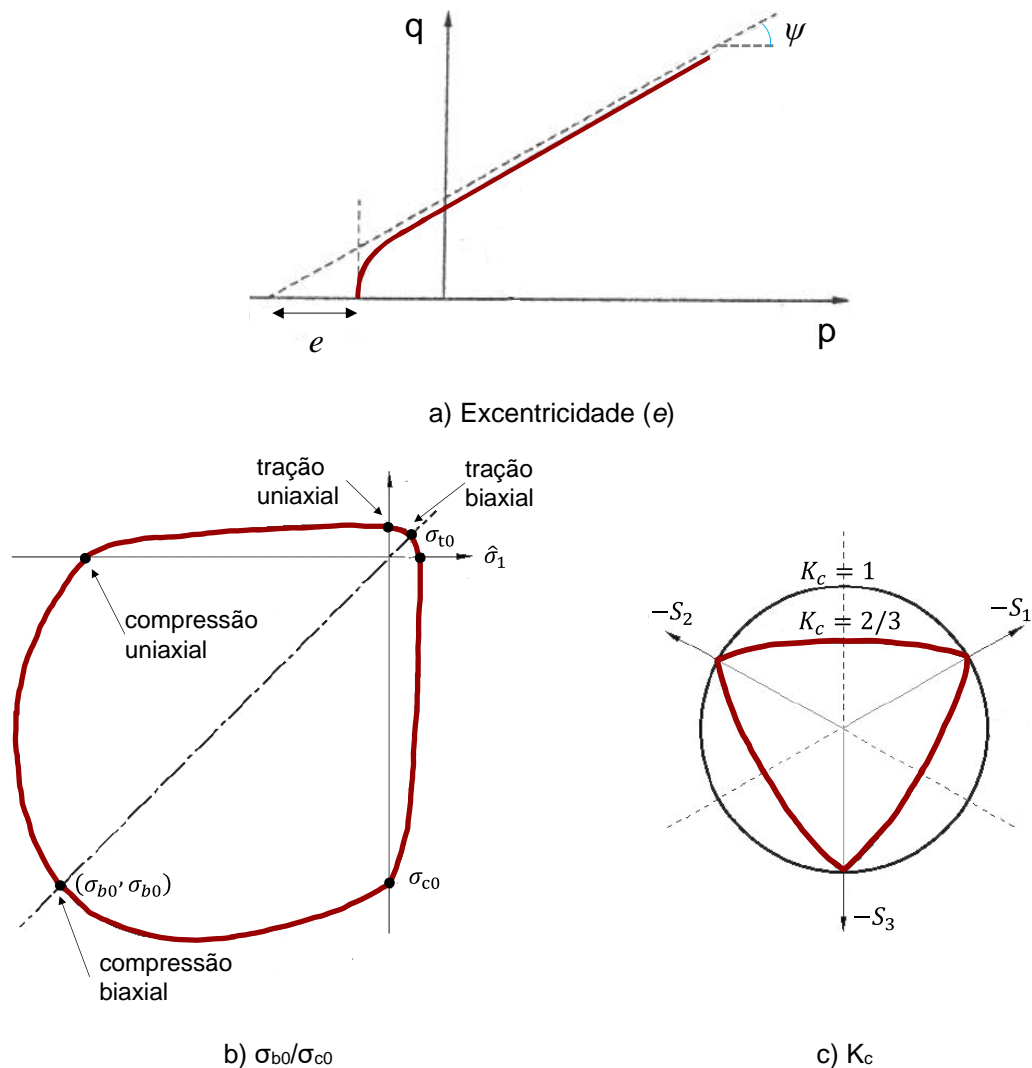
Tabela 4-4: Síntese dos parâmetros do modelo de dano *Concrete Damaged Plasticity*

Parâmetro	Definição	Valores recomendados para concretos convencionais
Ângulo de dilatação ( $\psi$ )	Representa o ângulo de dilatação interno do material, ou seja, ângulo de inclinação entre a superfície de ruptura e o eixo hidrostático. Valores menores correspondem a material mais frágil e valores maiores são usados para materiais dúcteis.	36°, podendo variar de 30° até 42° para o concreto
Excentricidade ( $e$ )	Representa a distância entre o vértice da hipérbole e a intersecção da assíntota desta mesma hipérbole sobre o eixo hidrostático (Figura 4-5 a); o valor 0,1 corresponde a uma hipérbole e 0 representa uma reta.	0,1, podendo ser utilizado como 0 também
$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	Representa a relação entre as tensões de compressão nos estados biaxial e uniaxial (Figura 4-5 b).	1,16
$K_C$	Razão das distâncias entre o eixo hidrostático até o meridiano de compressão e tração, respectivamente (Figura 4-5 c).	2/3
Viscosidade ( $\mu$ )	Parâmetro que distribui o dano em uma área maior	0; mas muitos autores utilizam 0,001

Fonte: Elaborada pelo autor

Para auxiliar na visualização das variáveis, os parâmetros  $e$ ,  $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$  e  $K_C$  são ilustrados nas Figura 4-5 a, Figura 4-5 b e Figura 4-5 c, respectivamente.

Figura 4-5: Ilustração dos parâmetros do modelo concrete damage plasticity



Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.2.4. CARREGAMENTO E CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA

A força de compressão foi aplicada em incrementos; o número de incrementos foi limitado a 200 sendo o incremento inicial igual a 0,001 e tamanho máximo de 0,01.

A não-linearidade geométrica foi considerada. Para convergência do modelo foi utilizado o método de Newton-Raphson com a estratégia do segmento de arco.

### 4.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO NUMÉRICO

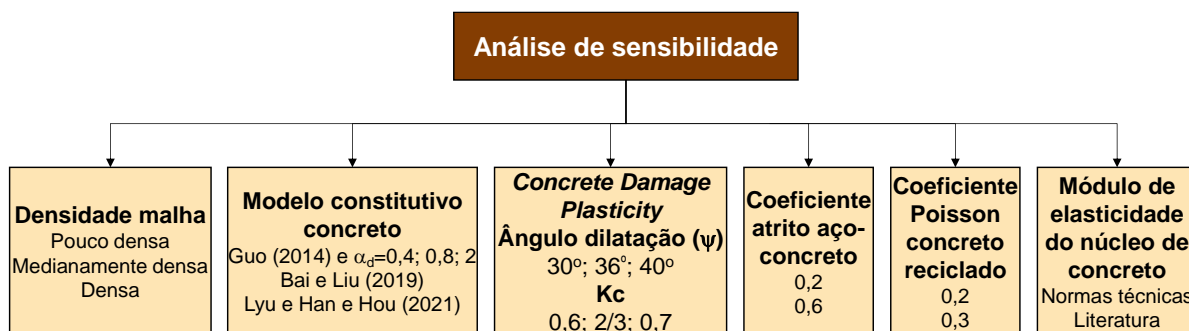
Nesse tópico são apresentadas as análises de sensibilidade realizadas visando construir um modelo numérico que represente o pilar misto preenchido com concreto reciclado submetido à compressão axial centrada. Nesta análise, os resultados experimentais de Gerin

(2020) foram tomados como referência.

Neste contexto, foi avaliada a influência da 1) densidade da malha de elementos finitos, 2) modelo constitutivo do concreto, 3) parâmetros internos do modelo de dano *Concrete Damage Plasticity*, 4) coeficiente de atrito aço-concreto, 5) coeficiente de Poisson do concreto reciclado e 6) módulo de elasticidade do núcleo de concreto. A Figura 4-6 ilustra as variáveis analisadas.

Em seguida, as deformações nos componentes do pilar misto (perfil de aço e núcleo de concreto) obtidas na simulação numérica foram comparadas aos resultados experimentais de Gerin (2020). Por fim, o modelo numérico foi utilizado para comparar o comportamento (força vs. deformação) de pilares mistos de outros autores da literatura: Chen *et al.* (2010), Hou *et al.* (2013), Dong e Wang e Guan (2016) e Lyu e Han e Hou (2021).

**Figura 4-6: Variáveis da análise de sensibilidade do modelo numérico**



Fonte: Elaborada pelo autor

A fim de identificar a influência de cada um dos parâmetros, foi adotado um modelo de referência (Tabela 4-5) e a partir dele, cada uma das variáveis era avaliada individualmente.

**Tabela 4-5: Características do modelo numérico de referência**

Modelo constitutivo do concreto reciclado: Guo (2014) com coeficiente $\alpha_d=0,4$				
Parâmetros do modelo de dano Concrete Damage Plasticity				
Ângulo de dilatação ( $\psi$ )	Excentricidade (e)	$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	Kc	Viscosidade ( $\mu$ )
36°	0,1	1,16	0,6667	0,001
Coeficiente Poisson do concreto: $\nu_c=0,2$				
Coeficiente de atrito aço-concreto: 0,6				

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.3.1. DENSIDADE DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Visando avaliar a influência da malha de elementos finitos sobre a resposta do modelo numérico, foram avaliadas três densidades (Tabela 4-6). A dimensão da malha foi definida a

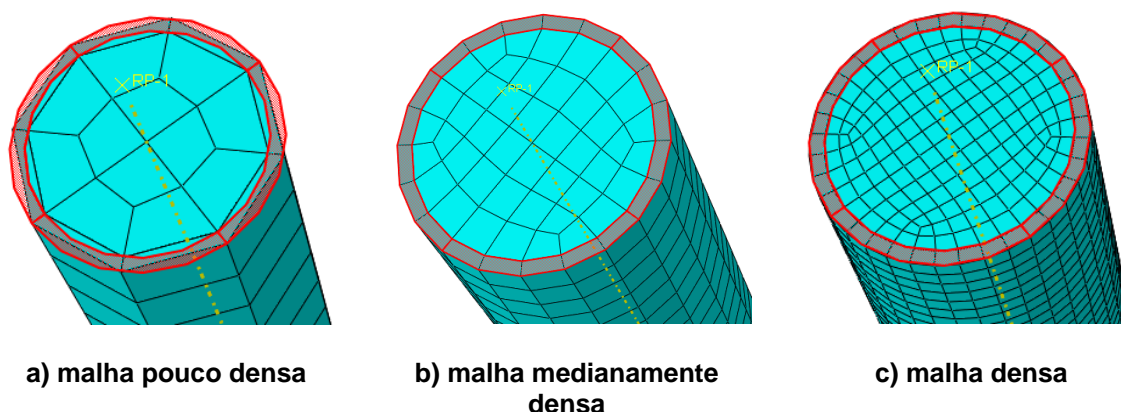
partir da altura do modelo experimental (34,5 cm). A fim de coincidir os nós, as dimensões da Tabela 4-5 foram utilizadas, na medida do possível, tanto no perfil de aço quanto no núcleo de concreto (Figura 4-7).

**Tabela 4-6: Dimensões da malha de elementos finitos**

Dimensão do elemento finito
Malha pouco densa: $l_{elem.} = \frac{H}{10} = \frac{34,5}{10} = 3,45cm$
Malha medianamente densa: $l_{elem.} = \frac{34,5}{20} = 1,73cm$
Malha densa: $l_{elem.} = \frac{H}{40} = \frac{34,5}{40} = 0,86cm$

Fonte: Elaborada pelo autor

**Figura 4-7: Densidades das malhas de elementos finitos**

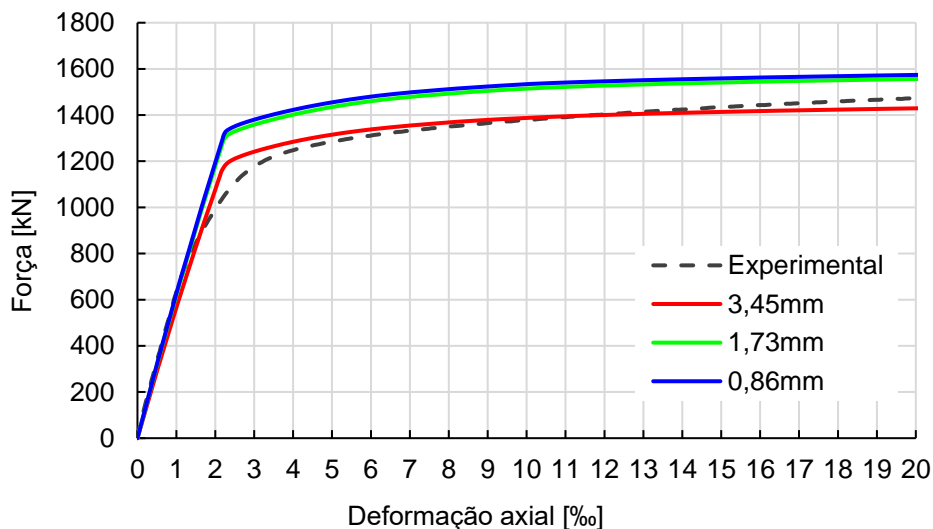


Fonte: Elaborada pelo autor

A resposta Força vs. Deformação axial é influenciada pela densidade da malha de elementos finitos (Gráfico 4-4). Tanto a malha medianamente densa (1,73cm) quanto a malha densa (0,86cm) produziram respostas semelhantes entre si e mais afastadas da resposta experimental. Por outro lado, a malha menos densa (3,45cm) resultou em resposta muito próxima da experimental. Apesar disso, optou-se por utilizar a malha mais densa (0,86cm), nas análises seguintes pois será avaliada a influência de outros parâmetros relacionados ao modelo numérico.



**Gráfico 4-4: Influência da densidade da malha de elementos finitos na resposta do modelo numérico**



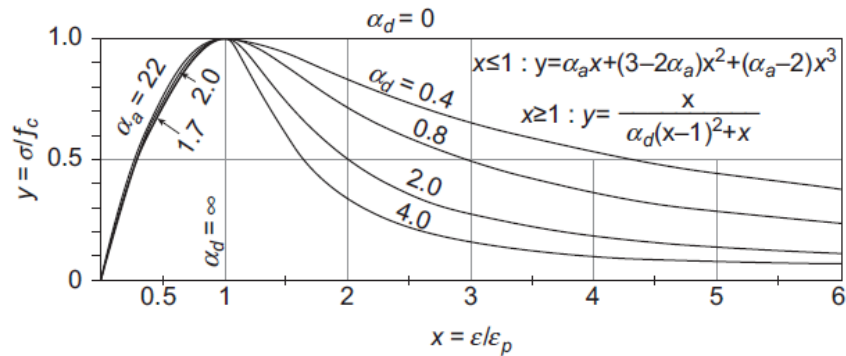
Fonte: Elaborada pelo autor

#### **4.3.2. INFLUÊNCIA DO MODELO CONSTITUTIVO E DOS PARÂMETROS DO MODELO DE DANO DO CONCRETO**

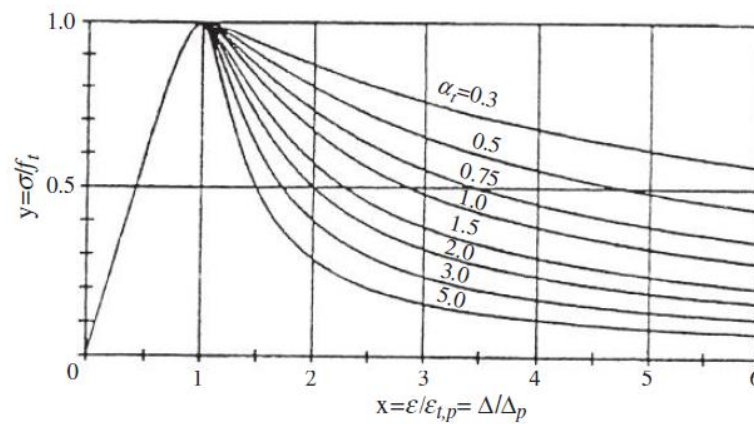
Nesta etapa foram considerados os modelos constitutivos de Guo (2014), Lyu e Han e Hou (2021) e Bai e Liu (2019). Os dois últimos foram desenvolvidos para concretos reciclados confinados. Além disso, os parâmetros de plasticidade do concreto, que expandem o comportamento uniaxial do concreto para o multiaxial foram avaliados considerando duas abordagens: 1) adotando valores da literatura, como os sugeridos para concreto convencional (HILLERBORG; MODÉER; PETERSSON, 1976; LUBLINER *et al.*, 1989; LEE; FENVES, 1998) e concreto reciclado (LYU; HAN; HOU, 2021; HE *et al.*, 2021). 2) variação do ângulo de dilatação ( $\psi$ ) e parâmetro  $K_c$ .

O modelo constitutivo de Guo (2014) foi desenvolvido, inicialmente, para o concreto convencional e depende dos parâmetros como  $\alpha_a$ ,  $\alpha_d$  e  $\alpha_t$ . Os parâmetros  $\alpha_a$  e  $\alpha_d$  estão diretamente relacionados aos trechos ascendente e descendente da curva tensão-deformação do concreto à compressão (Figura 4-8a). Já o parâmetro  $\alpha_t$  define o ramo descendente da curva tensão-deformação do concreto à tração (Figura 4-8 b).

Figura 4-8: Visualização das variáveis  $\alpha_a$ ,  $\alpha_d$  e  $\alpha_t$  do modelo de Guo (2014)



a) Trechos ascendente e descendente do concreto à compressão



b) Trecho descendente do concreto tracionado

Fonte: Guo (2014)

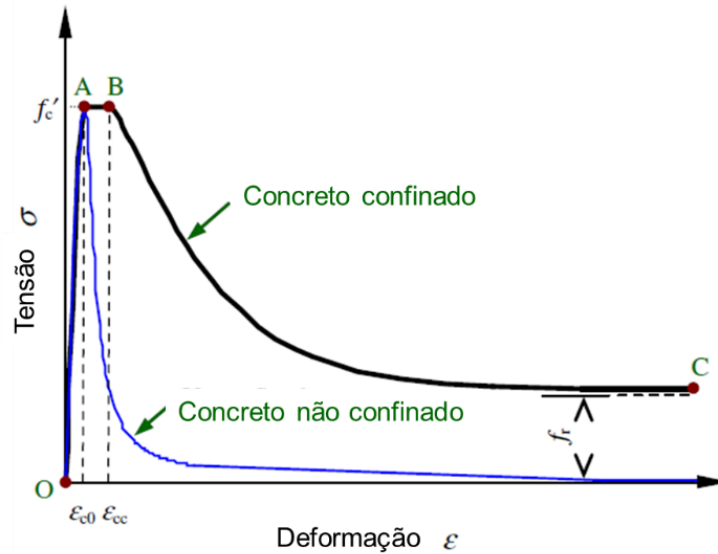
O parâmetro  $\alpha_a$  varia em função do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do concreto; essas propriedades mecânicas são significativamente afetadas pela presença de agregados reciclados. Da mesma forma, o parâmetro  $\alpha_t$  depende da resistência à tração do concreto que, por sua vez, é função da resistência à compressão. Portanto, esses parâmetros não foram avaliados, pois a influência do tipo de agregado foi levada em conta de forma indireta sobre as propriedades mecânicas do concreto.

O parâmetro  $\alpha_d$ , segundo Guo (2014), depende da classe de resistência do concreto. Os valores apresentados pelo autor são 0,4; 0,8 e 2,0, para as classes C20, C30 e C40, respectivamente. Além de estar associado à classe de concreto, o parâmetro  $\alpha_d$  define a intensidade do trecho descendente da curva tensão-deformação, assim, quanto maior seu valor, menor capacidade residual de carga.

Além disso, e Wang e Yu (2013) e Lyu e Han e Hou (2021) levaram em conta que os concretos confinados não apresentam redução significativa na capacidade residual de carga. Portanto, o concreto confinado apresenta alta capacidade residual de carga e mantém alto

nível de tensão mesmo após atingir o pico (Figura 4-9).

**Figura 4-9: Comportamento de concretos confinado e não confinado**

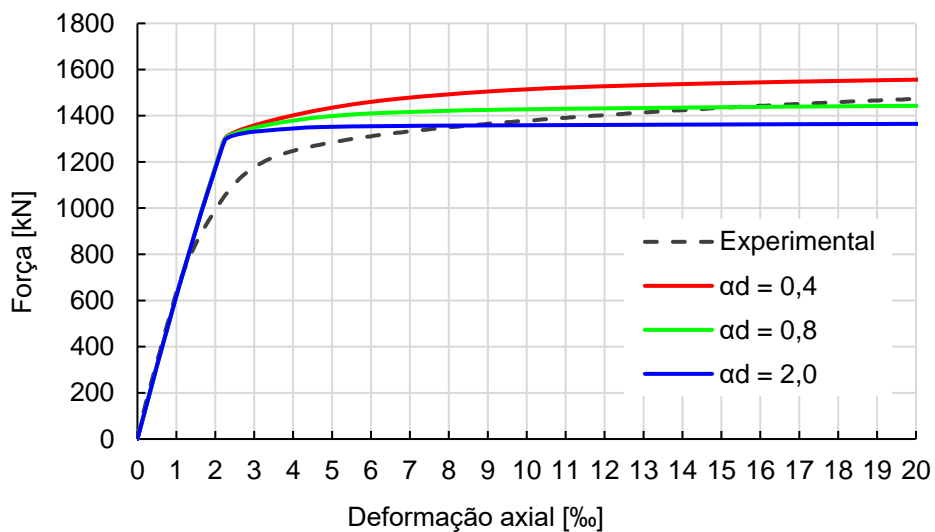


Fonte: Adaptado de Tao e Wang e Yu (2013)

Dessa forma, embora o valor experimental da resistência à compressão tenha sido 38,7 MPa, todas as classes de resistência recomendadas por Guo (2014) foram avaliadas (C20, C30 e C40), com a intenção de associar o valor de  $\alpha_d$  à capacidade residual de carga.

A influência do parâmetro  $\alpha_d$  sobre a resposta do pilar foi avaliada considerando os valores sugeridos por Guo (2014): 0,4; 0,8 e 2,0. Os resultados obtidos são mostrados no Gráfico 4-5.

**Gráfico 4-5: Influência do parâmetro  $\alpha_d$  do modelo constitutivo de Guo (2014) para o concreto**

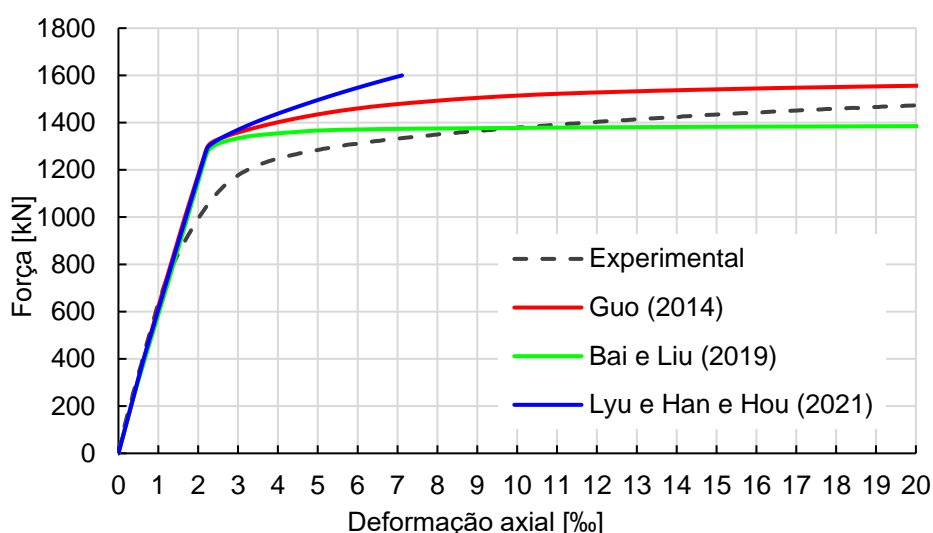


Fonte: Elaborada pelo autor

De acordo com os resultados do Gráfico 4-5, quanto menor o valor de  $\alpha_d$ , maior a capacidade residual de carga. Como resultado, o pilar misto resiste a uma grande parte da carga aplicada mesmo após o início da plastificação do aço. Para  $\alpha_d = 2,0$ ; foi observada uma queda mais acentuada no trecho pós-pico; por outro lado,  $\alpha_d = 0,4$  resultou na maior capacidade residual de carga. Portanto, a resposta com  $\alpha_d = 0,4$  é a que mais se assemelha do trecho da curva pós-pico experimental, mesmo sendo a mais afastada. Uma vez definido o valor de  $\alpha_d$  (0,4) que melhor representa o comportamento pós-pico do modelo de Guo (2014), a próxima etapa foi investigar a influência do modelo constitutivo do concreto.

O Gráfico 4-6 apresenta as respostas obtidas para os três modelos constitutivos do concreto; nesta análise foi considerado  $\alpha_d$  igual a 0,4 para o modelo de Guo (2014).

**Gráfico 4-6: Influência do modelo constitutivo do concreto**



Fonte: Elaborada pelo autor

Em vista dos resultados no Gráfico 4-6, o modelo de Lyu e Han e Hou (2021) não representou adequadamente a resposta experimental no trecho inelástico. Já o modelo de Bai e Liu (2019) resultou em comportamento próximo do experimental. Porém, os parâmetros que definem os trechos ascendente e descendente deste modelo dependem apenas do teor de agregado reciclado (taxa de substituição). Além disso, embora este modelo dependa do teor de substituição, ainda não há equações que representem, adequadamente, a relação entre este parâmetro e propriedades mecânicas como resistência a tração, à compressão e módulo de elasticidade. Assim sendo, é importante que o modelo constitutivo inclua parâmetros que dependam dessas propriedades mecânicas (resistência a tração, à compressão e módulo de elasticidade). Levando isto em conta, o modelo constitutivo de Guo (2014) representou mais adequadamente a resposta experimental Força vs. Deformação.

Por fim, foram avaliados os parâmetros de plasticidade do *Concrete Damage Plasticity* (CDP) considerando duas abordagens: 1) valores recomendados para concretos convencionais e para concretos reciclados, definidos por Lyu e Han e Hou (2021) e He *et al.* (2021) e 2) variação do ângulo de dilatação e do coeficiente  $K_c$ . A Tabela 4-7 ilustra os parâmetros das duas abordagens.

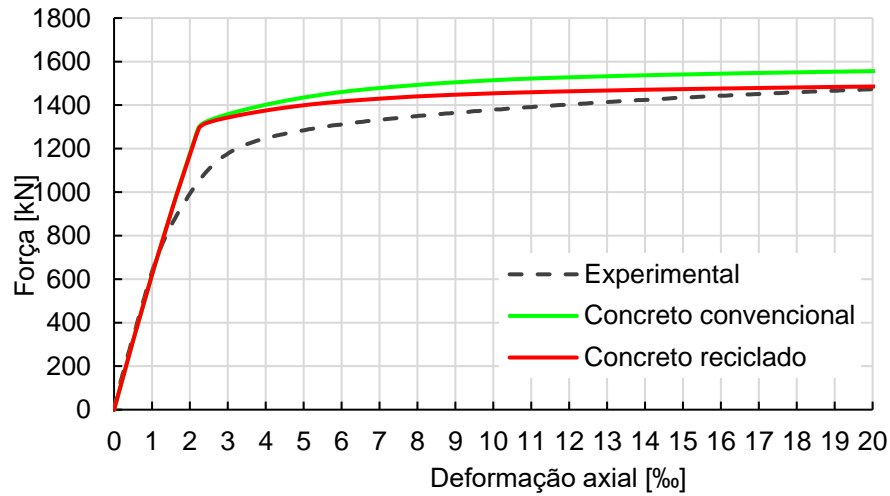
**Tabela 4-7: Parâmetros de plasticidade do CDP avaliados na análise de sensibilidade**

ID	Parâmetro	Ângulo de dilatação ( $\psi$ )	Excentricidade ( $e$ )	$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	$K_c$	Viscosidade ( $\mu$ )
1	Concreto convencional	36°	0,1	1,16	0,667	0,001
2	Concreto reciclado (HE <i>et al.</i> , 2021; LYU; HAN; HOU, 2021)	30°	0,1	1,16	0,667	Não apresentado (Adotado 0,001)
3	Concreto reciclado ( $\psi = 40^\circ$ )	40°	0,1	1,16	0,667	0,001
4	Concreto reciclado ( $K_c = 0,600$ )	36°	0,1	1,16	0,600	0,001
5	Concreto reciclado ( $K_c = 0,700$ )	36°	0,1	1,16	0,700	0,001

Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados da primeira análise (ID 1 e 2, Tabela 4-7) na qual foram considerados valores sugeridos na literatura, respectivamente para concretos convencionais e reciclados são apresentados no Gráfico 4-7. Comparando os resultados, verifica-se que a única diferença entre eles é o ângulo de dilatação; 36° e 30° para concreto convencional e reciclado respectivamente. Houve uma ligeira diferença no trecho inelástico da resposta Força-Deformação, mas esta análise não foi conclusiva. Assim sendo, um valor adicional foi avaliado (ID 1, 2 e 3, Tabela 4-7) e os resultados obtidos são mostrados no Gráfico 4-8a.

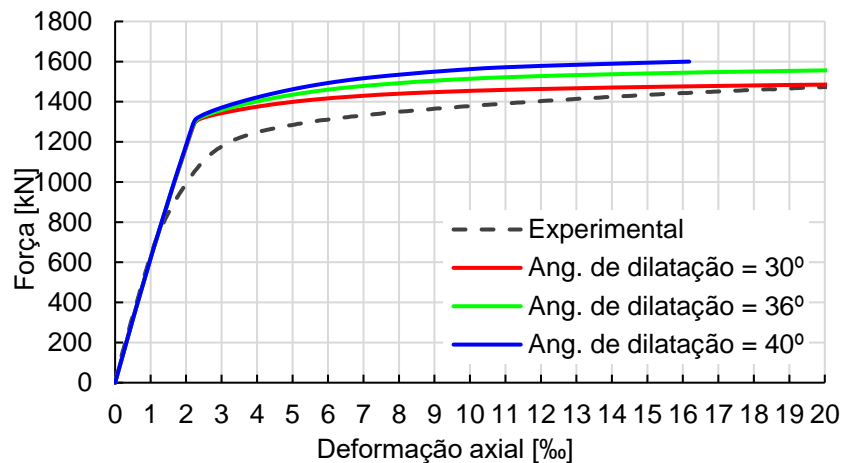
**Gráfico 4-7: Influência dos parâmetros do modelo de dano do concreto convencional e reciclado**



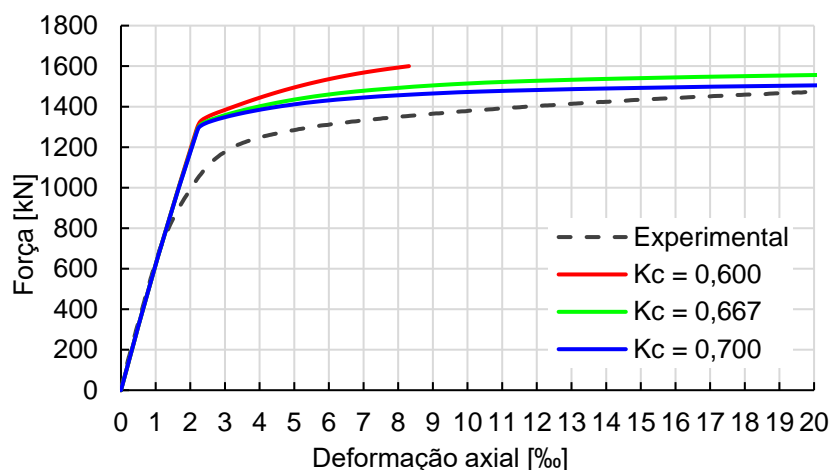
Fonte: Elaborada pelo autor

O trecho elástico do comportamento Força-Deformação não foi influenciado pelo ângulo de dilatação (Gráfico 4-8-a). Por outro lado, a fase inelástica e a força normal resistente foram significativamente influenciadas por esse parâmetro. Quanto maior o ângulo de dilatação, maior a capacidade de carga do modelo numérico. Dentre os valores avaliados, ângulo dilatação igual a  $30^\circ$  resultou em resposta mais próxima da experimental.

**Gráfico 4-8: Influência dos parâmetros do modelo de dano do concreto: a) ângulo de dilatação e b) parâmetro  $K_c$**



a) ângulo de dilatação

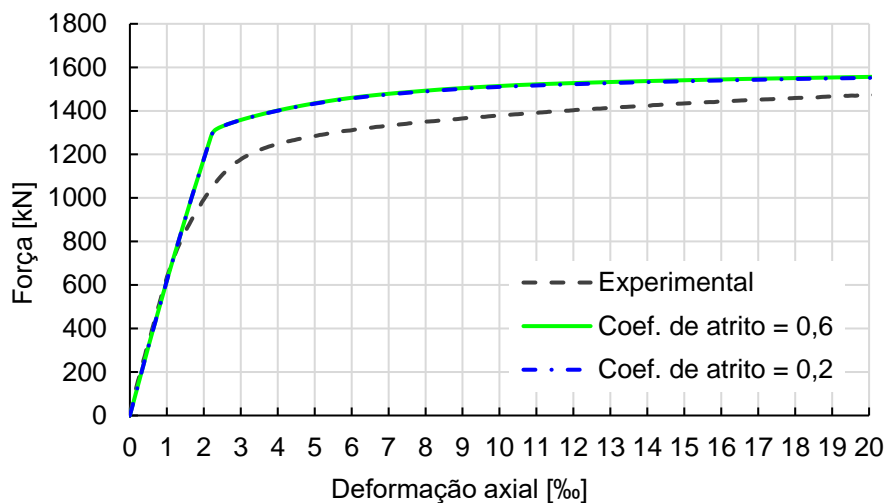
b) parâmetro  $K_c$ 

Fonte: Elaborada pelo autor

Quanto ao parâmetro  $K_c$  os seguintes valores foram avaliados: 0,6; 0,667 e 0,7 (ID 1, 4 e 5, Tabela 4-7). Independentemente do valor de  $K_c$ , as curvas obtidas representam adequadamente o trecho elástico (Gráfico 4-8-b). Em contrapartida, a força resistente e a resposta no trecho plástico foram significativamente influenciadas pelo valor de  $K_c$ . A curva que mais se aproximou da resposta experimental foi obtida para  $K_c=0,700$ . Ao contrário do ângulo de dilatação, quanto maior o valor de  $K_c$ , menor a força máxima (Gráfico 4-8-b).

#### 4.3.3. CONTATO ENTRE AÇO E CONCRETO RECICLADO

A interação entre o tubo de aço e o núcleo de concreto foi representada com a opção tipo "surface-to-surface". Existem diversos modelos para representar o contato e um deles consiste em utilizar os comportamentos normal e tangencial. O comportamento normal entre os dois componentes foi definido como contato rígido e o comportamento tangencial foi definido com um coeficiente de atrito. A influência do valor do coeficiente de atrito foi avaliada, e dois valores foram testados: 0,6, conforme sugerido por Lyu e Han e Hou (2021) e Bai e Liu (2019); e 0,2, conforme recomendado por He *et al.* (2021). A influência do coeficiente de atrito é mostrada no Gráfico 4-9.

**Gráfico 4-9: Influência do coeficiente de atrito entre perfil de aço e núcleo de concreto**

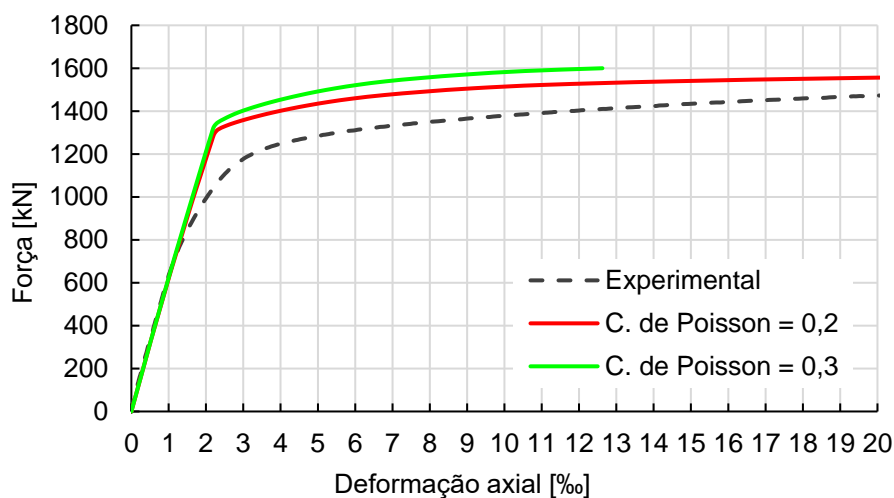
Fonte: Elaborada pelo autor

Não houve diferença entre as respostas obtidas para os dois valores de coeficiente de atrito investigados (Gráfico 4-9). Uma possível explicação para isso é que a carga foi aplicada simultaneamente no aço e no concreto e, por isso, o deslizamento aço-concreto não foi significativo para a resposta do modelo numérico. Coeficiente de atrito igual a 0,6 foi adotado no modelo numérico final.

#### **4.3.4. COEFICIENTE DE POISSON DO CONCRETO RECICLADO**

Foi observado na revisão sistemática que alguns autores utilizaram valores diversos para o coeficiente de Poisson do concreto reciclado. Lyu e Han e Hou (2021) e He *et al.* (2021) utilizaram coeficiente de Poisson igual a 0,2. Já Bai e Liu (2019) adotaram coeficiente de Poisson de 0,3 para concretos reciclados e confinados. O Gráfico 4-10 ilustra a influência do coeficiente de Poisson na resposta Força vs. Deformação axial. O menor valor de coeficiente de Poisson resultou em melhor representatividade do modelo numérico em relação ao experimental (Gráfico 4-10). Dessa forma, foi mantido coeficiente de Poisson igual a 0,2.



**Gráfico 4-10: Influência do coeficiente de Poisson do concreto reciclado**

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.3.5. MÓDULO DE ELASTICIDADE DO NÚCLEO DE CONCRETO

Uma análise de sensibilidade foi conduzida a fim de verificar a influência do módulo de elasticidade na resposta do modelo numérico. Foram utilizados 6 modelos de previsão, 3 encontrados em normas técnicas e 3 na literatura. As Equações (4-24) a (4-29), presentes na Tabela 4-8, representam esses modelos. Para esta análise foram adotados como referência os seguintes valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto:  $f_{cm} = 38,7$  MPa e  $E_c = 26,18$  GPa (GERIN, 2020).

**Tabela 4-8: Modelos de previsão do módulo de elasticidade (continua)**

Referência	Modelo analítico	Previsão do módulo de elasticidade (GPa)	Equação
ABNT NBR 8800 (2008)	$E_c = \alpha_E \cdot 4760 \sqrt{f_{ck}}$	(Considerando $\alpha_E = 1,0$ ) 27,0	(4-24)
Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004)	$E_c = 1,05 \cdot 22 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10}\right)^{0,3}$	33,8	(4-25)
AS 3600 (2018)	$E_c = (\rho^{1,5}) \cdot (0,043 \sqrt{f_{ck}})$	28,7	(4-26)
Xiao e Li e Zhang (2006)	$E_c = \frac{10^5}{2,8 + \frac{40,1}{f_{ck}}}$	24,7	(4-27)
Thomas e Thaickavil e Wilson (2018)	$E_c = E_c^{0,978} \cdot r^{-0,087}$	26,5	(4-28)
Chen e Zhou e Yin (2022)	$E_c = \eta \frac{10^5}{2,2 + \frac{34,7}{f_{ck}}}$	(Agregados reciclados classe II ou III) 23,7	(4-29)

**Tabela 4-8: Modelos de previsão do módulo de elasticidade (continuação)**

Sendo:

$E_c$ : Módulo de elasticidade;

$\alpha_E$ : Valor que depende do tipo de agregado graúdo;

$f_{ck}$ : Resistência à compressão característica;

$\rho$ : Densidade do concreto, em kg/m<sup>3</sup>, quando na impossibilidade de conhecer tal valor, usar 2400 kg/m<sup>3</sup> (AS 3600 (2018));

$r$ : Taxa de substituição do agregado graúdo natural por ARC;

$\eta$ : Valor que depende da qualidade do agregado reciclado.

Fonte: Elaborada pelo autor

Na previsão do módulo de elasticidade (Tabela 4-8) foi utilizado o valor característico da resistência à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ). Para isso, foi adotado o valor experimental médio ( $f_{cm} = 38,7$  MPa) obtido por Gerin (2020). A resistência média à compressão ( $f_{cm}$ ) foi adotada para obter a resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) conforme Equação (4-30) recomendada pela ABNT NBR 12655 (2022). Para isso, foi utilizado  $s_d=4,0$  MPa, pois o valor foi encontrado em laboratório, resultando em ( $f_{ck} = 32,1$  MPa).

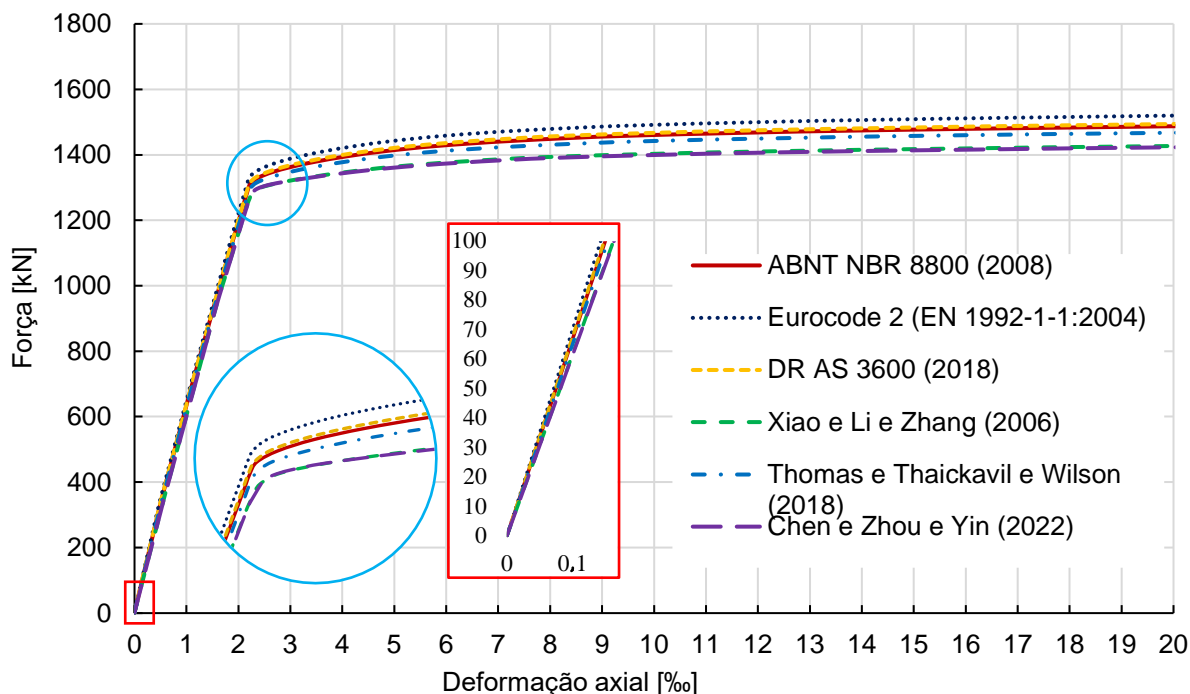
$$f_{ck} = f_{cm} - 1,645 \cdot s_d \quad (4-30)$$

Sendo:

$s_d$ : desvio padrão, com valores de 4 a 7, de acordo com a condição de preparo do concreto.

O Gráfico 4-12 ilustra a influência do módulo de elasticidade no comportamento Força vs. Deformação do modelo numérico.

**Gráfico 4-11: Influência do módulo de elasticidade do concreto reciclado na resposta do modelo numérico**



Fonte: Elaborada pelo autor

O trecho inelástico da resposta Força vs. Deformação é levemente influenciado pelo módulo de elasticidade do núcleo de concreto (Gráfico 4-12). Na fase elástica, o comportamento foi praticamente idêntico para todos os valores avaliados. De acordo com os resultados obtidos, o modelo analítico de Chen e Zhou e Yin (2022) (Tabela 4-8) foi utilizado para prever o módulo de elasticidade de concretos reciclados de alguns modelos cujos valores não foram informados pelos autores. Estes valores foram utilizados para obter alguns dos resultados do item 4.4.3.

#### 4.4. CARACTERÍSTICAS DO MODELO NUMÉRICO VALIDADO

Após análise da influência de diversas variáveis sobre a resposta do modelo numérico, foi definida a combinação mais adequada (Tabela 4-9) para representar o comportamento experimental do modelo de Gerin (2020).

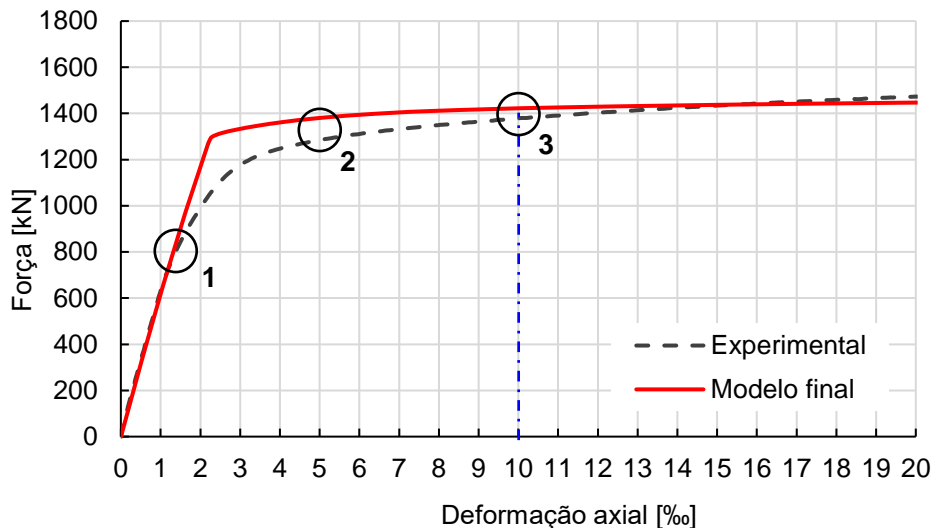
**Tabela 4-9: Características do modelo numérico validado**

Modelo constitutivo do concreto reciclado: Guo (2014) com coeficiente $\alpha_d$ de 0,4				
<b>Parâmetros do modelo de dano Concrete Damage Plasticity</b>				
Ângulo de dilatação ( $\psi$ )	Excentricidade ( $e$ )	$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	$K_C$	Viscosidade ( $\mu$ )
30°	0,1	1,16	0,7	0,001
Coeficiente Poisson do concreto: $\nu_c=0,2$				
Coeficiente de atrito aço-concreto: 0,6				
Malha densa: $l_{elem.} = \frac{H}{40}$				

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 4.4.1. COMPORTAMENTO DO PILAR MISTO

O Gráfico 4-12 ilustra a resposta do modelo numérico final. O modelo numérico representa adequadamente da resposta experimental, com destaque para o trecho elástico (Gráfico 4-12, até o ponto 1). O trecho inelástico apresenta leve variação em relação à resposta experimental. Esta diferença pode ter sido causada, por exemplo, por tensões residuais no perfil de aço, antecipando e intensificando a plastificação em relação ao modelo numérico (Gráfico 4-12, entre pontos 1 e 3).

**Gráfico 4-12: Modelo numérico final em comparação com resposta experimental**

Fonte: Elaborada pelo autor

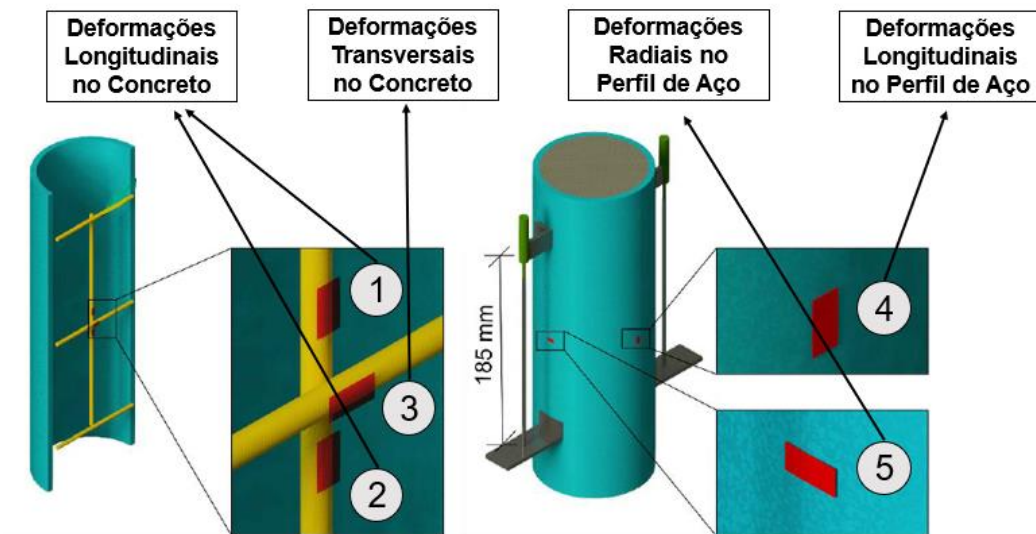
Em relação à força normal resistente, como não foi identificada ruptura característica e nem patamar definido no gráfico Força vs. Deformação, Gerin (2020) adotou deformação de 10‰ (Gráfico 4-12, ponto 3) e extraiu a força resistente correspondente, que foi igual a

1377,15 kN. Para essa mesma deformação, a força resistente extraída do modelo numérico foi 1421,2 kN, uma diferença de apenas 3,2% em relação ao valor experimental.

#### 4.4.2. COMPORTAMENTO DOS COMPONENTES DO PILAR MISTO

Além do comportamento global do pilar misto, foram avaliadas as deformações dos componentes (aço e concreto). No modelo físico as deformações foram registradas por cinco extensômetros utilizados para medir as deformações longitudinais e radiais do aço e concreto (Figura 4-10).

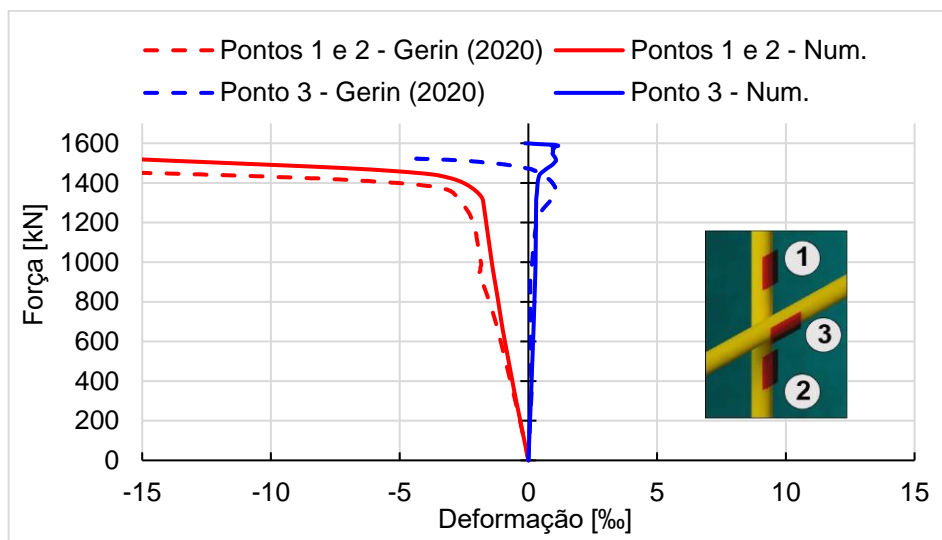
Figura 4-10: Pontos de registro de deformações nos componentes (aço e concreto)



Fonte: Adaptado de Gerin (2020)

No que se refere ao concreto confinado, o Gráfico 4-13 ilustra seu comportamento nas direções axial e transversal.

Gráfico 4-13: Deformações longitudinais e transversais do núcleo de concreto do pilar misto

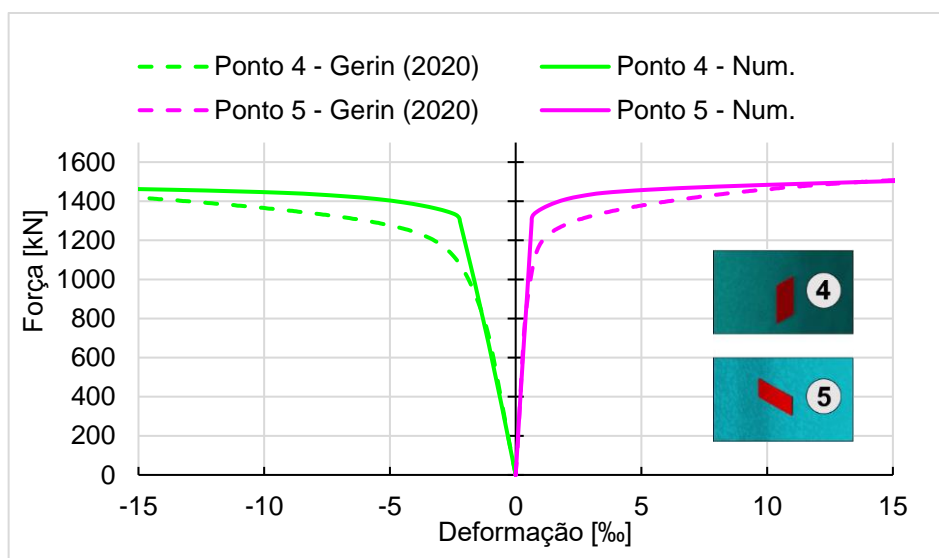


Fonte: Elaborada pelo autor

O modelo numérico reproduziu de forma adequada a deformação axial no núcleo de concreto (Gráfico 4-13). Quanto à deformação na direção transversal, o trecho elástico foi adequadamente representado, mas no trecho inelástico é observado certo distanciamento entre as repostas experimental e numérica. Contudo, este distanciamento localizado em um pequeno trecho em nada compromete a excelente representatividade do modelo numérico em reproduzir as deformações axial e transversal no concreto confinado.

Para o perfil de aço, as deformações longitudinais e radiais são mostradas no Gráfico 4-14. Houve excelente correlação tanto para as deformações longitudinais quanto radiais no perfil de aço. Assim como aconteceu com o comportamento global do pilar (Gráfico 4-12), observa-se leve distanciamento das deformações no perfil de aço após o trecho elástico (Gráfico 4-14). Contudo, em geral, as deformações no aço foram adequadamente reproduzidas pelo modelo numérico.

**Gráfico 4-14: Deformações longitudinais e radiais no perfil de aço**



Fonte: Elaborada pelo autor

Portanto, conclui-se que o modelo representou muito bem tanto o comportamento global quando as deformações nos componentes do modelo ensaiado por Gerin (2020). Assim sendo, o modelo foi considerado validado. No subcapítulo seguinte foi comparado a resultados de outros autores da literatura.

#### **4.4.3. COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA LITERATURA**

Após validação do modelo numérico por meio dos resultados experimentais de Gerin (2020), foi avaliada sua capacidade e robustez para representar outros resultados da literatura. Nesta etapa foram utilizados resultados experimentais de 4 documentos da literatura: Chen *et al.* (2010), Hou *et al.* (2013), Dong e Wang e Guan (2016) e Lyu e Han e

Hou (2021). Nesta análise foram incluídos apenas exemplares com substituição total do agregado natural graúdo por agregado reciclado de concreto.

A Tabela 4-10 apresenta as características físicas e geométricas dos modelos experimentais desses autores. Os valores de módulo de elasticidade ( $E_a$ ) e da resistência última à tração do aço ( $f_u$ ) não foram informadas por Chen *et al.* (2010) e Dong e Wang e Guan (2016). Então, nesses casos, assumiu-se  $E_a = 200$  GPa e  $f_u = f_y$ . Além disso, o módulo de elasticidade do concreto não foi informado por Chen *et al.* (2010) e Hou *et al.* (2013). Nesses casos, como a análise de sensibilidade apresentada no capítulo anterior mostrou que o módulo de elasticidade não tem influência significativa na resposta do modelo numérico (Gráfico 4-12), este foi previsto usando o modelo analítico de Chen e Zhou e Yin (2022) (Equação (4-29)).

**Tabela 4-10: Características físicas e geométricas dos modelos da literatura**

Referência	D [mm]	t [mm]	L [mm]	L/D	$f_{cm}$ [MPa]	$E_c$ [GPa]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [GPa]	$E_a$ [GPa]	$N_{exp}$ [kN]
Chen <i>et al.</i> (2010)	113,1	2,27	360	3,2	29,2	20,40*	357,2	442,8	200,0*	670
Hou <i>et al.</i> (2013)	114	1,70	400	3,5	35,5	22,78*	300,0	390,0	195,0	557
Dong e Wang e Guan (2016)	114	2,00	400	3,5	34,0	24,88	300,3	300,3*	195,4	571
Lyu e Han e Hou (2021)	140	2,88	420	3,0	51,6	32,14	434,1	581,2	209,7	1520

Sendo:

$D$ : Diâmetro externo do pilar misto;

$t$ : Espessura do perfil de aço;

$L$ : Comprimento do pilar misto;

$f_{cm}$ : Resistência à compressão do núcleo de concreto;

$E_c$ : Módulo de elasticidade do núcleo de concreto;

$f_y$ : Resistência ao escoamento do perfil de aço;

$f_u$ : Resistência última à tração do perfil de aço;

$E_a$ : Módulo de elasticidade do perfil de aço;

$N_{exp}$ : Força normal resistente obtida experimentalmente;

\* valores adaptados segundo recomendações da ABNT NBR 8800 (2008) e Chen e Zhou e Yin (2022).

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 4-11 apresenta os valores de força normal resistente experimentais e da modelagem numérica. Verifica-se que os valores previstos têm ótima concordância com os

resultados experimentais.

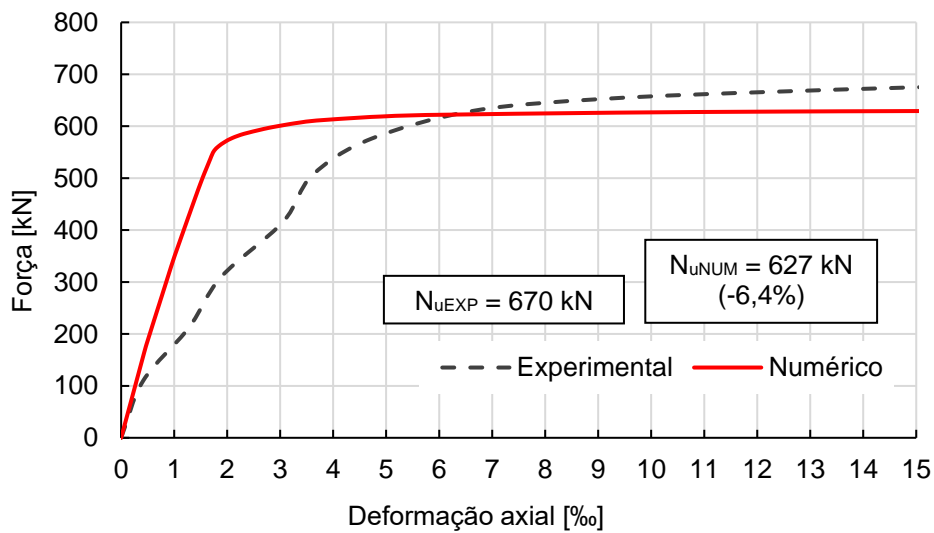
**Tabela 4-11: Comparação entre a força normal resistente experimental e numérica**

Referência	$N_{uEXP}$	$N_{uNUM}$	$N_{uNUM}/N_{uEXP}$
Gerin (2020)	1377	1421	1,03
Chen <i>et al.</i> (2010)	670	627 (-6,4%)	0,94
Hou <i>et al.</i> (2013)	557	571 (+2,5%)	1,02
Dong e Wang e Guan (2016)	571	595 (+4,2%)	1,04
Lyu e Han e Hou (2021)	1520	1401 (-7,8%)	0,92
Média			0,99

Fonte: Elaborada pelo autor

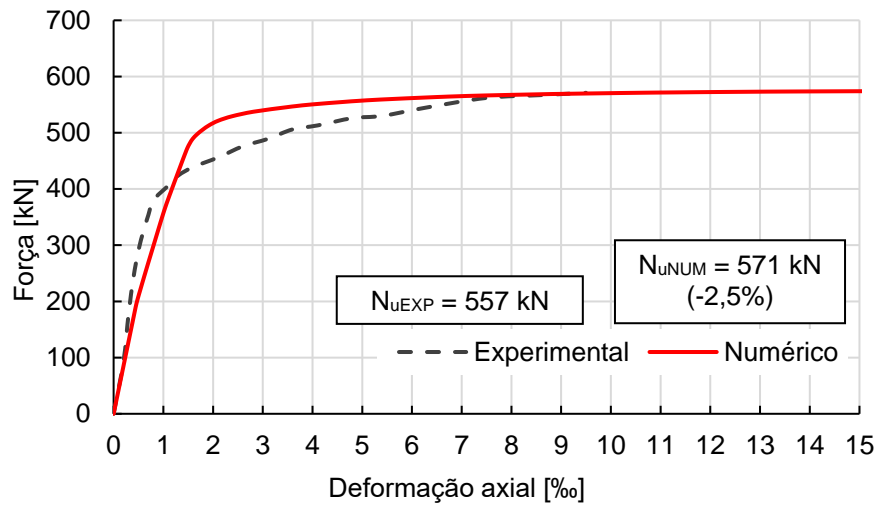
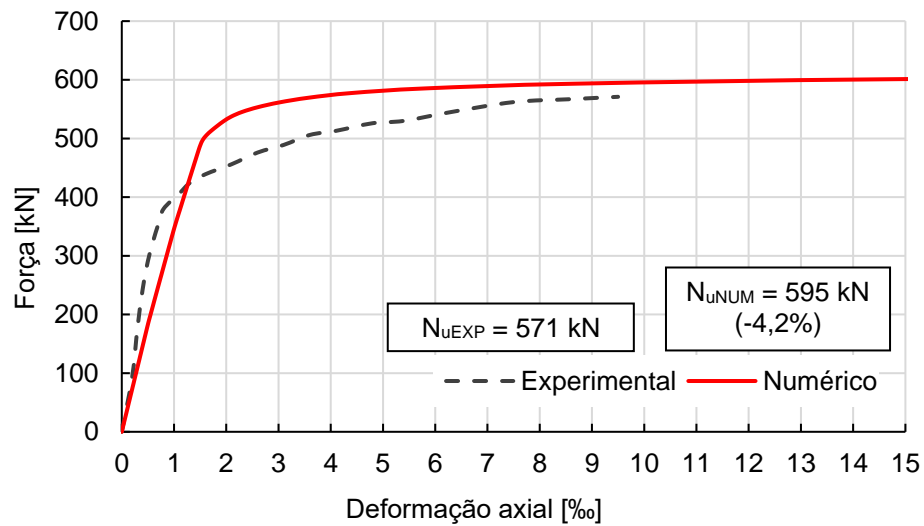
Na Figura 4-11 são apresentados os comportamentos oriundos da análise experimental e da modelagem numérica.

**Figura 4-11: Comparação entre modelo numérico e resultados experimentais da literatura**

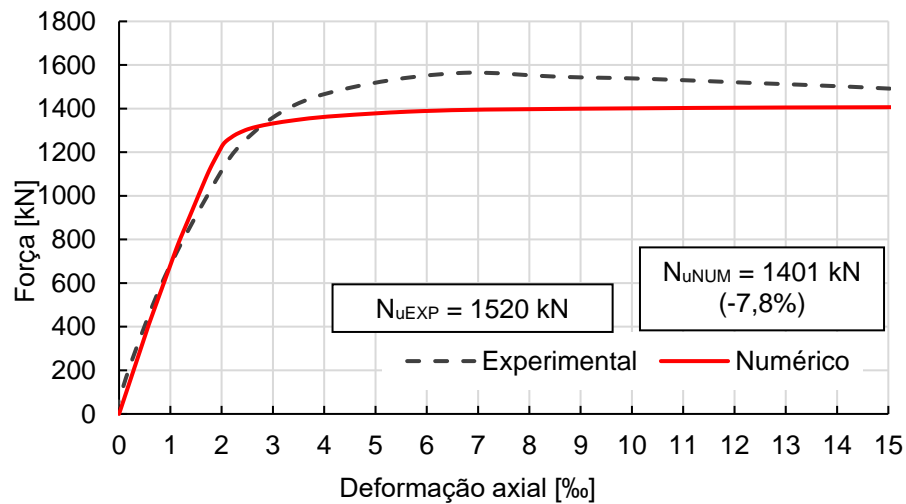


a) Modelo de Chen *et al.* (2010)



b) Modelo de Hou *et al.* (2013)

c) Modelo de Dong e Wang e Guan (2016)



d) Modelo de Lyu e Han e Hou (2021)

Fonte: Elaborada pelo autor

Do observado na Figura 4-11, os modelos numéricos apresentaram precisão em prever o comportamento força vs. deformação dos ensaios experimentais (Figura 4-11). No entanto, em relação aos resultados experimentais de Chen *et al.* (2010), a resposta do modelo numérico mostrou uma ligeira diferença no regime elástico (Figura 4-11-a). Apesar disso, a força normal resistente extraída do modelo numérico apresentou uma diferença de apenas 6% em relação ao valor experimental (Tabela 4-11).

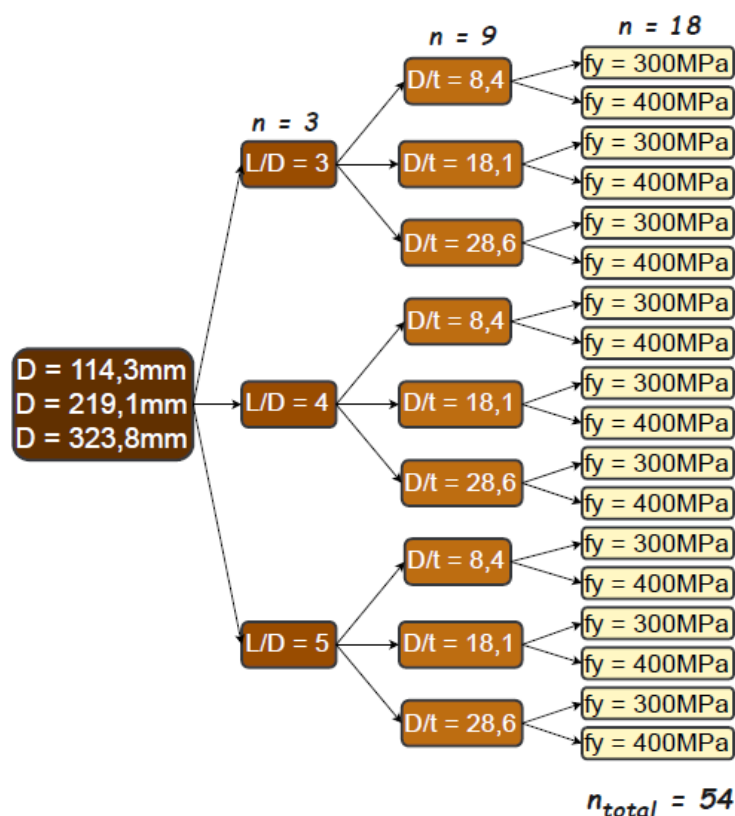
Portanto, o modelo numérico desenvolvido nesse estudo previu com eficácia o comportamento Força vs. Deformação e a força normal resistente dos exemplares avaliados. Assim sendo, tal modelo será aplicado em análises paramétricas cujos resultados são apresentados e discutidos no próximo capítulo.

## 5. ESTUDO PARAMÉTRICO

Uma vez que o modelo numérico foi validado, está apto para representar pilares mistos de seção circular, preenchidos com concreto reciclado. A análise da influência de diversos parâmetros geométricos sobre o comportamento Força vs. Deformação axial e Força normal resistente foi feita utilizando os resultados gerados pelas simulações numéricas.

Assim, no estudo paramétrico os seguintes parâmetros foram avaliados: diâmetro, espessura e resistência ao escoamento do perfil de aço; e comprimento do pilar. Para isso, foram adotados 3 valores distintos de diâmetro e definidas diversas relações L/D e D/t (Figura 5-1).

**Figura 5-1: Parâmetros avaliados na análise paramétrica dos pilares mistos preenchidos com concreto reciclado**



Fonte: Elaborada pelo autor

A variação na relação diâmetro/espessura (D/t) tomou como base o catálogo de perfis tubulares da Vallourec<sup>3</sup>, sendo respeitados os diâmetros mínimos e máximos comerciais,

<sup>3</sup> Disponível em: < <https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/20437/24986/126catalogo-tubos-estruturais.pdf>>  
Acesso em 10 de março de 2022.

4mm e 25mm, respectivamente. Além disso, foram adotados valores de relação D/t que respeitam os limites normativos da ABNT NBR 8800 (2008), Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) e AS/NZS 2327 (2016).

A relação (L/D) se embasou em pilares curtos (relação L/D  $\leq 5$ ), conforme estudos de Oliveira *et al.* (2009). Além disso, o índice de esbeltez reduzido  $\lambda_{o,m}$ , foi limitado até 0,5.

Nesta análise, as características relacionadas ao concreto foram mantidas constantes e iguais aos valores validados no capítulo anterior ( $f_{ck} = 38,66\text{MPa}$  e  $E_c = 26,18\text{GPa}$ ).

Os próximos itens descrevem detalhes das análises realizadas nesse estudo: comportamento força vs. deformação; força normal resistente e comparação da força resistente com previsões normativas.

## 5.1. COMPORTAMENTO GLOBAL

O comportamento global, definido pela resposta Força vs. Deformação foi avaliado tendo em vista a influência de cada um dos parâmetros avaliados, ou seja, relação L/D, relação D/t e resistência ao escoamento do aço. Numa tentativa de associar parâmetros matemáticos ao comportamento pós-pico, alguns autores propõem o uso do fator de confinamento mostrado na Equação (5-1) (JOHANSSON; GYLLTOFT, 2002; TAO; WANG; YU, 2013; GERIN, 2020; HE *et al.*, 2021).

No presente estudo é proposto o uso da Equação (5-2) que leva em conta a relação entre as forças normais correspondentes às deformações axiais de 3 e 10‰.

$$\xi = \frac{A_s \cdot f_{yk}}{A_c \cdot f_{ck}} \quad (5-1)$$

$$\alpha_F = \frac{F_{\varepsilon-10\text{‰}}}{F_{\varepsilon-3\text{‰}}} \quad (5-2)$$

Sendo:

$\xi$ : Fator de confinamento;

$A_s$ : Área da seção transversal do perfil de aço;

$A_c$ : Área da seção transversal de concreto;

$f_{ck}$ : Resistência à compressão do concreto, valor característico;

$f_{yk}$ : Resistência ao escoamento do perfil de aço, valor característico;

$\alpha_F$ : Diferença entre força normal resistente para diferentes deformações;

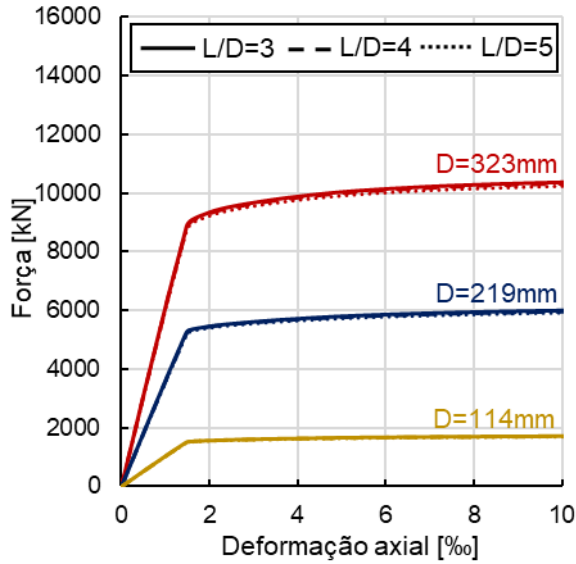
$F_{\varepsilon-y}$ : Força normal resistente referente a deformação “y”.

### 5.1.1. RELAÇÃO L/D

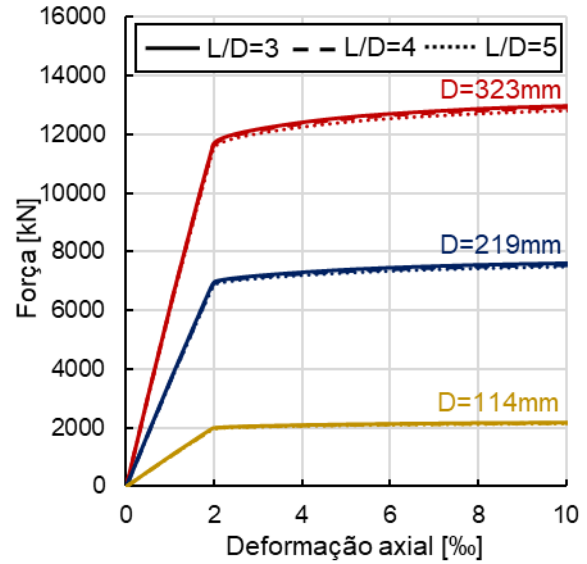
No estudo da relação L/D os diâmetros foram mantidos constantes e houve variação

do comprimento do pilar (exemplificando, para um pilar com diâmetro 114mm, relações L/D iguais a 3, 4 e 5 correspondem, respectivamente, a comprimentos de 342mm, 456mm e 570mm). Os três valores de L/D avaliados não tiveram influência significativa no comportamento dos pilares (Figura 5-2).

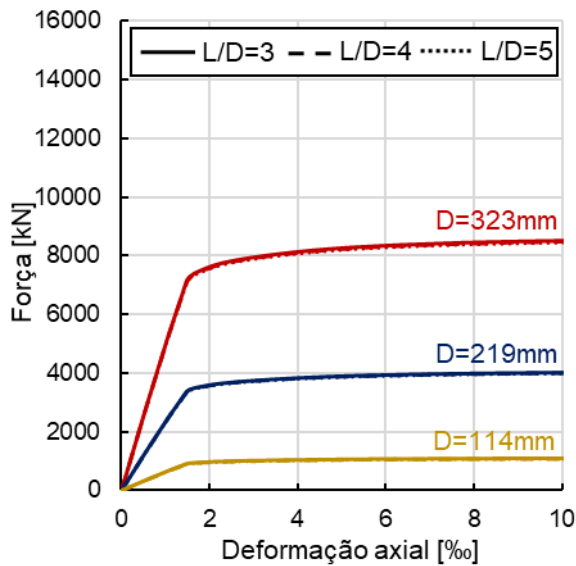
**Figura 5-2: Influência da relação L/D no comportamento do pilar preenchido**



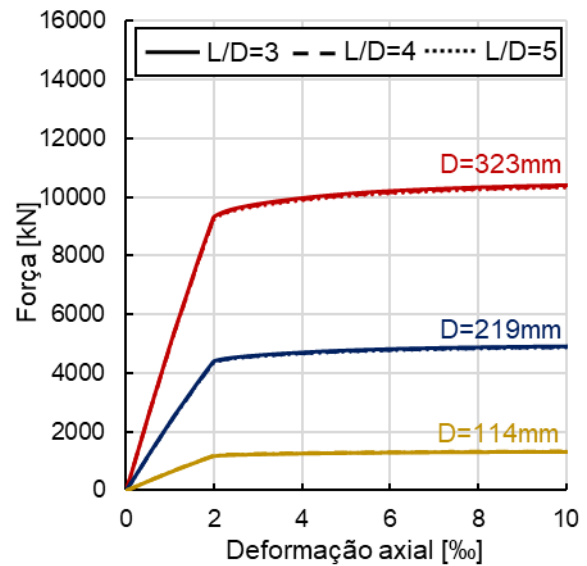
a)  $D/t = 8,4$  e  $f_y = 300$  MPa



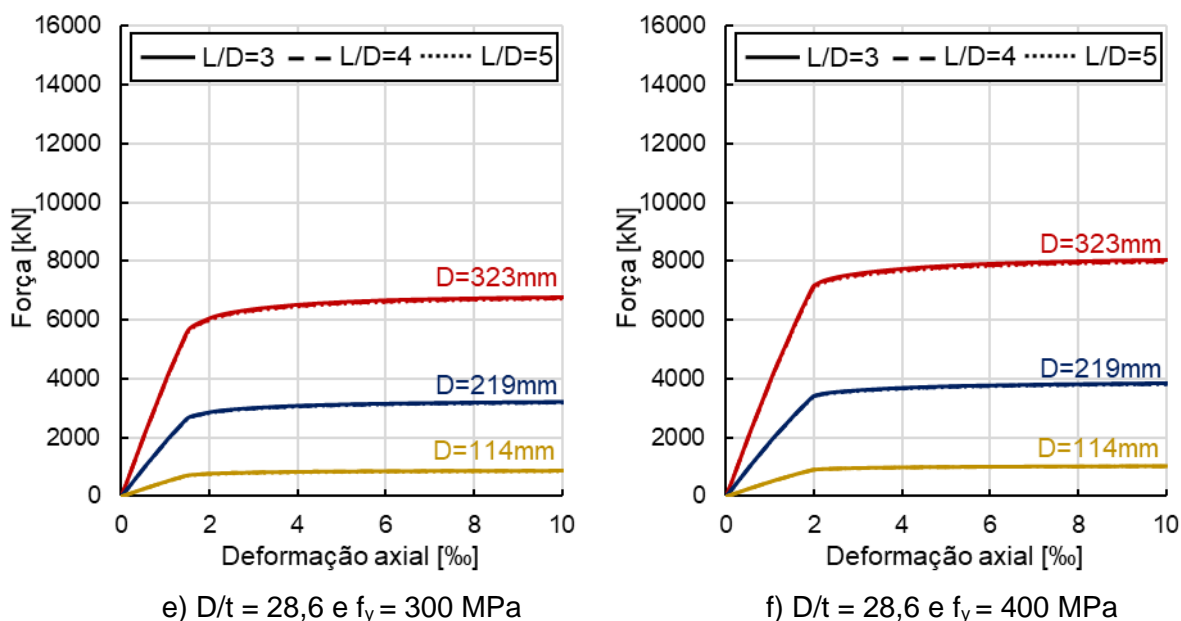
b)  $D/t = 8,4$  e  $f_y = 400$  MPa



c)  $D/t = 18,1$  e  $f_y = 300$  MPa



d)  $D/t = 18,1$  e  $f_y = 400$  MPa

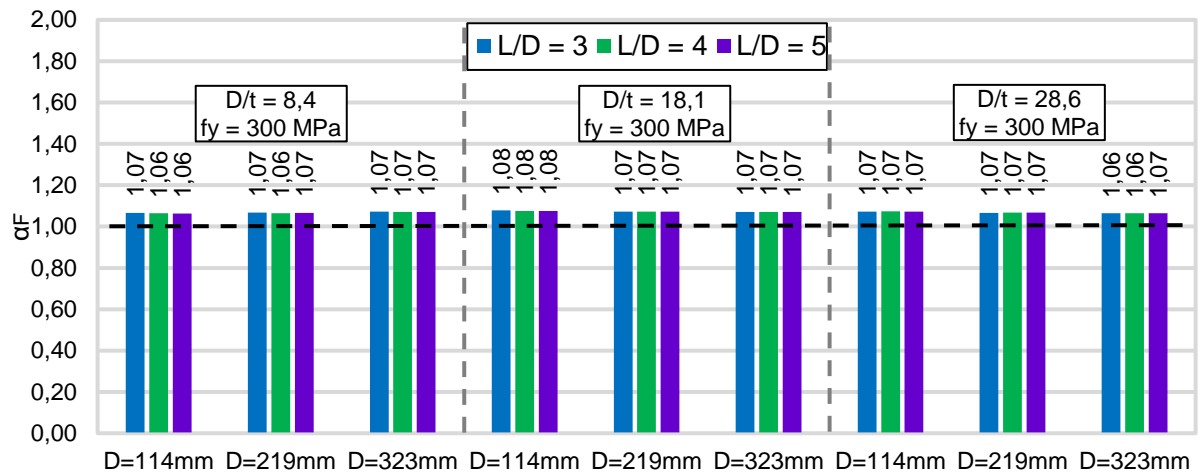


Fonte: Elaborada pelo autor

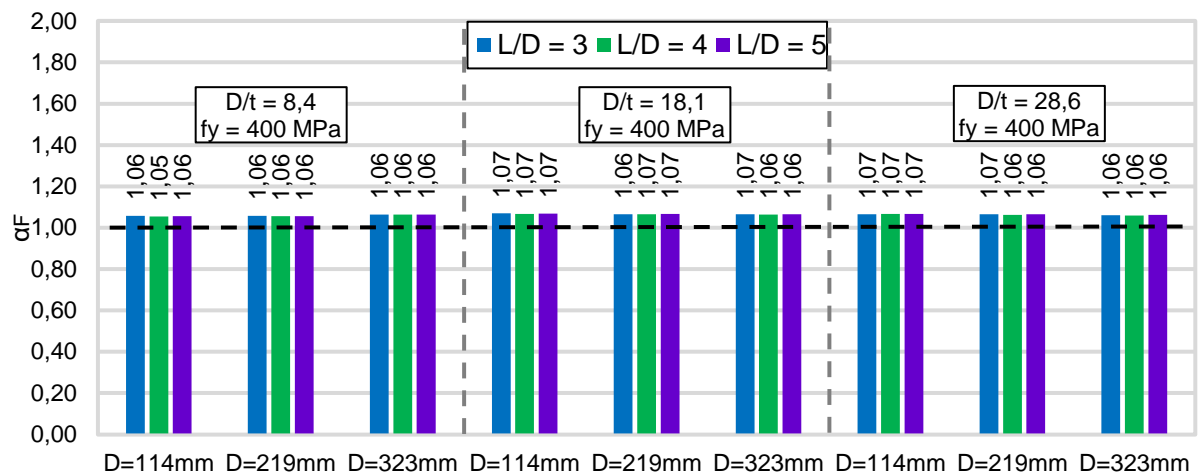
Para cada relação  $L/D$  (3, 4 ou 5), as curvas se sobrepõem indicando que não há mudança significativa. Embora, a variação de  $L/D = 3$  para  $L/D = 5$  pareça significativa, ambos os valores correspondem a exemplares curtos. Além disso, no modelo numérico não foram incluídas imperfeições geométricas e tensões residuais, que usualmente acontecem em um modelo físico e poderiam levar a variações no comportamento.

Numa análise visual, a maior parte dos resultados apresenta um trecho inicial elástico seguido de um trecho com comportamento inelástico e encruamento positivo. Uma análise mais detalhada do comportamento dos pilares em função da variação na relação  $L/D$  pode ser feita considerando os parâmetros de confinamento  $\xi$  e  $\alpha_F$ . Ambos os parâmetros tentam identificar os diversos comportamentos pós-pico possíveis (elastoplástico com encruamento positivo, elastoplástico perfeito e elastoplástico com encruamento negativo). Dessa forma, a Figura 5-3 ilustra os resultados de  $\alpha_F$  enquanto a Figura 5-4 mostra os valores do fator de confinamento ( $\xi$ ) para os 6 casos avaliados da Figura 5-2.

Figura 5-3: Influência da relação L/D no parâmetro  $\alpha_F$



a) Relações D/t = 8,4; 18,1 e 28,6 e  $f_y = 300$  MPa

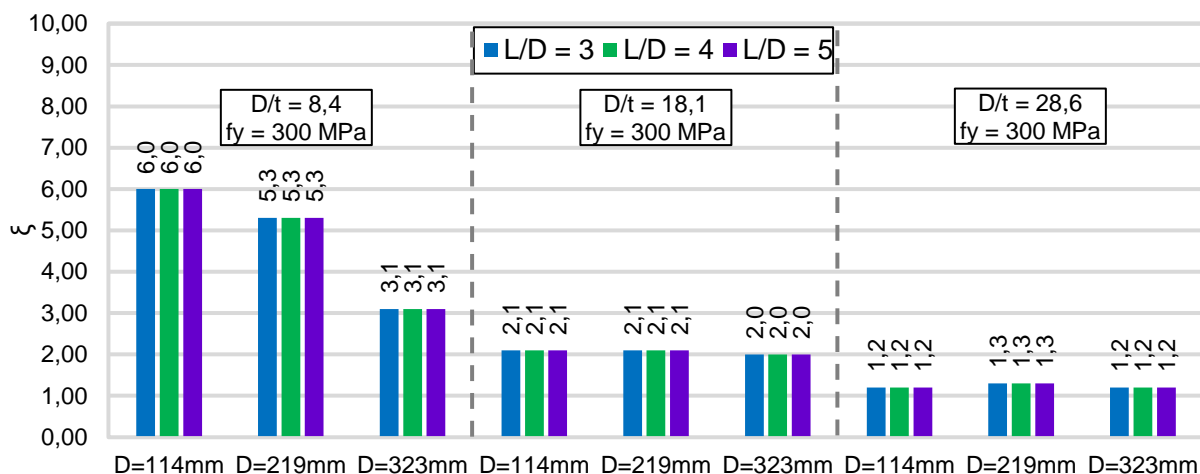
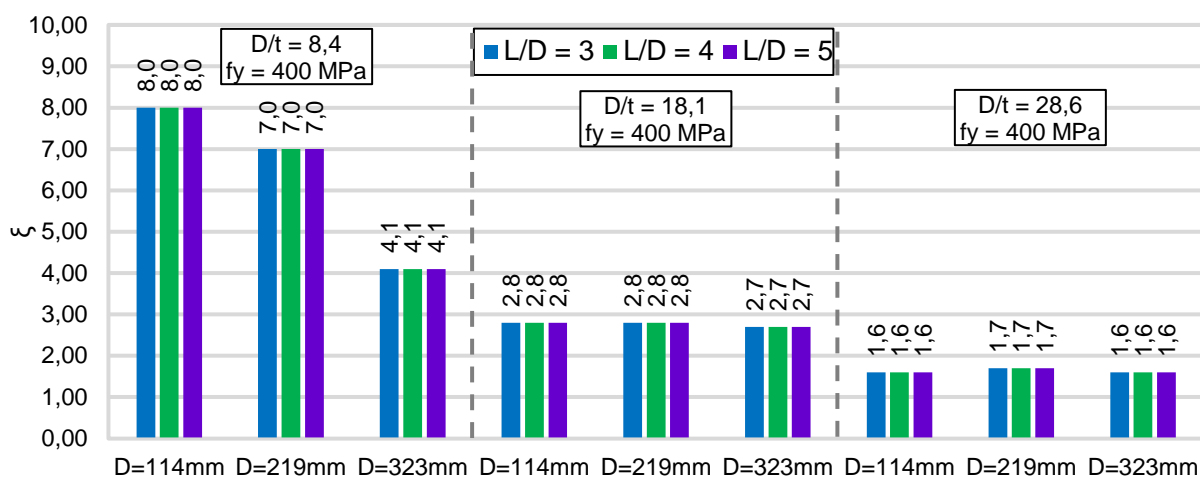


b) Relações D/t = 8,4; 18,1 e 28,6 e  $f_y = 400$  MPa

Fonte: Elaborada pelo autor

Todos os modelos avaliados apresentaram  $\alpha_F$  entre 1,05 e 1,07 (Figura 5-3). Portanto, confirma-se o comportamento elastoplástico perfeito ( $\alpha_F \cong 1$ ) observado visualmente nos gráficos da Figura 5-2.

O fator de confinamento  $\xi$  depende das áreas e das resistências do aço e do concreto. Por isso, ao avaliar a influência da relação L/D, para cada diâmetro será obtido um valor constante para o fator de confinamento  $\xi$ . Portanto, como observado na Figura 5-4, o fator de confinamento está muito mais relacionado à taxa de aço do que ao comportamento dos pilares mistos. E, por isso, o fator de confinamento não foi influenciado pela relação L/D.

Figura 5-4: Fator de confinamento  $\xi$  e a relação L/Da) Relações D/t = 8,4; 18,1 e 28,6 e  $f_y = 300$  MPab) Relações D/t = 8,4; 18,1 e 28,6 e  $f_y = 400$  MPa

Fonte: Elaborada pelo autor

Para que fosse possível classificar o comportamento utilizando o fator de confinamento, diversas características geométricas e dos materiais deveriam ser incluídas. A análise do parâmetro  $\xi$  requer a definição de um fator crítico ( $\xi_0$ ), utilizado como referência para classificar o comportamento. Esta análise é feita comparando o fator de confinamento  $\xi$  ao fator crítico ( $\xi_0$ ). Nesse contexto, Lyu e Han e Hou (2021) sugerem que o fator crítico ( $\xi_0$ ) esteja entre 1,0 e 4,5 para caracterizar comportamento elastoplástico perfeito. Do observado na Figura 5-4, a maioria dos valores de  $\xi$  estão entre 1,0 e 4,5; com alguns casos chegando a 8,0. Dessa forma, os valores encontrados estão na faixa sugerida ou próximos dela; portanto, para a grande maioria dos exemplares o comportamento pode ser classificado como elastoplástico perfeito. Para aqueles exemplares em que  $\xi$  foi maior que 4,5, o comportamento seria elastoplástico com encruamento positivo, o que não corresponde com a análise visual dos gráficos da Figura 5-2. Vale destacar que o intervalo de valores críticos sugerido por Lyu

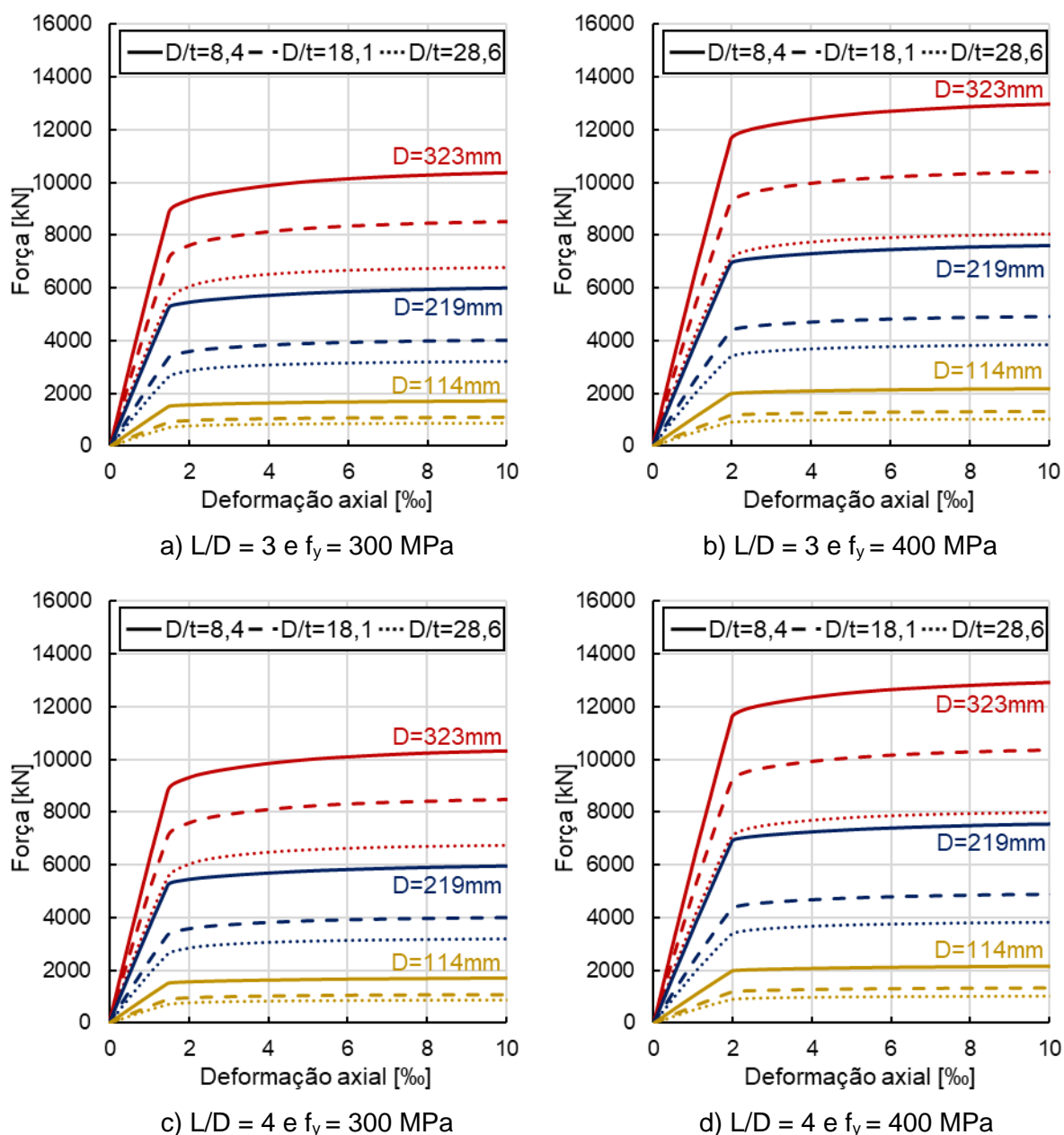


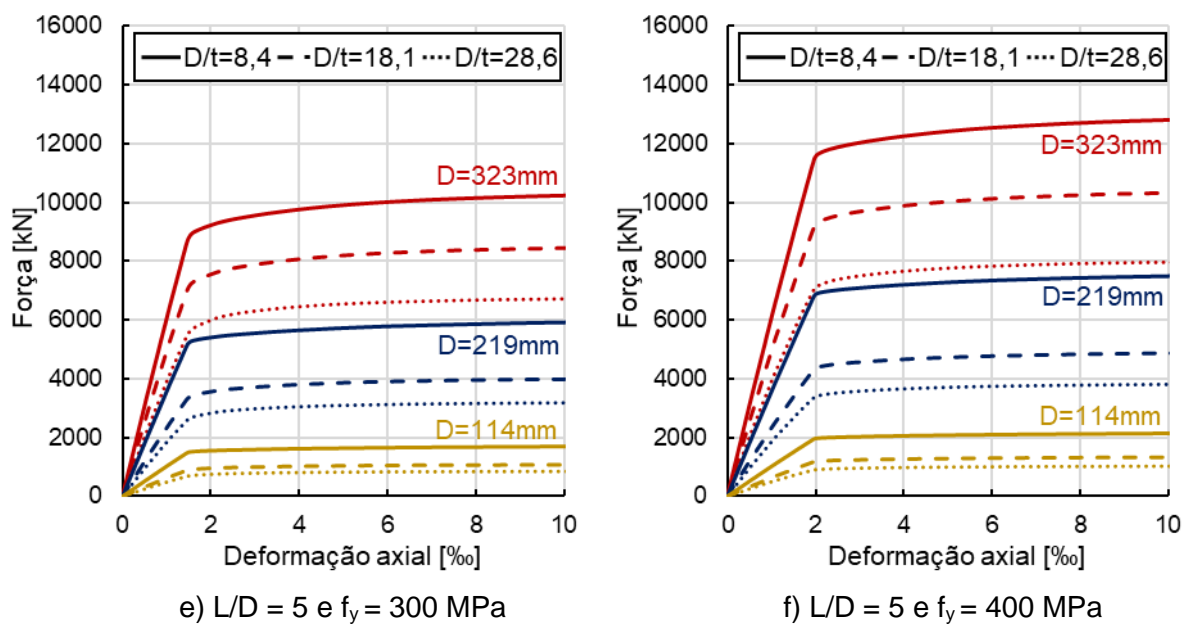
e Han e Hou (2021) deve ser confirmado experimentalmente.

### 5.1.2. RELAÇÃO $D/t$

Diferentemente do observado para a relação  $L/D$ , a variação da relação  $D/t$  (8,4; 18,1 e 28,6) provoca mudanças significativas no comportamento do pilar misto (Figura 5-5). Para esta análise, o diâmetro foi mantido constante, variando a espessura do perfil de aço.

**Figura 5-5: Influência da relação  $D/t$  no comportamento do pilar preenchido**



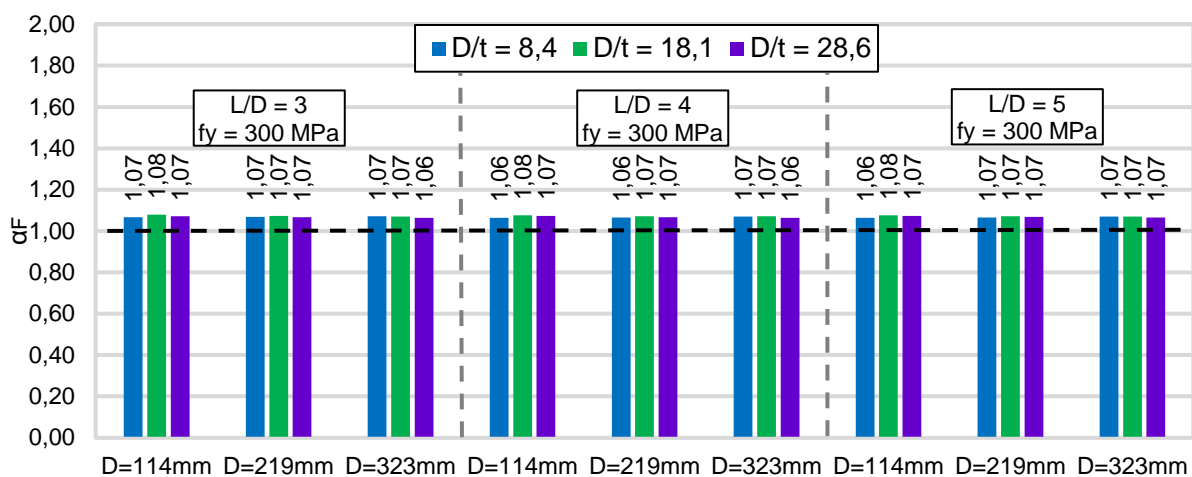


Fonte: Elaborada pelo autor

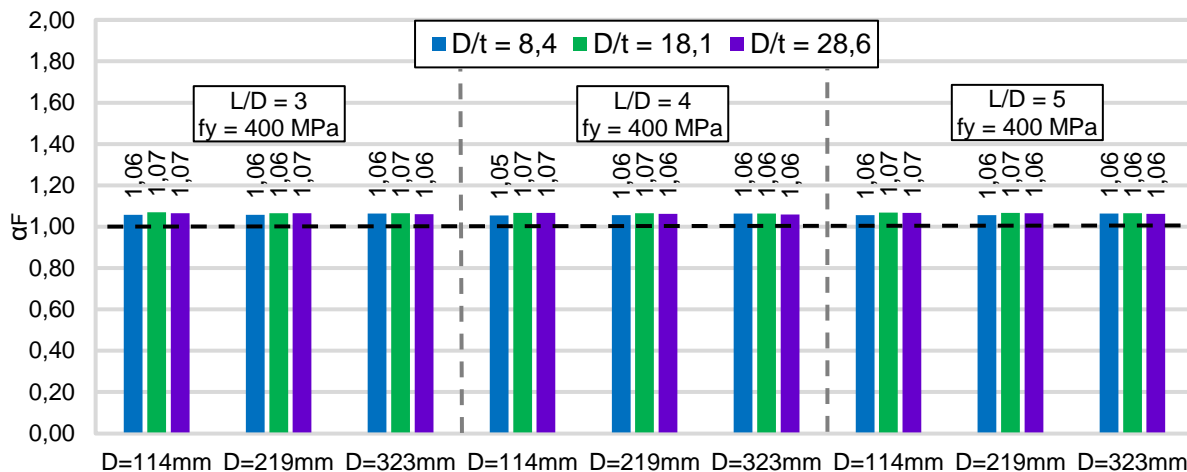
O aumento da relação D/t, considerando o diâmetro constante, resulta em menores espessuras do perfil de aço, o que diminui a taxa de aço na seção transversal; consequentemente, as curvas apresentam redução na força normal resistente.

Para avaliar o comportamento pós-pico foi realizada uma análise considerando os parâmetros  $\alpha_F$  (Figura 5-6) e  $\xi$  (Figura 5-7).

Figura 5-6: Influência da relação D/t no parâmetro  $\alpha_F$

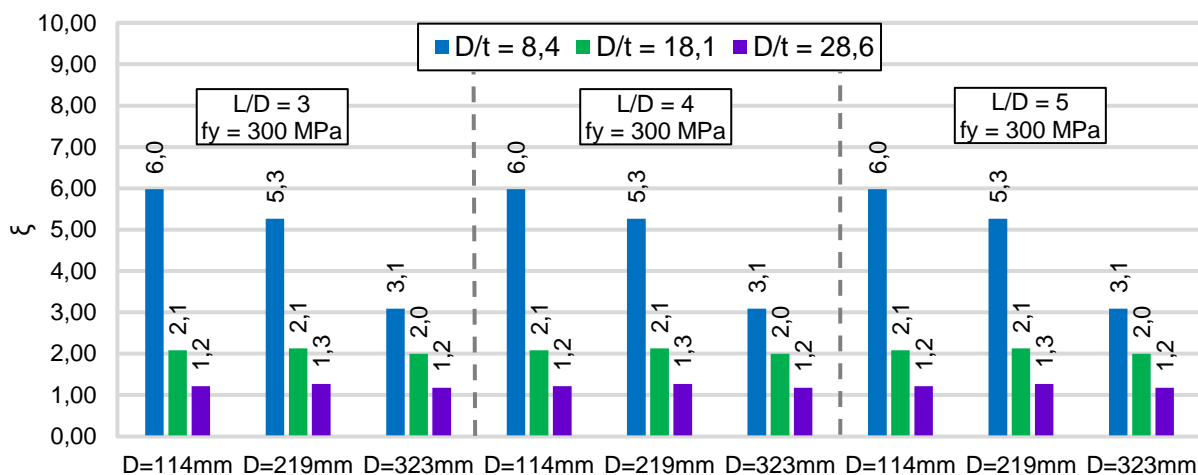


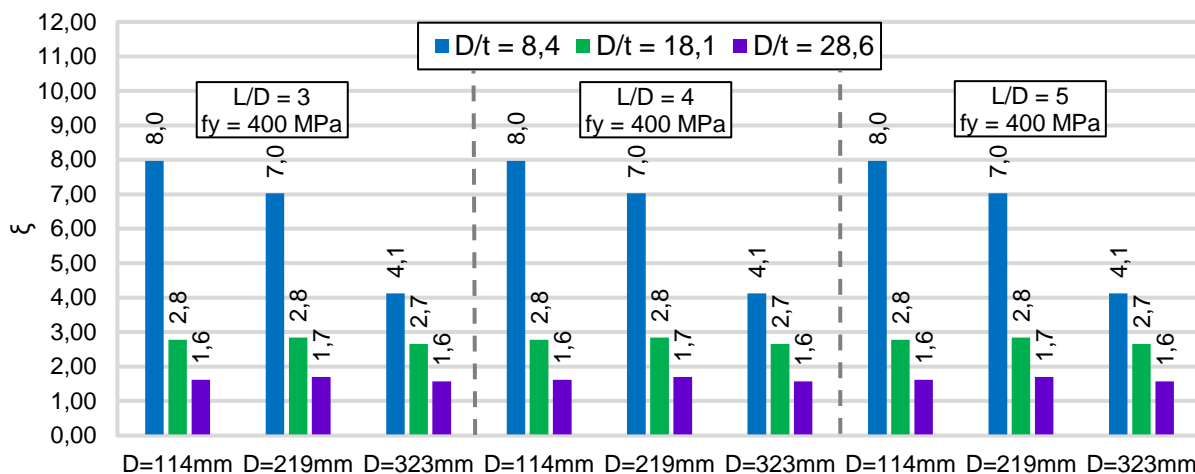
a) Relações L/D = 3; 4 e 5 e  $f_y = 300$  MPa

b) Relações L/D = 3; 4 e 5 e  $f_y = 400$  MPa

Fonte: Elaborada pelo autor

O parâmetro  $\alpha_F$  variou entre 1,05 e 1,08. Isto indica que a força correspondente à deformação de 10‰ superou aquela registrada para a 3‰; as diferenças variaram entre 5 e 8% (Figura 5-6). Portanto, como parâmetro  $\alpha_F$  se mostrou próximo de 1 para todos os casos analisados, conclui-se, a exemplo do observado nos gráficos da Figura 5-5, que o comportamento dos pilares pode ser classificado como elastoplástico perfeito.

Figura 5-7: Influência da relação D/t no parâmetro  $\xi$ a) Relações L/D = 3; 4 e 5 e  $f_y = 300$  MPa

b) Relações L/D = 3; 4 e 5 e f<sub>y</sub> = 400 MPa

Fonte: Elaborada pelo autor

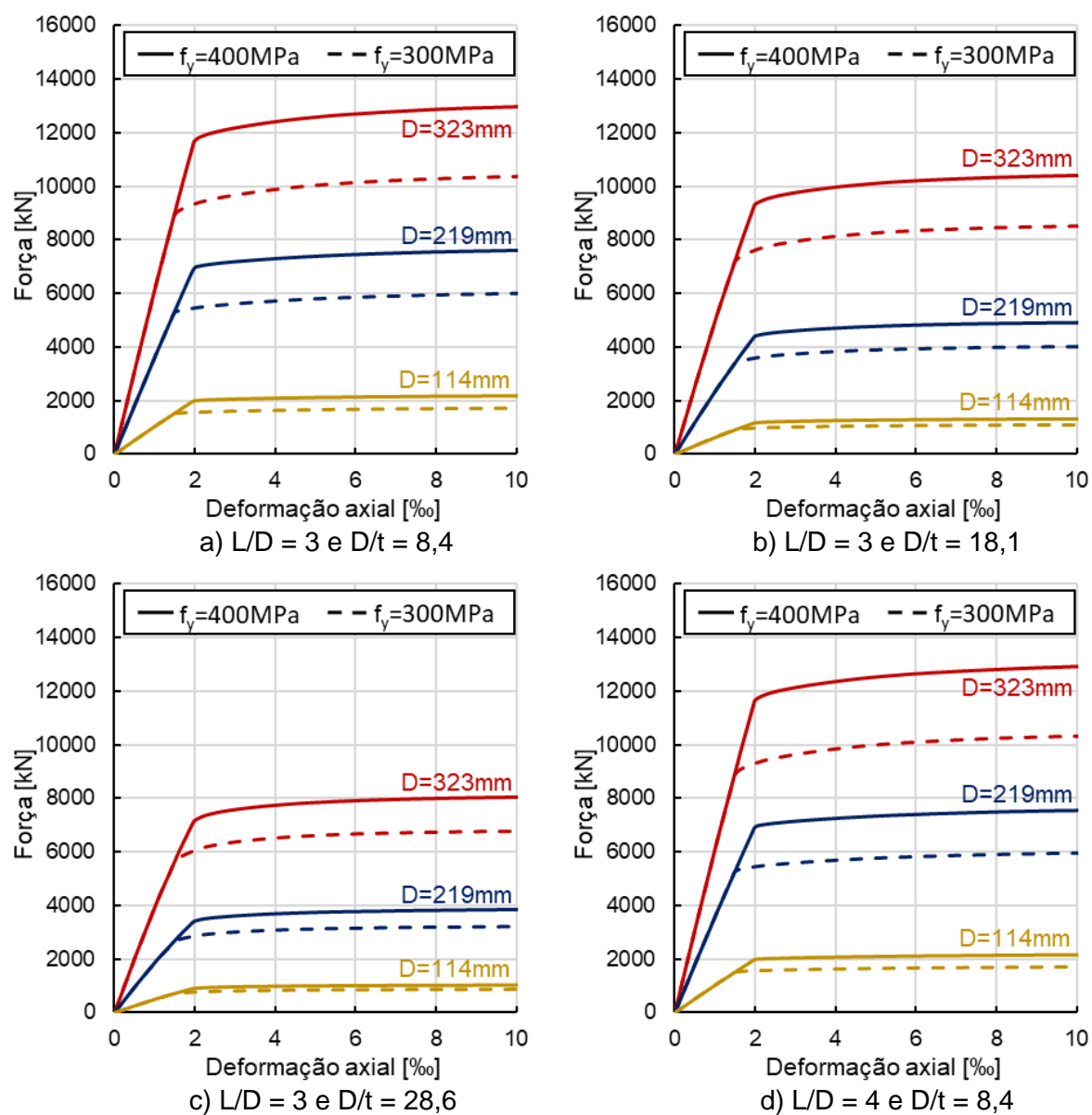
Quanto aos valores do fator de confinamento ( $\xi$ , Figura 5-7), na maioria (78%) dos casos foram encontrados valores menores que 4,5 caracterizando comportamento elastoplástico perfeito. Por outro lado, 22% dos modelos apresentaram  $\xi$  maior que 4,5, ou seja, comportamento elastoplástico com encruamento positivo, porém, este resultado não é identificado visualmente nos gráficos da Figura 5-5. Portanto, este parâmetro está mais relacionado à contribuição de cada componente do que ao comportamento em si.

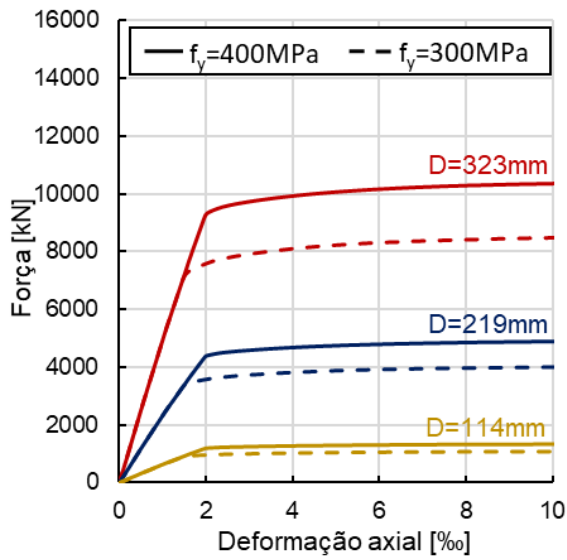
Verifica-se influência significativa da relação D/t nos valores do fator de confinamento. Quanto maior a relação D/t, menor a espessura do perfil e, conseqüentemente, menor contribuição do perfil de aço e menor o fator de confinamento.

### 5.1.3. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO DO AÇO

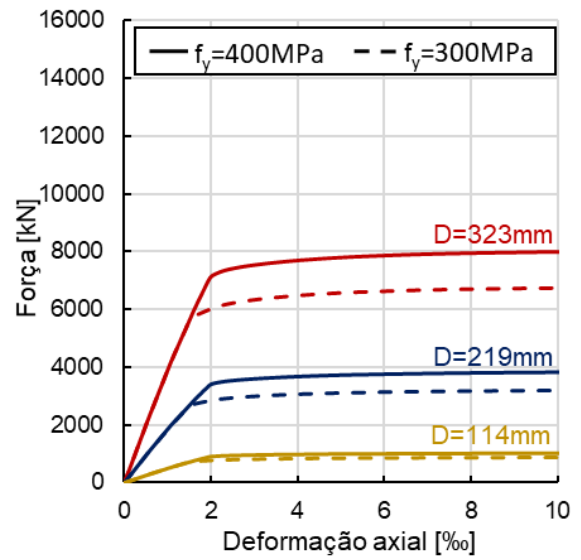
A variação da resistência ao escoamento (300MPa e 400MPa) também foi avaliada (Figura 5-8). No trecho elástico (Figura 5-8) é observada uma nítida mudança no valor da deformação correspondente ao início da plastificação do pilar misto. Isso ocorre devido ao aumento da resistência ao escoamento (de 300 MPa e 400 MPa). Assim, o perfil com menor resistência ao escoamento (300 MPa) atinge a plastificação com uma deformação menor que o perfil de 400 MPa. Outro fato observado é que como o módulo de elasticidade (200 GPa) não varia, ambas as curvas tem a mesma inclinação e se sobrepõem no trecho elástico.

Figura 5-8: Influência da resistência ao escoamento do aço no comportamento do pilar preenchido

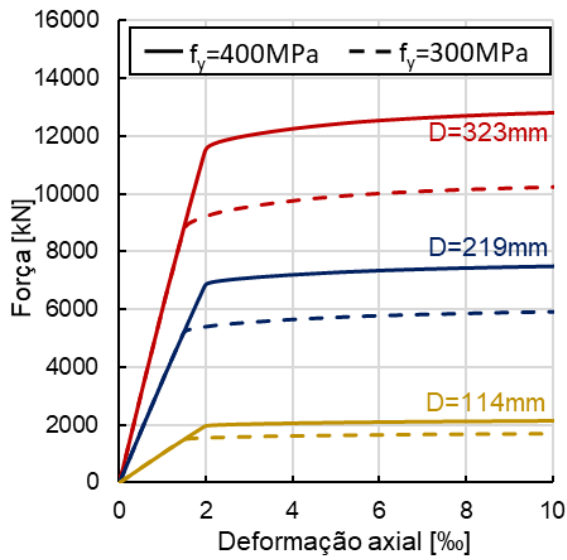




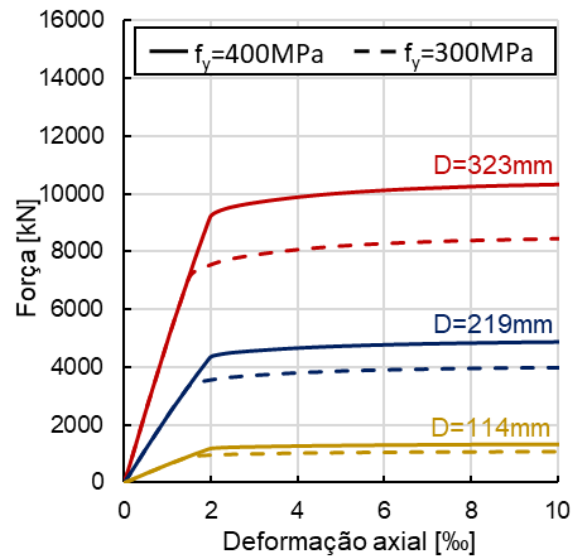
e)  $L/D = 4$  e  $D/t = 18,1$



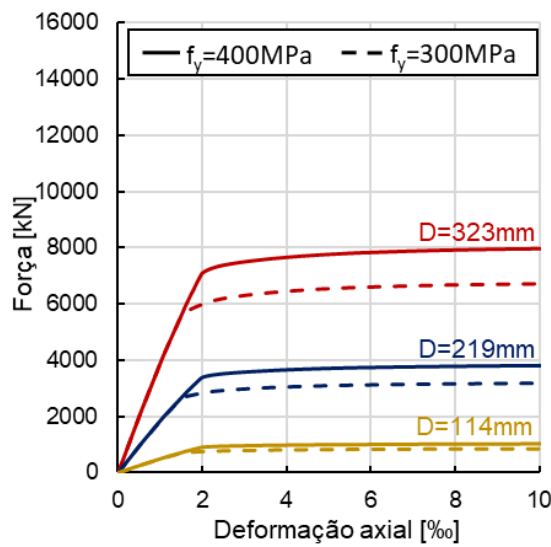
f)  $L/D = 4$  e  $D/t = 28,6$



g)  $L/D = 5$  e  $D/t = 8,4$



h)  $L/D = 5$  e  $D/t = 18,1$

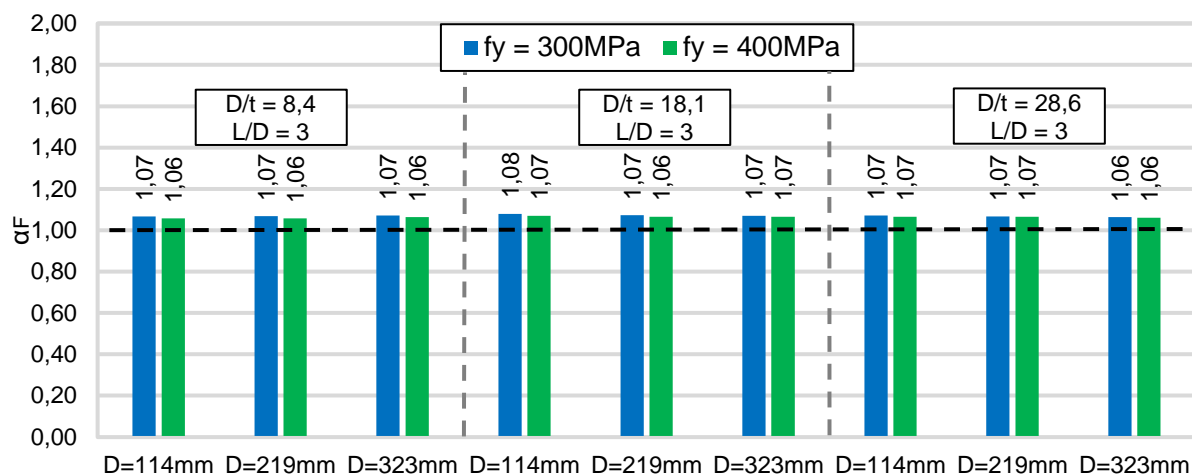


h)  $L/D = 5$  e  $D/t = 28,6$

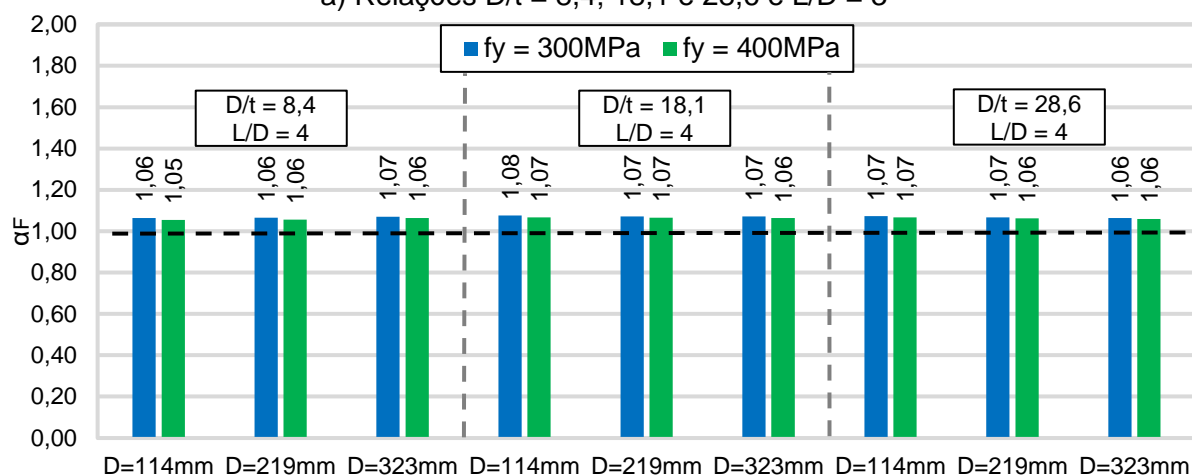
Fonte: Elaborada pelo autor

A exemplo dos parâmetros anteriores, a influência da resistência ao escoamento do aço no comportamento pós-pico foi avaliada por meio dos parâmetros  $\xi$  e  $\alpha_F$ . A Figura 5-9 ilustra resultados de  $\alpha_F$  enquanto a Figura 5-10 ilustra os resultados de  $\xi$ .

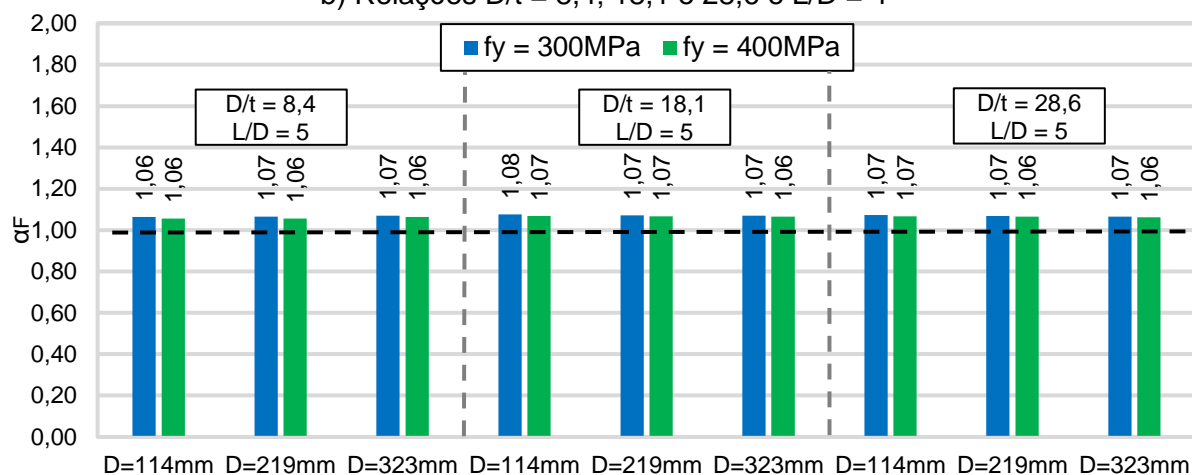
**Figura 5-9: Influência da relação D/t no parâmetro  $\alpha_F$**



a) Relações D/t = 8,4; 18,1 e 28,6 e L/D = 3



b) Relações D/t = 8,4; 18,1 e 28,6 e L/D = 4

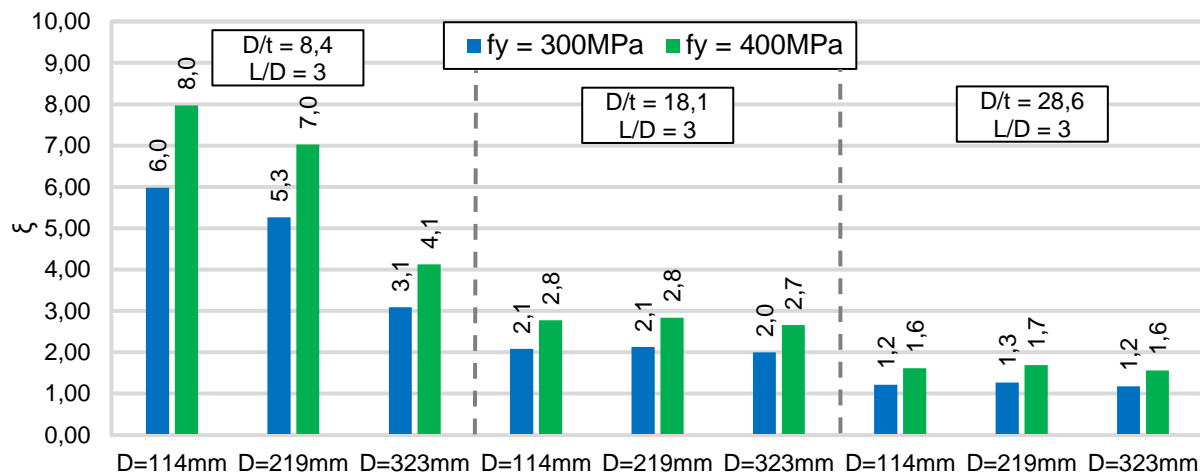


c) Relações D/t = 8,4; 18,1 e 28,6 e L/D = 5

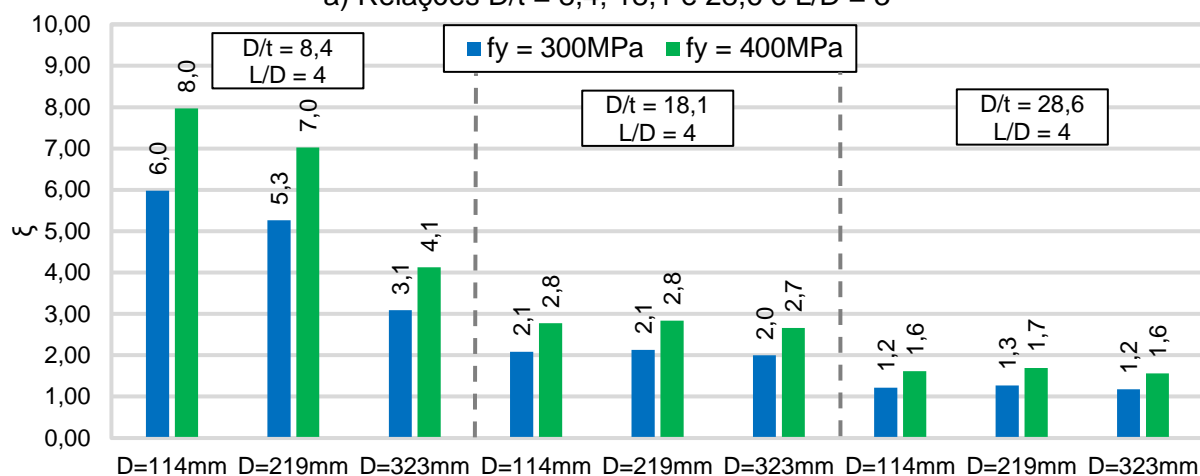
Fonte: Elaborada pelo autor

Valores de  $\alpha_F$  entre 1,05 e 1,08 foram obtidos (Figura 5-10). Portanto, o comportamento é classificado como elastoplástico perfeito pois os valores de  $\alpha_F$  estão muito próximos de 1,0.

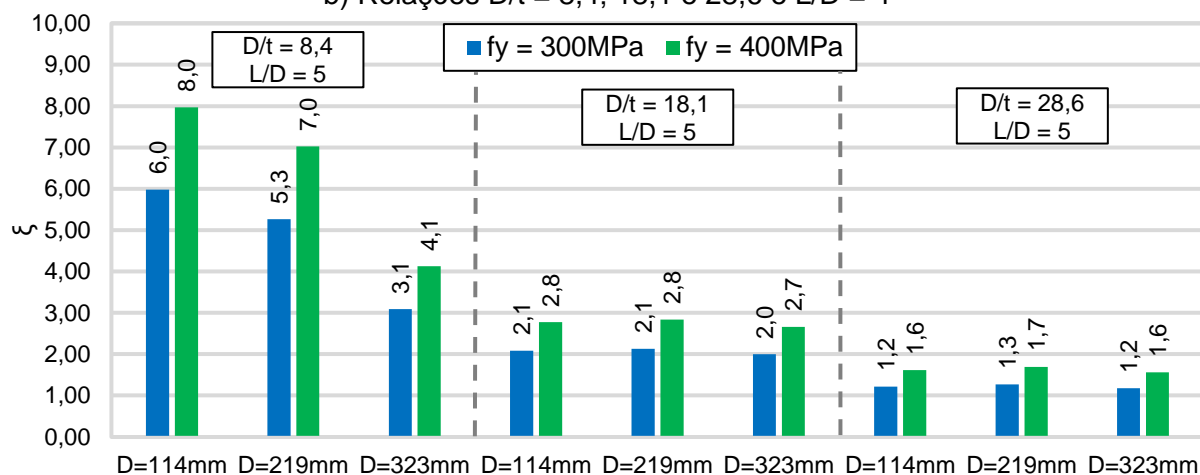
**Figura 5-10: Influência da relação D/t no parâmetro  $\xi$**



a) Relações D/t = 8,4; 18,1 e 28,6 e L/D = 3



b) Relações D/t = 8,4; 18,1 e 28,6 e L/D = 4



c) Relações D/t = 8,4; 18,1 e 28,6 e L/D = 5

Fonte: Elaborada pelo autor



Os três gráficos da Figura 5-10 são idênticos pois não há influência de  $L/D$  no parâmetro  $\xi$ . Os valores de  $\xi$  indicam comportamento elastoplástico perfeito ( $\xi < 4,5$ ) e com encruamento positivo ( $\xi > 4,5$ ). Além disso, com o aumento de  $f_y$  (de 300 MPa para 400 MPa, +33%) há variação proporcional no fator de confinamento ( $\xi$ ) (p.e. de 6,0 para 8,0, na primeira parte da Figura 5-10a, aumento de 33%).

## 5.2. FORÇA NORMAL RESISTENTE

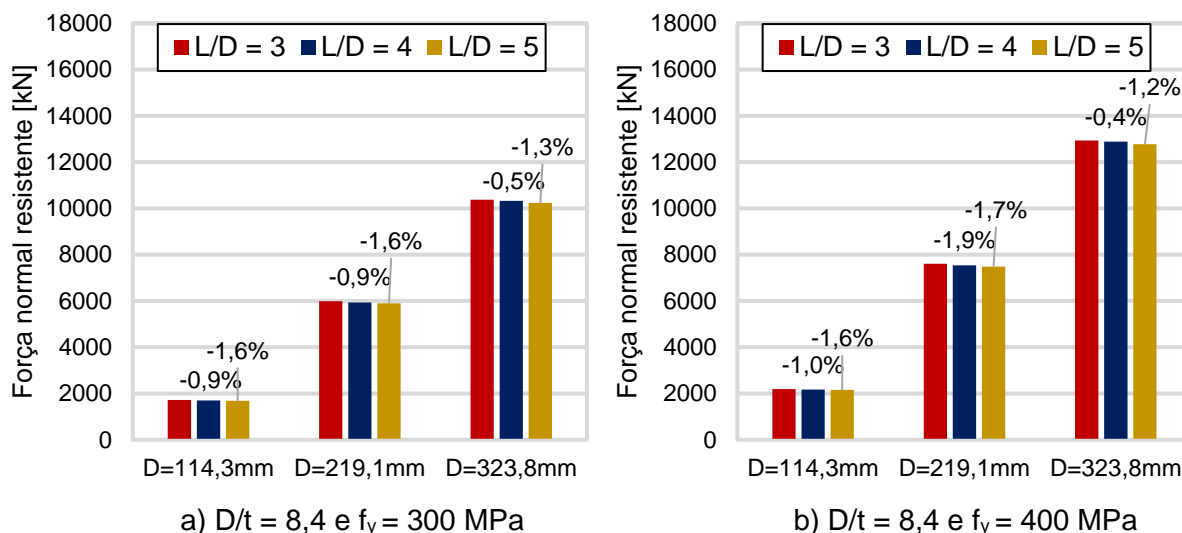
De acordo com Uy e Tao e Han (2011), Wang *et al.* (2017) e Ye *et al.* (2016), nos pilares com comportamento elastoplástico com encruamento positivo, recomenda-se que a força normal resistente seja aquela correspondente à deformação 10‰. De acordo com o apresentado no item anterior, o comportamento dos pilares analisados variou entre elastoplástico perfeito e elastoplástico com encruamento positivo. Assim sendo, a força resistente foi tomada para a deformação de 10‰.

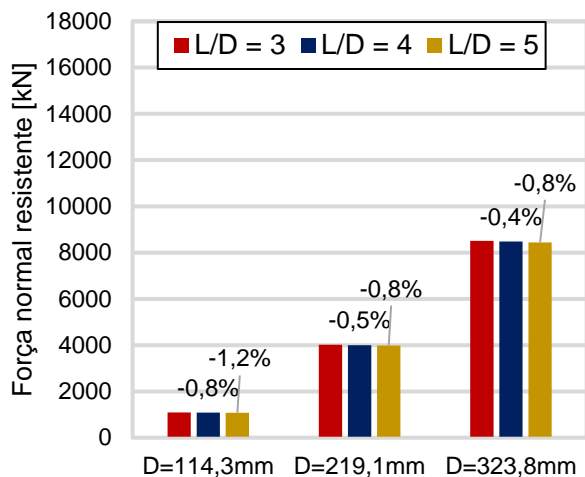
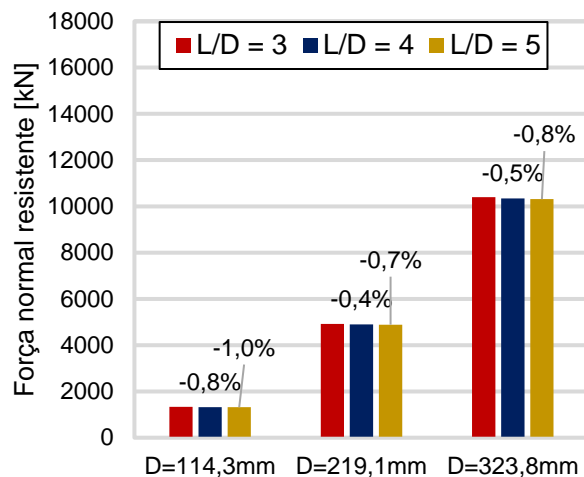
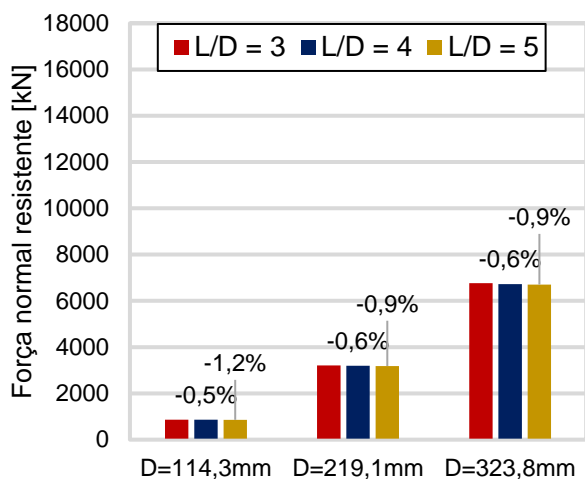
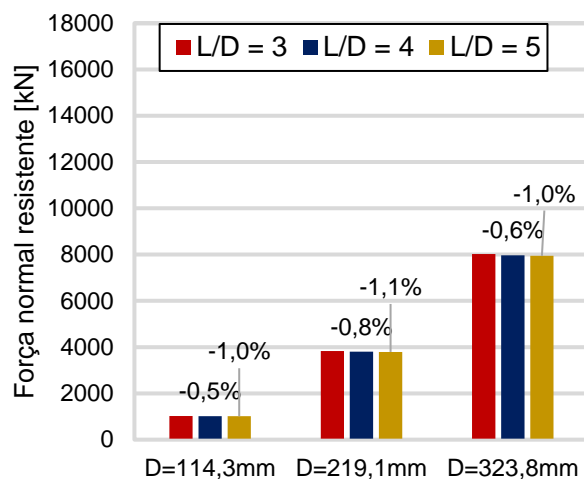
A seguir, cada variável analisada foi isolada a fim de avaliar sua influência na força normal resistente.

### 5.2.1. RELAÇÃO $L/D$

A relação  $L/D$ , definida em 3, 4 e 5 apresentou pouquíssima influência na força normal resistente (Figura 5-11).

Figura 5-11: Força normal resistente e relação  $L/D$



c)  $D/t = 18,1$  e  $f_y = 300$  MPad)  $D/t = 18,1$  e  $f_y = 400$  MPae)  $D/t = 28,6$  e  $f_y = 300$  MPaf)  $D/t = 28,6$  e  $f_y = 400$  MPa

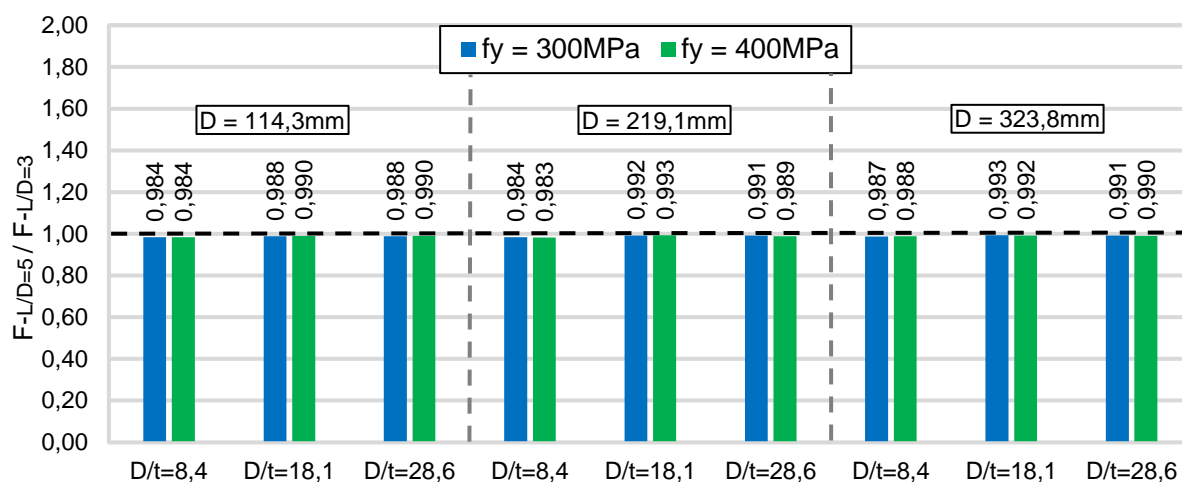
Fonte: Elaborada pelo autor

De forma análoga ao observado no comportamento Força vs. Deformação, variar  $L/D$  não causa mudanças significativas no valor da força normal resistente pois todos os valores analisados correspondem a pilares curtos. A Tabela 5-1 mostra a variação direta e percentual da força normal resistente quando a relação  $L/D$  aumenta 66% ( $L/D=3$  para  $L/D=5$ ), o número acima (0,984; 0,988; etc.) apresenta a relação entre forças, e o número abaixo a porcentagem. Os valores assinalados em vermelho na Tabela 5-1, correspondem à maior e menor variação observadas. Portanto, não há mudança significativa na força resistente com a variação da relação  $L/D$  de 3 para 5. Para maiores valores de  $L/D$  a influência da instabilidade por flexão poderá acarretar variações importantes. O Gráfico 5-1 ilustra os valores da Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Variação percentual da força normal resistente entre  $L/D = 3$  e  $L/D = 5$  (+ 66%)

	D = 114,3mm			D = 219,1mm			D = 323,8mm		
D/t → f <sub>y</sub> ↓	8,4	18,1	28,6	8,4	18,1	28,6	8,4	18,1	28,6
300 MPa	0,984 (-1,6%)	0,988 (-1,2%)	0,988 (-1,2%)	0,984 (-1,6%)	0,992 (-0,8%)	0,991 (-0,9%)	0,987 (-1,3%)	0,993 (-0,7%)	0,991 (-0,9%)
400 MPa	0,984 (-1,6%)	0,990 (-1,0%)	0,990 (-1,0%)	0,983 (-1,7%)	0,993 (-0,7%)	0,989 (-1,1%)	0,988 (-1,2%)	0,992 (-0,8%)	0,990 (-1,0%)

Fonte: Elaborada pelo autor

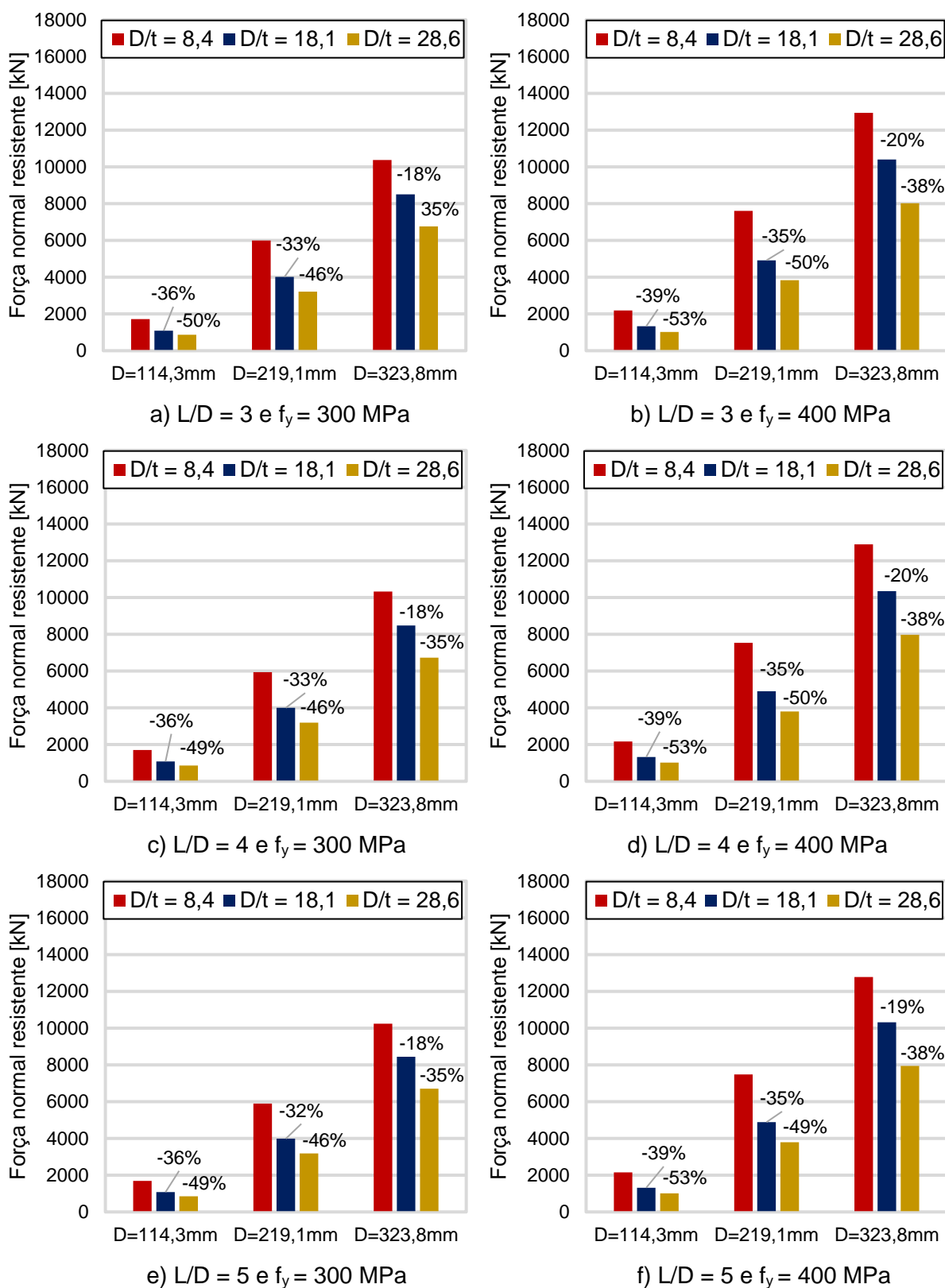
Gráfico 5-1: Variação da força normal resistente entre  $L/D = 3$  e  $L/D = 5$ 

Fonte: Elaborada pelo autor

### 5.2.2. RELAÇÃO D/t

A variação da relação D/t (8,4; 18,1 e 28,6) teve influência significativa sobre a força normal resistente (Figura 5-12).

Figura 5-12: Força normal resistente em função da relação D/t



Fonte: Elaborada pelo autor

O aumento da relação  $D/t$  se reflete em perfis de menor espessura, portanto, com menor taxa de aço; conseqüentemente, menor força normal resistente. A intensidade da redução varia em função do diâmetro do tubo de aço, sendo menor para o maior diâmetro ( $D = 323,8\text{mm}$ ) – Tabela 5-2.

A Tabela 5-2 apresenta a variação percentual da força normal resistente quando a relação  $D/t = 8,4$  aumenta em 115% e vai para  $D/t = 18,1$ , e quando  $D/t = 18,1$  aumenta 58% e vai para  $D/t = 28,6$ . Para os diâmetros 114,3mm, 219,1mm e 323,8mm foram obtidas reduções médias de 37,5%, 34% e 19%, respectivamente, quando  $D/t$  passou de 8,4 para 18,1. Além disso, para os mesmos diâmetros, foram encontradas reduções médias de 22%, 21% e 22%, respectivamente.

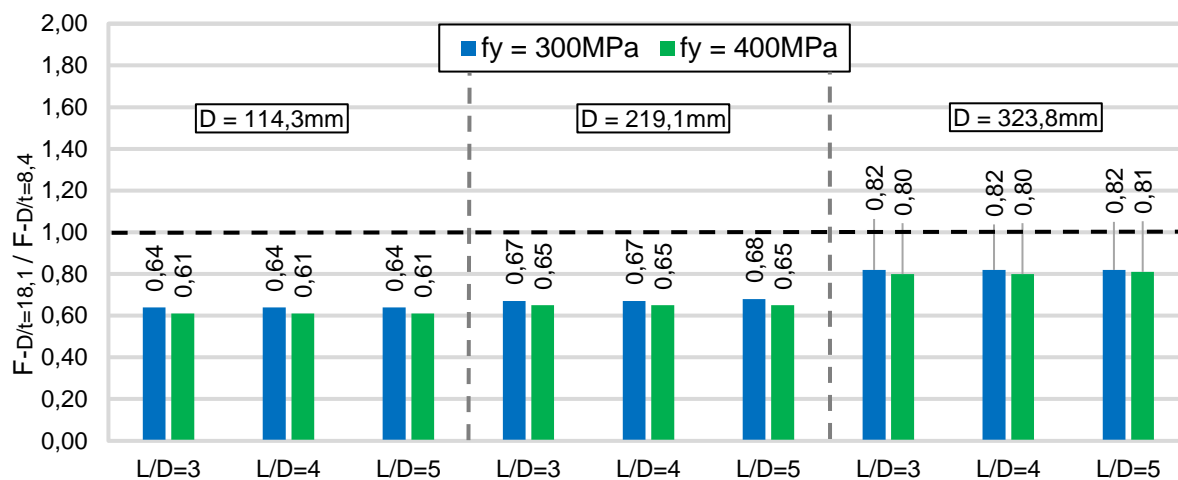
**Tabela 5-2: Variação percentual da força normal resistente em função da variação em  $D/t$**

<b>Variação de <math>D/t = 8,4</math> para <math>D/t = 18,1</math> (+ 115%)</b>									
	D = 114,3mm			D = 219,1mm			D = 323,8mm		
L/D → f <sub>y</sub> ↓	3	4	5	3	4	5	3	4	5
300 MPa	0,64 (-36%)	0,64 (-36%)	0,64 (-36%)	0,67 (-33%)	0,67 (-33%)	0,68 (-32%)	0,82 (-18%)	0,82 (-18%)	0,82 (-18%)
400 MPa	0,61 (-39%)	0,61 (-39%)	0,61 (-39%)	0,65 (-35%)	0,65 (-35%)	0,65 (-35%)	0,80 (-20%)	0,80 (-20%)	0,81 (-19%)
<b>Variação de <math>D/t = 18,1</math> para <math>D/t = 28,6</math> (+ 58%)</b>									
	D = 114,3mm			D = 219,1mm			D = 323,8mm		
L/D → f <sub>y</sub> ↓	3	4	5	3	4	5	3	4	5
300 MPa	0,79 (-21%)	0,80 (-20%)	0,79 (-21%)	0,80 (-20%)	0,80 (-20%)	0,80 (-20%)	0,80 (-20%)	0,79 (-21%)	0,79 (-21%)
400 MPa	0,77 (-23%)	0,77 (-23%)	0,77 (-23%)	0,78 (-22%)	0,78 (-22%)	0,78 (-22%)	0,77 (-23%)	0,77 (-23%)	0,77 (-23%)

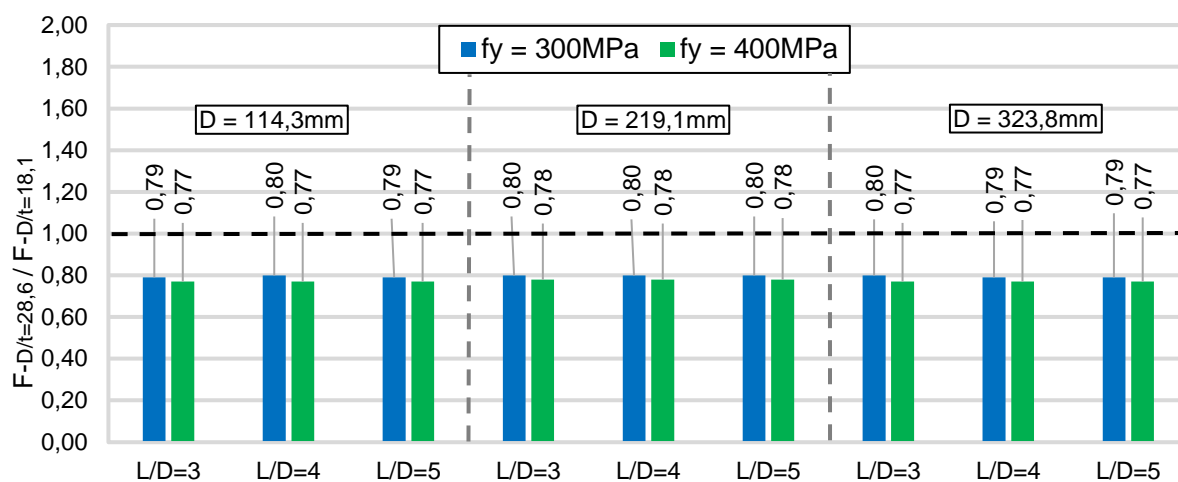
Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 5-13 ilustra os dados da Tabela 5-2. Analisando isoladamente cada diâmetro, verifica-se que variações em  $L/D$  ou na resistência ao escoamento do aço ( $f_y$ ) provocam variações percentuais muito pequenas na força resistente. Portanto, para todos os diâmetros avaliados, a variação de  $L/D$  entre 3 e 5 não provoca mudanças significativas ( $< 1\%$ ) na força resistente. Quando  $f_y = 300$  MPa muda para  $f_y = 400$  MPa ocorrem diferenças menores que 5% na força resistente.

Figura 5-13: Variação da força normal resistente da relação D/t



a) Variação entre D/t = 8,4 e D/t = 18,1



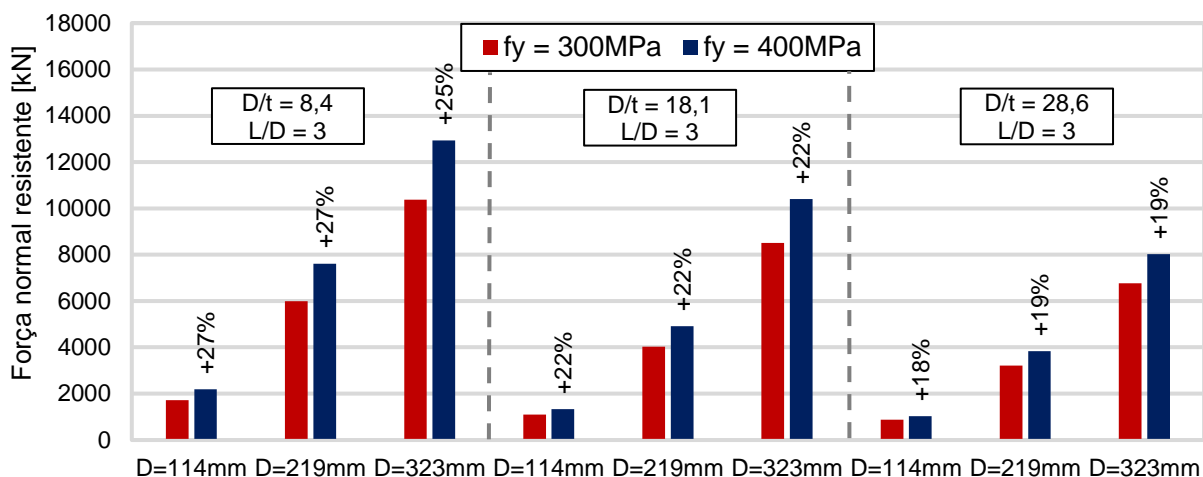
b) Variação entre D/t = 18,1 e D/t = 28,6

Fonte: Elaborada pelo autor

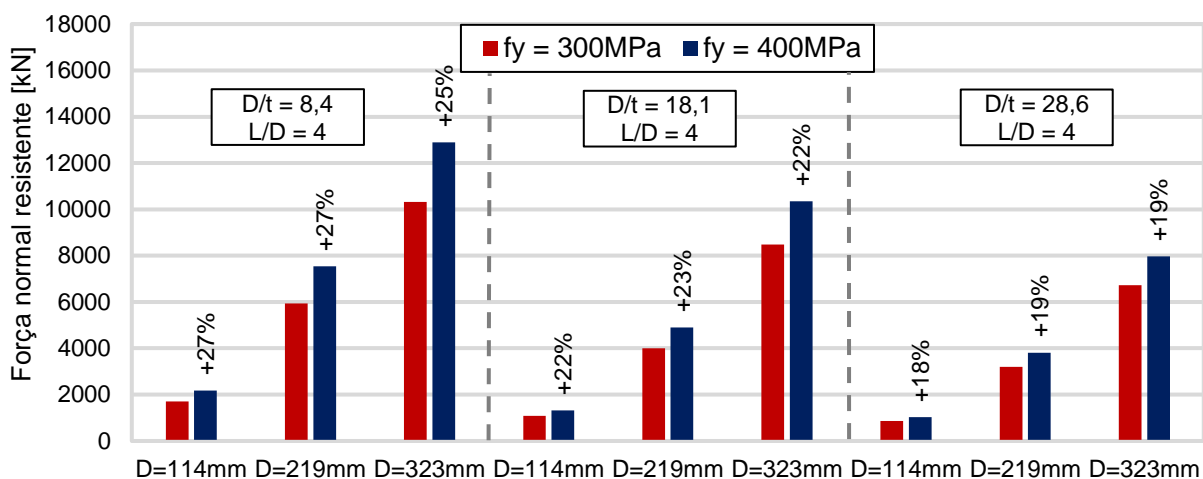
### 5.2.3. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO DO AÇO

A Figura 5-14 apresenta os valores de força normal resistente para resistências ao escoamento do aço ( $f_y$ ) iguais a 300 MPa e 400 MPa.

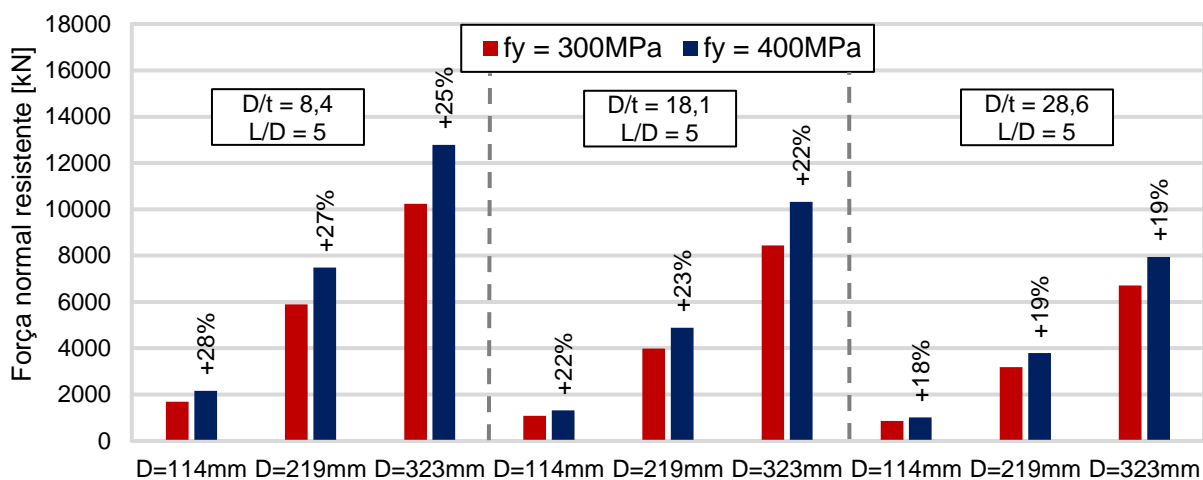
Figura 5-14: Força normal resistente em função da resistência ao escoamento ( $f_y$ )



a) Relações D/t = 8,4; 18,1 e 28,6 e L/D = 3



b) Relações D/t = 8,4; 18,1 e 28,6 e L/D = 4



c) Relações D/t = 8,4; 18,1 e 28,6 e L/D = 5

Fonte: Elaborada pelo autor

O aumento da resistência ao escoamento do aço provoca aumento da força normal resistente e está depende, principalmente, da relação D/t.

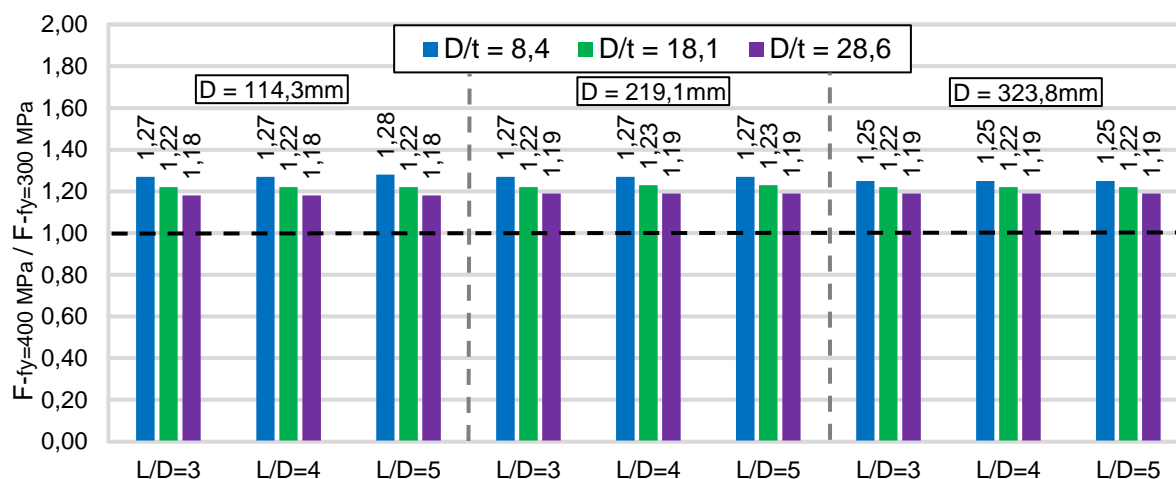
A Tabela 5-3 apresenta a variação percentual da força normal resistente tomando  $f_y=300$  MPa como referência, o Gráfico 5-2 ilustra essa variação. Um aumento de 33% na resistência ao escoamento do aço levou a aumentos médios de 22%, 23% e 22% na força normal resistente, respectivamente para diâmetros de 114,3mm, 219,1mm e 323,8mm.

**Tabela 5-3: Variação percentual da força normal resistente para  $f_y = 300$  MPa (referência) e  $f_y = 400$  MPa (+ 33%)**

L/D → D/t ↓	D = 114,3mm			D = 219,1mm			D = 323,8mm		
	3	4	5	3	4	5	3	4	5
<b>8,4</b>	1,27 (+27%)	1,27 (+27%)	1,28 (+28%)	1,27 (+27%)	1,27 (+27%)	1,27 (+27%)	1,25 (+25%)	1,25 (+25%)	1,25 (+25%)
<b>18,1</b>	1,22 (+22%)	1,22 (+22%)	1,22 (+22%)	1,22 (+22%)	1,23 (+23%)	1,23 (+23%)	1,22 (+22%)	1,22 (+22%)	1,22 (+22%)
<b>28,6</b>	1,18 (+18%)	1,18 (+18%)	1,18 (+18%)	1,19 (+19%)	1,19 (+19%)	1,19 (+19%)	1,19 (+19%)	1,19 (+19%)	1,19 (+19%)

Fonte: Elaborada pelo autor

**Gráfico 5-2: Variação da força normal resistente entre  $f_y = 300$  MPa e  $f_y = 500$  MPa**



Fonte: Elaborada pelo autor

Aumentar L/D de 3 para 5 resulta em variações insignificantes no aumento da força normal resistente ( $\leq 1\%$ ) - Tabela 5-3 e Gráfico 5-2. Já a variação da relação D/t de 8,4 para 18,1 e de 18,1 para 28,6 resulta em variação média de 4,2% e 3,5%, respectivamente. Ao comparar os valores extremos de D/t (8,4 e 28,6, + 240%), a diferença média do aumento da força normal resistente devido a alteração da resistência ao escoamento do aço (300 MPa para 400 MPa), é de 7,8%. Isto mostra que mesmo nos pilares com perfis de aço de



espessuras menores ( $D/t = 28,6$ ), houve aumento médio de 18,6% na força normal resistente, valor próximo ao observado em pilares com perfis de aço de espessura maiores ( $D/t = 8,4$ ) de 26,4%.

### **5.3. ANÁLISE COMPARATIVA DA FORÇA NORMAL RESISTENTE: MODELAGEM NUMÉRICA, NORMAS TÉCNICAS E MODELOS ANALÍTICOS**

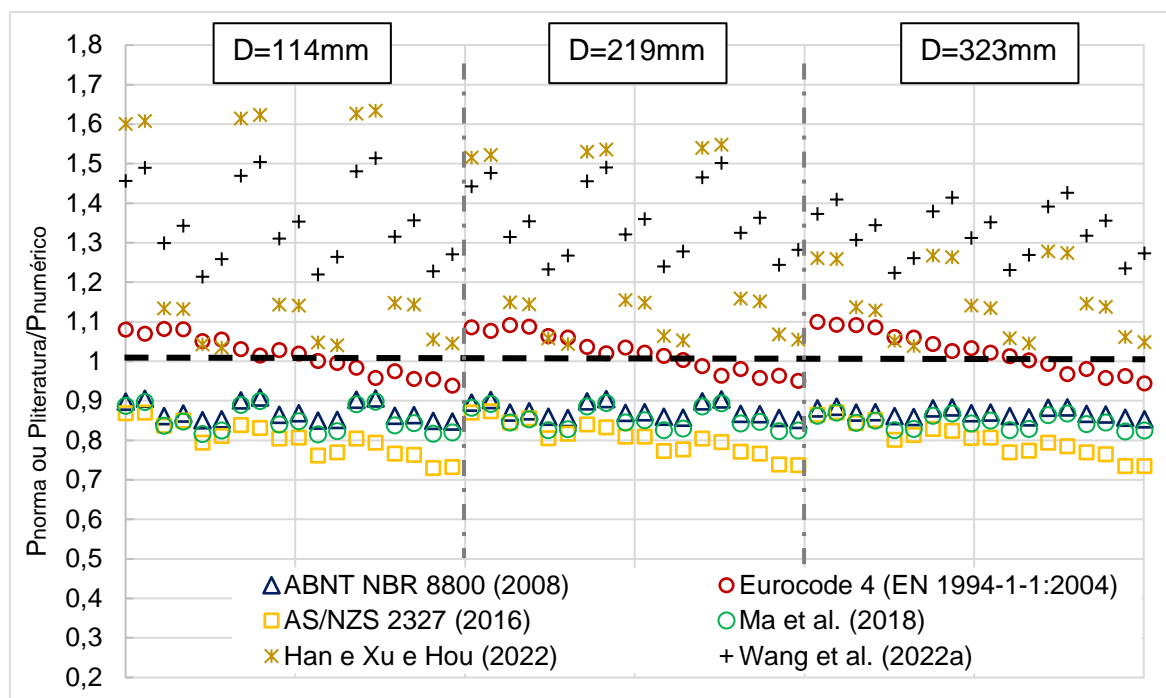
Os valores de força normal resistente obtidos na modelagem numérica foram comparados a valores previstos segundo as recomendações da ABNT NBR 8800 (2008), do Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) e da AS/NZS 2327 (2016). Nesta análise também foram incluídos os modelos analíticos de Ma *et al.* (2018), Han e Xu e Hou (2022) e Wang *et al.* (2022a), desenvolvidos para concreto reciclado confinado. Neste estudo foram utilizados coeficientes de ponderação iguais a 1,0.

Houve uma tentativa de utilizar o modelo de Nour e Güneyisi (2019) porém, este modelo foi gerado por análise via algoritmo genético e considerando perfis com espessuras entre 1mm e 4mm. O modelo resultante inclui uma variável que consiste em  $\exp(t)$ , ou seja, a espessura de forma exponencial. Ao tentar extrapolar este modelo para espessuras maiores, foram obtidos resultados muito diferentes dos demais. Portanto, este modelo não foi incluído nesta análise.

Dois situações foram avaliadas: 1) valor experimental do módulo de elasticidade e que também foi utilizado na análise paramétrica; 2) módulo de elasticidade do concreto previsto segundo as recomendações normativas. Os resultados da primeira análise são apresentados na Figura 5-15, o eixo horizontal representa os 54 modelos avaliados na análise paramétrica.

Os procedimentos da ABNT NBR 8800 (2008) e da AS/NZS 2327 (2016), juntamente com o método Ma *et al.* (2018) se mostraram conservadores. Valores previstos pela AS/NZS 2327 (2016) variaram entre 70% e 90% do valor da modelagem (Figura 5-15). As previsões da ABNT NBR 8800 (2008) e de Ma *et al.* (2018) resultaram em valores entre 80% e 90%. Os valores são conservadores, porém coerentes considerando que são procedimentos normativos e teóricos.

**Figura 5-15: Comparação entre valores da força normal resistente: previstos/ modelagem considerando  $E_c$  experimental**



Por outro lado, os métodos mais recentes e simplistas de Han e Xu e Hou (2022) e Wang *et al.* (2022a) superestimaram o valor da força normal resistente, com valores até 65% maiores. Neste caso, três observações merecem destaque:

1) Não é recomendável que os valores previstos superestimem aos resultados experimentais/modelagem numérica.

2) No geral, os modelos da literatura foram elaborados a partir de resultados experimentais dos próprios autores ou disponíveis na literatura. A revisão sistemática apresentada nesse trabalho mostrou que há poucos dados disponíveis e, por isso, os modelos analíticos precisam ser ajustados pois não se aplicam a todas as situações.

3) Devido ao alto custo de um programa experimental e à elevada capacidade de carga dos pilares mistos, apenas perfis tubulares de pequenas espessuras são ensaiados resultando em modelos analíticos pouco precisos para grandes espessuras (25mm, 20mm, etc.). Assim, ao utilizar perfis de grandes espessuras na modelagem numérica, como realizado nesse trabalho, a resposta dos modelos estimados por normas de previsão acaba se distanciando dos valores da modelagem.

Dentre os modelos de previsão avaliados, se destaca o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004), cujas previsões correspondem a valores entre 90% e 110% dos encontrados na

simulação. Apesar de alguns valores serem superestimados (> 100%), o cálculo foi feito sem a consideração de coeficientes ponderadores; a inclusão dos coeficientes poderia aproximar os resultados. Além disso, algumas diferenças foram menores que 1%, ou seja, praticamente iguais aos valores previstos na modelagem (Figura 5-15).

Numa segunda etapa, na previsão da força normal resistente foram utilizados módulos de elasticidade do concreto previstos segundo as Equações (5-3), (5-4) e (5-5), das normas ABNT NBR 6118 (2014), Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) e AS 3600 (2018), respectivamente. Cabe ressaltar que estas equações se referem a concretos convencionais.

$$E_c = \left(0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80}\right) \cdot \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (5-3)$$

$$E_c = 1,05 \cdot 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (5-4)$$

$$E_c = (\rho^{1,5}) \cdot (0,043 \sqrt{f_{cm}}) \quad (5-5)$$

Sendo:

$E_c$ : Módulo de elasticidade tangente inicial;

$\alpha_E$ : Constante que leva em conta o tipo de agregado graúdo utilizado no concreto (rocha), variando de 0,7 a 1,2;

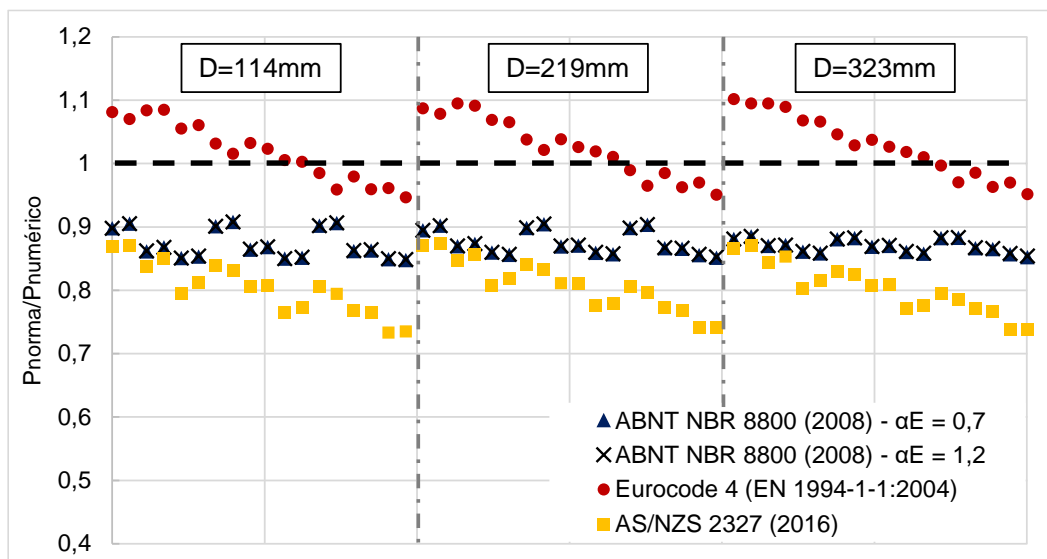
$f_{ck}$ : Resistência à compressão do concreto, valor característico;

$f_{cm}$ : Resistência média à compressão do concreto;

$\rho$ : Densidade do concreto, em kg/m<sup>3</sup>, quando na impossibilidade de conhecer tal valor, usar 2400 kg/m<sup>3</sup> (AS 3600 (2018)).

Em especial, para ABNT NBR 6118 (2014), foram avaliados os dois valores extremos da constante  $\alpha_E$ , 0,7 e 1,2. A Figura 5-16 mostra os resultados obtidos.

**Figura 5-16: Comparação entre valores da força normal resistente: previstos/modelagem considerando o módulo de elasticidade previsto com as próprias normas**

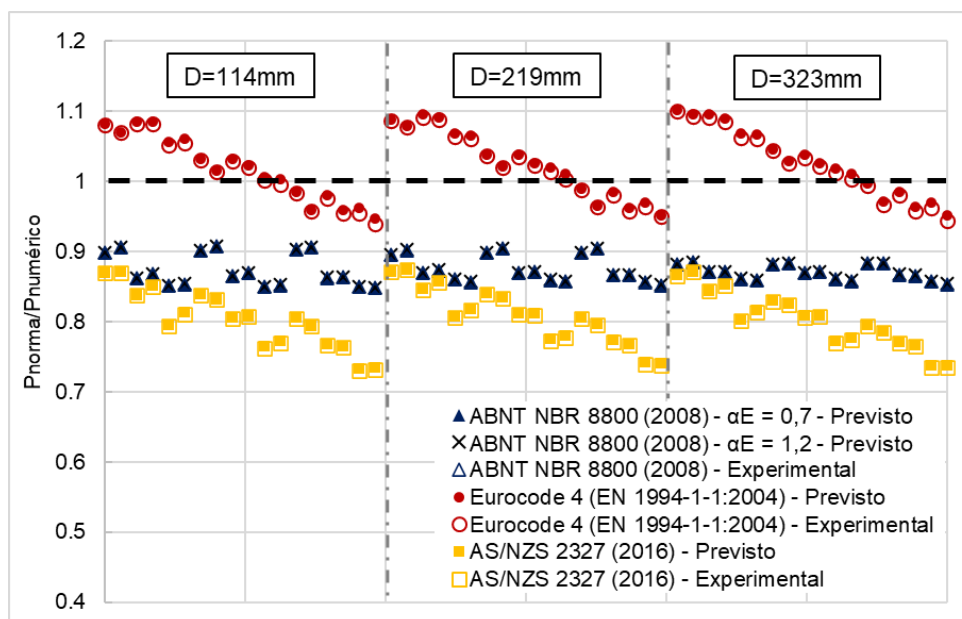


Fonte: Elaborada pelo autor

Como observado anteriormente, a ABNT NBR 8800 (2008) e a AS/NZS 2327 (2016) se mostraram conservadoras, enquanto o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) apresentou uma boa distribuição de resultados em torno da reta em que os valores da análise numérica e da recomendação normativa são iguais (1,0, Figura 5-16).

Na Figura 5-17 são comparados os resultados de força última previstos utilizando os valores de módulos de elasticidade experimental e previstos. Fica clara a pequena influência do módulo de elasticidade do concreto na força normal resistente.

**Figura 5-17: Comparação força normal resistente: previstos/ modelagem considerando módulos de elasticidade experimentais e previstos**



Fonte: Elaborada pelo autor

Portanto, o valor do módulo de elasticidade do concreto tem baixo impacto na força resistente do pilar misto. Embora as normas não incluam o concreto reciclado, o módulo de elasticidade pode ser previsto por elas sem grandes efeitos sobre a força resistente.

No APÊNDICE são apresentados todos os dados desta análise.

## 5.4. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

### 5.4.1. COMPARAÇÃO FORÇA PREVISTA VS. FORÇA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A Tabela 5-4 apresenta as relações entre valores de força normal resistente extraídos dos modelos numéricos e dos métodos de previsão para os 54 modelos avaliados. Os módulos de elasticidade utilizados nas previsões seguiram as recomendações das respectivas normas. Além disso, foram adotados coeficientes de ponderação iguais a 1,0.

**Tabela 5-4: Comparação da força normal resistente – valores modelagem/normativos**

ID	ABNT NBR 8800 (2008) - $\alpha_E = 0,7$	ABNT NBR 8800 (2008) - $\alpha_E = 1,2$	Eurocode 4 (EN 1994-1- 1:2004)	AS/NZS 2327 (2016)	ID	ABNT NBR 8800 (2008) - $\alpha_E = 0,7$	ABNT NBR 8800 (2008) - $\alpha_E = 1,2$	Eurocode 4 (EN 1994-1- 1:2004)	AS/NZS 2327 (2016)
1	0,90	0,90	1,08	0,87	28	0,87	0,87	1,03	0,81
2	0,91	0,91	1,07	0,87	29	0,86	0,86	1,02	0,78
3	0,86	0,86	1,08	0,84	30	0,86	0,86	1,01	0,78
4	0,87	0,87	1,08	0,85	31	0,90	0,90	0,99	0,81
5	0,85	0,85	1,06	0,80	32	0,90	0,90	0,97	0,80
6	0,85	0,85	1,06	0,81	33	0,87	0,87	0,99	0,77
7	0,90	0,90	1,03	0,84	34	0,87	0,87	0,96	0,77
8	0,91	0,91	1,02	0,83	35	0,86	0,86	0,97	0,74
9	0,86	0,87	1,03	0,81	36	0,85	0,85	0,95	0,74
10	0,87	0,87	1,02	0,81	37	0,88	0,88	1,10	0,87
11	0,85	0,85	1,01	0,76	38	0,89	0,89	1,09	0,87
12	0,85	0,85	1,00	0,77	39	0,87	0,87	1,09	0,84
13	0,90	0,90	0,99	0,81	40	0,87	0,87	1,09	0,85
14	0,91	0,91	0,96	0,79	41	0,86	0,86	1,07	0,80
15	0,86	0,86	0,98	0,77	42	0,86	0,86	1,07	0,82
16	0,86	0,86	0,96	0,77	43	0,88	0,88	1,05	0,83
17	0,85	0,85	0,96	0,73	44	0,88	0,88	1,03	0,83
18	0,85	0,85	0,95	0,74	45	0,87	0,87	1,04	0,81
19	0,90	0,90	1,09	0,87	46	0,87	0,87	1,03	0,81
20	0,90	0,90	1,08	0,87	47	0,86	0,86	1,02	0,77
21	0,87	0,87	1,09	0,85	48	0,86	0,86	1,01	0,78
22	0,87	0,87	1,09	0,86	49	0,88	0,88	1,00	0,80
23	0,86	0,86	1,07	0,81	50	0,88	0,88	0,97	0,79
24	0,86	0,86	1,07	0,82	51	0,87	0,87	0,99	0,77
25	0,90	0,90	1,04	0,84	52	0,87	0,87	0,96	0,77
26	0,90	0,90	1,02	0,83	53	0,86	0,86	0,97	0,74
27	0,87	0,87	1,04	0,81	54	0,85	0,85	0,95	0,74

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 5-5 apresenta as análises estatísticas para cada modelo normativo de

previsão.

**Tabela 5-5: Análise estatística da relação valores modelagem/normativos de força normal resistente**

	ABNT NBR 8800 (2008) - $\alpha_E = 0,7$	ABNT NBR 8800 (2008) - $\alpha_E = 1,2$	Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004)	AS/NZS 2327 (2016)
Média	0,87	0,87	1,03	0,81
Mediana	0,87	0,87	1,02	0,81
Desvio padrão	0,02	0,02	0,05	0,04
Maior	0,91	0,91	1,10	0,87
Quartil (75%)	0,88	0,88	1,07	0,84
Quartil (25%)	0,86	0,86	0,99	0,77
Menor	0,85	0,85	0,95	0,73

Fonte: Elaborada pelo autor

De acordo com a Tabela 5-5, a ABNT NBR 8800 (2008) e a AS/NZS 2327 (2016) subestimaram os valores encontrados numericamente, com médias de 0,87 e 0,81, respectivamente. Além disso, mostraram baixa variação em suas respostas, com destaque para a ABNT NBR 8800 (2008), com desvio padrão de 0,02.

O Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) apresentou uma boa média (1,03), apenas 3% acima do valor médio de referência. Apesar de apresentar o maior desvio padrão (0,05) entre os métodos avaliados, o desvio padrão é considerado baixo (cerca de 5%).

Portanto, dentre os métodos avaliados para prever a força normal resistente de pilares mistos curtos ( $L/D < 5$ ) de seção circular, preenchidos com concreto reciclado, e utilizando a previsão do módulo de elasticidade conforme a própria recomendação normativa, o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) se destacou e apresentou os melhores resultados. Cabe ressaltar que no capítulo 2 houve uma comparação entre os métodos de previsão para resultados encontrados na literatura e o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) também se mostrou mais adequado.

#### **5.4.2. INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS AVALIADOS**

A análise estatística se baseou na comparação dos valores de força normal resistente das diferentes configurações geométricas. Para avaliar a influência das variações nos parâmetros  $L/D$ ,  $D/t$  e  $f_y$ , quatro análises foram feitas: 1) variação de  $L/D = 3$  para  $L/D = 5$ ; 2) entre  $D/t = 8$  e  $D/t = 18$ ; 3) entre  $D/t = 18$  foi e  $D/t = 28$ ; e 4) resistência do aço vai de 300 MPa para 400 MPa.

Tais análises foram feitas para os valores de força resistente previstos pela modelagem e métodos normativos. Na modelagem foram utilizados os valores experimentais de módulo de elasticidade enquanto para as normas ABNT NBR 8800 (2008), Eurocode 4

(EN 1994-1-1:2004) e AS/NZS 2327 (2016), o módulo de elasticidade foi previsto por cada uma das mesmas.

A Tabela 5-6 ilustra os valores da modelagem numérica. A análise estatística confirmou que variar L/D entre e 5, causa efeito quase insignificante na força normal resistente. A variação média foi de -1,1%, com leve queda na força resistente para o aumento em L/D.

**Tabela 5-6: Variação percentual da força normal resistente – modelagem numérica**

	L/D = 3 → L/D = 5	D/t = 8 → D/t = 18	D/t = 18 → D/t = 28	$f_y = 300 \text{ MPa} \rightarrow$ $f_y = 400 \text{ MPa}$
Média	-1,1%	-30,1%	-21,6%	22,4%
Mediana	-1,0%	-33,8%	-21,4%	22,2%
Desvio padrão	0,3	8,5	1,2	3,3
Maior	-1,7%	-39,2%	-23,2%	18,1%
Quartil (75%)	-1,3%	-36,3%	-22,9%	19,1%
Quartil (25%)	-0,9%	-19,6%	-20,5%	24,8%
Menor	-0,7%	-17,6%	-20,1%	27,5%

Fonte: Elaborada pelo autor

Em contrapartida, a variação na relação D/t teve efeito significativo; a força normal resistente apresentou redução de 30,1%, quando a relação foi de 8 para 18. Esse comportamento era esperado pois a espessura do perfil de aço teve grande influência na resposta força-deformação do pilar. A variação de D/t = 18 para D/t = 28 (terceira análise) apresentou redução média de -21,6% e baixa variação (Tabela 5-6).

Por fim, a quarta análise, ao variar  $f_y = 300 \text{ MPa}$  para  $f_y = 400 \text{ MPa}$  foi encontrado aumento médio de 22,4%, também com baixa variação nas respostas.

A Tabela 5-7 apresenta análises semelhantes, porém utilizando as recomendações da ABNT NBR 8800 (2008) e módulo de elasticidade do concreto reciclado conforme ABNT NBR 6118 (2014), com coeficiente  $\alpha_E$  de 0,7 e 1,2.

**Tabela 5-7: Variação percentual da força normal resistente - ABNT NBR 8800 (2008)**

<b>Módulo de elasticidade com <math>\alpha_E = 0,7</math></b>				
	L/D = 3 → L/D = 5	D/t = 8 → D/t = 18	D/t = 18 → D/t = 28	$f_y = 300 \text{ MPa} \rightarrow$ $f_y = 400 \text{ MPa}$
Média	-1,4%	-32,1%	-22,8%	22,6%
Mediana	-1,4%	-36,1%	-22,8%	22,5%
Desvio padrão	0,2	9,1	1,4	3,7
Maior	-1,6%	-41,8%	-24,5%	17,9%
Quartil (75%)	-1,5%	-39%	-24%	18,7%
Quartil (25%)	-1,2%	-20,9%	-21,4%	25,2%
Menor	-1,2%	-19%	-21,1%	28,5%
<b>Módulo de elasticidade com <math>\alpha_E = 1,2</math></b>				
Média	-1,3%	-32,1%	-22,7%	22,7%
Mediana	-1,3%	-36,1%	-22,7%	22,5%
Desvio padrão	0,2	9,1	1,4	3,7
Maior	-1,6%	-41,7%	-24,6%	18%
Quartil (75%)	-1,5%	-38,9%	-24%	18,7%
Quartil (25%)	-1,2%	-20,9%	-21,4%	25,2%
Menor	-1,1%	-19%	-21%	28,5%

Fonte: Elaborada pelo autor

O comportamento dos resultados normativos (Tabela 5-7) foi semelhante ao da simulação numérica. Para variação em L/D, a média ficou em -1,3% ou -1,4%, a depender de  $\alpha_E$ . A variação em D/t (8 para 18) resultou em variações mais significativas com redução média de -32,1% para ambos os valores de  $\alpha_E$ . Quando D/t foi de 18 para 28, a variação foi menor e média de -22,7%. Por fim, na variação da resistência ao escoamento houve aumento de 22,7%.

O valor do módulo de elasticidade não apresentou impacto significativo, mesmo quando seu valor foi alterado em 71% ( $\alpha_E$  de 0,7 para 1,2), os resultados da Tabela 5-7a) e a Tabela 5-7b) são praticamente idênticos.

Por fim, Tabela 5-8 e Tabela 5-9, apresentam as análises para o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) e a AS/NZS 2327 (2016), respectivamente. O módulo de elasticidade do concreto reciclado foi calculado conforme Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2004) e AS 3600 (2018).



**Tabela 5-8: Variação percentual da força normal resistente - Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004)**

	L/D = 3 → L/D = 5	D/t = 8 → D/t = 18	D/t = 18 → D/t = 28	$f_y = 300 \text{ MPa} \rightarrow$ $f_y = 400 \text{ MPa}$
Média	-11,2%	-30,1%	-23,1%	20,9%
Mediana	-11,2%	-33,7%	-23,1%	20,9%
Desvio padrão	0,9	8,1	1,1	3,0
Maior	-12,4%	-38,8%	-24,9%	16,3%
Quartil (75%)	-12,0%	-36,3%	-24,1%	18,5%
Quartil (25%)	-10,5%	-20,0%	-22,2%	23,3%
Menor	-10,0%	-18,5%	-21,4%	26,2%

Fonte: Elaborada pelo autor

**Tabela 5-9: Variação percentual da força normal resistente - AS/NZS 2327 (2016)**

	L/D = 3 → L/D = 5	D/t = 8 → D/t = 18	D/t = 18 → D/t = 28	$f_y = 300 \text{ MPa} \rightarrow$ $f_y = 400 \text{ MPa}$
Média	-9,9%	-32,1%	-25,1%	22,7%
Mediana	-9,8%	-35,9%	-25%	22,2%
Desvio padrão	0,8	8,5	1,0	2,7
Maior	-10,9%	-41%	-26,7%	18,5%
Quartil (75%)	-10,5%	-38,8%	-26%	20,7%
Quartil (25%)	-9,1%	-21,3%	-24,3%	24,7%
Menor	-8,9%	-20%	-23,5%	27,7%

Fonte: Elaborada pelo autor

As normas Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) e AS/NZS 2327 (2016) apresentaram comportamentos semelhantes entre si, porém destoantes das análises anteriores. A alteração da relação L/D = 3 para L/D = 5 resultou em diferença média em torno de -10%. Por outro lado, para a ABNT NBR 8800 (2008) e o modelo numérico esse valor ficou em -1%.

As demais variações, relação D/t e variação na resistência ao escoamento do aço apresentaram comportamentos semelhante aos observados anteriormente.

A Tabela 5-10 apresenta a influência da variação dos parâmetros avaliados em função de cada uma das normas avaliadas. Os resultados confirmam o que já foi observado em análises anteriores, ou seja, a variação da relação L/D teve pouquíssima influência sobre a força normal resistente (reduções médias variando entre 1,1% e 11,2% a depender da norma utilizada, Tabela 5-10). Quanto à relação D/t, ao aumentar de 8 para 18 são observadas reduções médias entre da ordem de 30% (Tabela 5-10); em contrapartida, quando D/t passa de 18 para 28, as reduções médias foram menores (entre 21,6 e 25%). Variações semelhantes foram obtidas ao aumentar a resistência ao escoamento de 300 MPa para 400 MPa (em torno

de 20%).

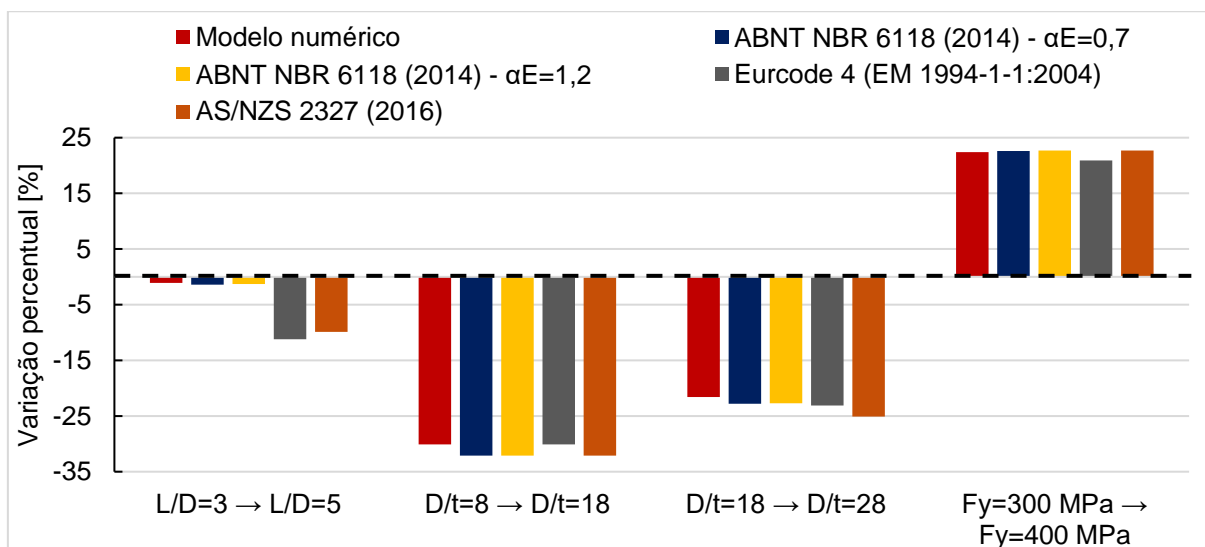
**Tabela 5-10: Influência da variação de cada parâmetro na variação da força resistente**

	Modelagem numérica	ABNT NBR 8800 (2008) - $\alpha_E = 0,7$	ABNT NBR 8800 (2008) - $\alpha_E = 1,2$	Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004)	AS/NZS 2327 (2016)
<b>L/D = 3 → L/D = 5</b>					
Média	-1,1%	-1,4%	-1,3%	-11,2%	-9,9%
Mediana	-1,0%	-1,4%	-1,3%	-11,2%	-9,8%
Desvio padrão	0,3	0,2	0,2	0,9	0,8
Maior	-1,7%	-1,6%	-1,6%	-12,4%	-10,9%
Quartil (75%)	-1,3%	-1,5%	-1,5%	-12,0%	-10,5%
Quartil (25%)	-0,9%	-1,2%	-1,2%	-10,5%	-9,1%
Menor	-0,7%	-1,2%	-1,1%	-10,0%	-8,9%
<b>D/t = 8 → D/t = 18</b>					
Média	-30,1%	-32,1%	-32,1%	-30,1%	-32,1%
Mediana	-33,8%	-36,1%	-36,1%	-33,7%	-35,9%
Desvio padrão	8,5	9,1	9,1	8,1	8,5
Maior	-39,2%	-41,8%	-41,7%	-38,8%	-41%
Quartil (75%)	-36,3%	-39%	-38,9%	-36,3%	-38,8%
Quartil (25%)	-19,6%	-20,9%	-20,9%	-20,0%	-21,3%
Menor	-17,6%	-19%	-19%	-18,5%	-20%
<b>D/t = 18 → D/t = 28</b>					
Média	-21,6%	-22,8%	-22,7%	-23,1%	-25,1%
Mediana	-21,4%	-22,8%	-22,7%	-23,1%	-25%
Desvio padrão	1,2	1,4	1,4	1,1	1,0
Maior	-23,2%	-24,5%	-24,6%	-24,9%	-26,7%
Quartil (75%)	-22,9%	-24%	-24%	-24,1%	-26%
Quartil (25%)	-20,5%	-21,4%	-21,4%	-22,2%	-24,3%
Menor	-20,1%	-21,1%	-21%	-21,4%	-23,5%
<b><math>f_y = 300 \text{ MPa} \rightarrow f_y = 400 \text{ MPa}</math></b>					
Média	22,4%	22,6%	22,7%	20,9%	22,7%
Mediana	22,2%	22,5%	22,5%	20,9%	22,2%
Desvio padrão	3,3	3,7	3,7	3,0	2,7
Maior	18,1%	17,9%	18%	16,3%	18,5%
Quartil (75%)	19,1%	18,7%	18,7%	18,5%	20,7%
Quartil (25%)	24,8%	25,2%	25,2%	23,3%	24,7%
Menor	27,5%	28,5%	28,5%	26,2%	27,7%

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 5-18 ilustra o comportamento da média das variações da força normal resistente (Tabela 5-10) para as 5 análises.

**Figura 5-18: Variação média da força normal resistente: simulação numérica e previsões normativas**



Fonte: Elaborada pelo autor

Na primeira análise ( $L/D = 3$  para  $L/D = 5$ ), como comentado anteriormente, o modelo numérico e a ABNT NBR 8800 (2008) apresentaram variações pequenas; em contrapartida, o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) e a AS/NZS 2327 (2016) apresentaram variações um pouco maiores, em torno de -10% (Figura 5-18). Nas demais análises, o comportamento se mostrou similar para os diferentes métodos de obtenção da força normal resistente.

Portanto, dentre os parâmetros avaliados, ao aumentar a relação  $D/t$  de 8 para 18, foram observadas as reduções na força normal resistente (Tabela 5-10 e Figura 5-18). A variação de  $D/t$  de 18 para 28 e a resistência ao escoamento do aço de 300 MPa para 400 MPa provocaram alterações similares, com médias entre 20% e 25%. Por fim, a mudança de  $L/D = 3$  para  $L/D = 5$  resultou nas menores variações, sendo que para a maioria dos métodos, essa alteração não passou de 2%.

## 6. CONCLUSÕES

O objetivo principal do presente trabalho foi avaliar o comportamento de pilares mistos de seção circular preenchidos com concreto reciclado e submetidos à compressão axial centrada com ênfase na força normal resistente. Para isso, foi realizada revisão sistemática de literatura e modelagem numérica desenvolvida no software Abaqus. O modelo numérico foi validado com resultados experimentais da literatura. Nesta etapa, uma análise de sensibilidade do modelo numérico foi realizada.

O modelo numérico foi então utilizado para uma análise paramétrica na qual foi avaliada a influência de parâmetros geométricos na resposta do comportamento força vs. deformação e na força normal resistente. Os parâmetros analisados foram L/D, D/t e resistência ao escoamento do aço. Além disso, foi realizado uma comparação entre as respostas do modelo numérico com prescrições normativas.

A seguir, são destacadas as principais conclusões:

- a) De acordo com a revisão sistemática da literatura, o uso do concreto reciclado em pilares mistos preenchidos é um tema novo e que está em fase inicial de estudos. A associação dos termos “*concrete filled steel tube*” e “*recycled aggregate concrete*” retornou, após os filtros aplicados, 21 documentos, dos quais apenas 2 era nacionais. A escassez de estudos leva à escassez de dados e, conseqüentemente, à falta de procedimentos normativos para previsão da força normal resistente.
- b) O modelo numérico foi considerado apto para representar os modelos experimentais de pilares mistos curtos de seção circular, preenchidos com concreto reciclado e submetidos à compressão axial centrada. A validação foi feita para força normal resistente, comportamento força vs. deformação e deformações no aço e no concreto.
- c) Procedimentos normativos desenvolvidos para pilares mistos preenchidos com concreto convencional foram avaliados. Dentre as normas avaliadas para prever a força normal resistente de pilares mistos preenchidos com concreto reciclado, o Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) apresentou valores entre 90% e 110% dos encontrados na modelagem numérica. A ABNT NBR 8800 (2008) e a AS/NZS 2327 (2016) apresentaram resultados conservadores.
- d) Como o uso do agregado reciclado impacta o valor do módulo de elasticidade, foi avaliada a influência deste parâmetro sobre a força normal resistente. Os resultados mostraram que força normal resistente não é significativamente afetada pelo valor do módulo de elasticidade. A explicação desse efeito pode ser definida por dois fatores:
  - 1) O módulo de elasticidade é calculado para a fase elástica do concreto, porém o núcleo de concreto começa de fato a apresentar grandes deformações laterais na fase

- plástica, quando já não faz mais sentido falar em módulo de elasticidade. 2) O concreto reciclado é mais deformável. Com isso, o efeito de confinamento pode se beneficiar, podendo aumentar ou manter a força normal resistente, quando comparado ao pilar misto convencional;
- e) A análise paramétrica permitiu identificar os parâmetros que mais influenciam o pilar misto, tanto em termos de força normal resistente, quanto comportamento força vs. deformação. Dentre os parâmetros avaliados, a variação na relação  $D/t$ , seguida da resistência ao escoamento, resultaram nas variações mais significativas de força normal resistente. Aumentos em  $D/t$  provocaram reduções médias de 30% na força normal resistente enquanto o aumento da resistência ao escoamento resultou em aumento médio de 22,4%.
  - f) Apenas pilares curtos foram analisados no presente estudo, com relações  $L/D$  variando entre 3 e 5. Para este intervalo de valores avaliados o aumento da relação  $L/D$  não impactou significativamente a força normal resistente. Embora isto fosse esperado, o estudo permitiu quantificar a intensidade das variações.
  - g) Alguns autores sugerem o uso do fator de confinamento ( $\xi$ ) para identificar o comportamento global (Força-deformação) do pilar misto. No entanto, no presente trabalho não ficou clara a relação entre este fator e o comportamento.
  - h) O índice ( $\alpha_F$ ) foi então proposto e se mostrou bem promissor pois conseguiu classificar todos os 54 modelos de forma que fosse coerente com o observado graficamente. A limitação deste índice é que ele depende de parâmetros que são extraídos do próprio gráfico. Em contrapartida, pode ser utilizado como uma medida do índice de confinamento do pilar preenchido.
  - i) Por fim, é inegável que o agregado reciclado de concreto é um material apropriado para substituição do agregado graúdo natural, em especial para uso em pilares mistos preenchidos de seção circular. De maneira geral, a utilização de resíduos de concreto reduz os impactos ambientais gerados por toda a cadeia de atividades relacionadas à construção civil. Desse modo, o estudo e incentivo do uso do agregado reciclado é fundamental para que a construção civil se torne mais sustentável. O menor custo do agregado reciclado em comparação com o agregado natural pode favorecer seu uso em larga escala, contribuindo tanto para a reciclagem de materiais que seriam descartados quanto para a redução da extração de matérias-primas diretamente do meio-ambiente.

## 6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O uso do concreto reciclado em pilares mistos é um assunto recente e que precisa ser ampliado, sobretudo no cenário nacional. Estudos como Azevedo (2018) e Gerin (2020) são os precursores desse assunto no Brasil. Esses autores realizaram ensaios experimentais a fim de gerar importantes resultados sobre o tema.

A partir destes dados, o uso da modelagem numérica permitiu ampliar o conjunto de dados referentes a pilares mistos curtos ( $L/D < 5$ ) de seção circular. Com o objetivo de enriquecer o cenário nacional nesse tema e contribuir com soluções mais sustentáveis, trabalhos futuros podem ser desenvolvidos com as seguintes sugestões:

- Avaliação de pilares com relações  $L/D > 5$  e nos quais a instabilidade por flexão passa a ser relevante tanto para o comportamento quanto para a capacidade resistente do pilar misto preenchido com concreto reciclado.
- Aperfeiçoamento do modelo numérico com adição de tensões residuais e imperfeições geométricas, que podem ser relevantes para pilares mais longos.
- Avaliação de carregamentos excêntricos no pilar misto com concreto reciclado;
- Utilização de outros teores de substituição do agregado natural por agregado de concreto, a fim de verificar o impacto deste parâmetro nas respostas do pilar misto (força normal resistente e comportamento força vs. deformação);
- Estudo do efeito de confinamento em pilares mistos com concreto reciclado, dando destaque a técnicas de modelagem e estudos teóricos sobre esse efeito;
- Avaliação de custo do uso do concreto reciclado em pilares mistos preenchidos, a fim de incentivar o uso e, conseqüentemente, o comércio nacional.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOGINIJE, A.; AIGBAVBOA, C.; THWALA, W. A holistic assessment of construction and demolition waste management in the nigerian construction projects. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 11, 1 jun. 2021.
- ADAMS, M. P. *et al.* Cracking susceptibility of concrete made with coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 802–810, 2016.
- ADESSINA, A.; FRAJ, A. BEN; BARTHÉLÉMY, J.-F. Improvement of the compressive strength of recycled aggregate concretes and relative effects on durability properties. **Construction and Building Materials**, v. 384, p. 131447, jun. 2023.
- AFRICANO, N. A. **CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA FINS ESTRUTURAIS**. 2021. 112p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, 2021.: [s.n.].
- AFROUGHSAKET, V.; BIOLZI, L.; OZBAKKALOGLU, T. Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete. **Composite Structures**, v. 181, p. 273–284, 2017.
- ALLUJAMI, H. M. *et al.* Mechanical properties of concrete containing recycle concrete aggregates and multi-walled carbon nanotubes under static and dynamic stresses. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, 1 dez. 2022.
- ANDAL, J.; SHEHATA, M.; ZACARIAS, P. Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 842–855, 2016.
- ANDREU, G.; MIREN, E. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 227–235, 2014.
- ANGULO, S. C. *et al.* **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos**. I Conferência Latino-Americana De Construção Sustentável X Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído. **Anais...**2004.
- ARAÚJO, D. L. *et al.* INFLUÊNCIA DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO EM PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 1, 8 fev. 2016.
- ARORA, S.; SINGH, S. P. Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% Coarse Recycled Concrete Aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 782–791, 2016.
- AS 3600, (2018). Australian Standard, “Concrete structures” AS 3600, 2018. [s.d.].
- AS/NZS 2327, (2016). Australian/New Zealand Standard, “Composite structures—Composite

- steel-concrete construction in buildings.” AS/NZS 2327, 2016. [s.d].
- AZEVEDO, V. DA S. *et al.* Experimental investigation on recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns under axial compression. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 187, n. August, p. 106930, 2021.
- AZEVEDO, V. S. **Avaliação experimental de colunas CFST curtas com núcleo de concreto reciclado**. 2018. 232p. Tese (Doutorado), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.: [s.n.].
- BAI, G.; LIU, B. Nonlinear finite element analysis of bond-slip performance of recycled aggregate concrete filled circular steel tube. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 33, n. 12, p. 1294–1319, 18 jun. 2019.
- BAIOCHI, A. G. *et al.* Análise da aderência entre o concreto desenvolvido com resíduo de construção civil e o aço pelo método APULOT. **IBRACON**, 2013.
- BARBUDO, A. *et al.* Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, p. 93–98, 2013a.
- BARBUDO, A. *et al.* Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, p. 93–98, 2013b.
- BORGHI, G.; PANTINI, S.; RIGAMONTI, L. Life cycle assessment of non-hazardous Construction and Demolition Waste (CDW) management in Lombardy Region (Italy). **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 815–825, 20 maio 2018.
- BUTTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural** Escola de Engenharia de São Carlos. 2007. 535p. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007: [s.n.].
- CAMPOS, R. S. *et al.* Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável Influence of recycled aggregates on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete. **Revista Matéria**, v. vol.23, n. no.1, p. 20p, 2018.
- CHEN, J. *et al.* Behavior of normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubes under combined loading. **Engineering Structures**, v. 130, p. 23–40, 2017.
- CHEN, J.; ZHOU, Y.; YIN, F. A Practical Equation for the Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete. **Buildings**, v. 12, n. 2, 1 fev. 2022.
- CHEN, W. *et al.* Load-carrying capacity of circular recycled aggregate concrete-filled steel tubular stub columns under axial compression: Reliability analysis and design factor calibration. **Journal of Building Engineering**, p. 105935, maio 2023.
- CHEN, Z. *et al.* **Research on the bearing capacity of recycled aggregate concrete-filled circle steel tube column under axial compression loading**. 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. **Anais...IEEE**, jun. 2010. Disponível em:



<<http://ieeexplore.ieee.org/document/5536412/>>

CHEN, Z. *et al.* Performance and calculations of recycled aggregate concrete-filled steel tubular (RACFST) short columns under axial compression. **International Journal of Steel Structures**, v. 14, n. 1, p. 31–42, 2014a.

CHEN, Z. *et al.* Performance and calculations of recycled aggregate concrete-filled steel tubular (RACFST) short columns under axial compression. **International Journal of Steel Structures**, v. 14, n. 1, p. 31–42, 2014b.

CHEN, Z. *et al.* Bond behaviors of shape steel embedded in recycled aggregate concrete and recycled aggregate concrete filled in steel tubes. **Steel and Composite Structures**, v. 17, n. 6, p. 929–949, 25 dez. 2014c.

CUI, K. *et al.* Mechanical behavior of multiscale hybrid fiber reinforced recycled aggregate concrete subject to uniaxial compression. **Journal of Building Engineering**, v. 71, 15 jul. 2023.

DE CARVALHO, A. S.; ROSSI, A.; MARTINS, C. H. Assessment of lateral–torsional buckling in steel I-beams with sinusoidal web openings. **Thin-Walled Structures**, v. 175, 1 jun. 2022.

DE NARDIN, S. **Estudo teórico - experimental de pilares mistos compostos por tubos de aço preenchidos com concreto de alta resistência**. 1999. 162p. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.: [s.n.].

DE OLIVEIRA, W. L. A. *et al.* Influence of concrete strength and length/diameter on the axial capacity of CFT columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 65, n. 12, p. 2103–2110, dez. 2009.

DIMITRIOU, G.; SAVVA, P.; PETROU, M. F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 228–235, 2018.

DONG, J. F.; WANG, Q. Y.; GUAN, Z. W. Material and structural response of steel tube confined recycled earthquake waste concrete subjected to axial compression. **Magazine of Concrete Research**, v. 68, n. 6, p. 271–282, 1 mar. 2016.

EARLS, C. J. Effects of material property stratification and residual stresses on single angle flexural ductility. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 51, n. 2, p. 147–175, 1999.

EN, 1992-1-1. European Committee for Standardization, “Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.” EN 1992-1-1: EUROCODE 2, 2004. [s.d.].

ESTOLANO, V. *et al.* Avaliação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de pré-fabricados de concreto. **Revista Materia**, v. 23, n. 1, 2018.

European Committee for Standardization, “Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.” EN 1994-1-1: EUROCODE 4, 2004. [s.d.].

- FERREIRA, L.; DE BRITO, J.; BARRA, M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. **Magazine of Concrete Research**, v. 63, n. 8, p. 617–627, 2011.
- FIGUEIREDO, P. O. *et al.* Influência dos métodos de britagem nas propriedades do agregado reciclado de concreto. **Ambiente Construído**, v. 20, p. 99–111, 2020.
- FIOL, F. *et al.* The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 309–323, 2018.
- FOLINO, P.; XARGAY, H. Recycled aggregate concrete - Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. **Construction and Building Materials**, v. 56, p. 21–31, 2014.
- FURINI, R. C. B.; TRIGO, A. P. M. Estudo de dosagem de concretos permeáveis com agregados reciclados de RCC. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 1, p. 8063–8070, 31 jan. 2022.
- GERIN, M. T. **Comportamento de pilares mistos preenchidos com concreto de resíduos de concreto submetidos a compressão axial centrada: efeito do teor de substituição e da forma de aplicação da força**. 2020. 152p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.: [s.n.].
- GONÇALVES, M. S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos**. 2011. 118p. Dissertação (Mestrado), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.: [s.n.].
- GONÇALVES, R. D. C. C. **Agregados Reciclados De Resíduos De Concreto - Um Novo Material Para Dosagens Estruturais**. 2001. 148p. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001: [s.n.].
- GUO, Z. **Principles of Reinforced Concrete**. [s.l.] Elsevier, 2014. v. 1
- GUO, Z. *et al.* Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume. **Construction and Building Materials**, v. 231, p. 117115, 2020.
- HAN, L. H.; XU, C. Y.; HOU, C. Axial compression and bond behaviour of recycled aggregate concrete-filled stainless steel tubular stub columns. **Engineering Structures**, v. 262, 1 jul. 2022.
- HATZIGEORGIOU, G. D. Numerical model for the behavior and capacity of circular CFT columns, Part I: Theory. **Engineering Structures**, v. 30, n. 6, p. 1573–1578, 2008.
- HE, A. *et al.* Experimental and numerical investigations of circular recycled aggregate concrete-filled stainless steel tube columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 179, 1 abr. 2021.

- HILLERBORG, A.; MODÉER, M.; PETERSSON, P.-E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. **Cement and Concrete Research**, v. 6, n. 6, p. 773–781, nov. 1976.
- HOU, M. *et al.* **Influence of amount of recycled coarse aggregate on mechanical properties of steel tube columns**. Advanced Materials Research. **Anais...**2013.
- HUANG, B. *et al.* Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 36–44, 1 fev. 2018.
- JAYASURIYA, A. *et al.* Development and statistical database analysis of hardened concrete properties made with recycled concrete aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, n. April 2020, p. 105121, 2021.
- JOHANSSON, M.; GYLLTOFT, K. Mechanical Behavior of Circular Steel–Concrete Composite Stub Columns. **Journal of Structural Engineering**, v. 128, n. 8, p. 1073–1081, 2002a.
- JOHANSSON, M.; GYLLTOFT, K. Mechanical Behavior of Circular Steel–Concrete Composite Stub Columns. **Journal of Structural Engineering**, v. 128, n. 8, p. 1073–1081, 2002b.
- JUNAK, J.; SICAKOVA, A. Concrete Containing Recycled Concrete Aggregate with Modified Surface. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 1284–1291, 2017.
- JUNIOR, J. S. K. Avaliação da incorporação de agregado reciclado na composição de concretos autoadensáveis. p. 148, 2018.
- KABIRIFAR, K. *et al.* Effective construction and demolition waste management assessment through waste management hierarchy; a case of Australian large construction companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, 20 ago. 2021.
- KAZMIERCZAK, C. DE S. *et al.* Influence of the moisture content on the dynamic modulus of elasticity of concrete made with recycled aggregate. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 2, p. 79–89, 2019.
- KHOURY, E. *et al.* Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 705–713, 2018.
- KISKU, N. *et al.* **A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material**. **Construction and Building Materials** Elsevier Ltd, , 30 jan. 2017.
- LEE, J.; FENVES, G. L. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 124, n. 8, p. 892–900, ago. 1998.
- LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290p. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001: [s.n.].
- LUBLINER, J. *et al.* A plastic-damage model for concrete. **International Journal of Solids and Structures**, v. 25, n. 3, p. 299–326, 1989.

- LYU, W. Q.; HAN, L. H.; HOU, C. Axial compressive behaviour and design calculations on recycled aggregate concrete-filled steel tubular (RAC-FST) stub columns. **Engineering Structures**, v. 241, 15 ago. 2021.
- MA, H. *et al.* Compressive behaviour of composite columns composed of RAC-filled circular steel tube and profile steel under axial loading. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 143, p. 72–82, 1 abr. 2018.
- MA, H. *et al.* Axial compression performance of composite short columns composed of RAC-filled square steel tube and profile steel. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 153, p. 416–430, 2019a.
- MA, H. *et al.* Eccentric compression performance of composite columns composed of RAC-filled circular steel tube and profile steel. **Engineering Structures**, v. 201, 15 dez. 2019b.
- MA, H. *et al.* Eccentric compression performance of composite columns composed of RAC-filled circular steel tube and profile steel. **Engineering Structures**, v. 201, 15 dez. 2019c.
- MISTRI, A. *et al.* Performance of biocement treatment in improving the interfacial properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 369, 10 mar. 2023.
- MOHANRAJ, E. K.; KANDASAMY, S.; MALATHY, R. Behaviour of steel tubular stub and slender columns filled with concrete using recycled aggregates. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**, v. 53, n. 2, p. 31–38, 2011.
- MOMOTAZ, H. *et al.* Comparative study on properties of kerb concrete made from recycled materials and related carbon footprint. **Journal of Building Engineering**, v. 72, 1 ago. 2023.
- MORETTI, J. P. **Estudo de viabilidade técnica da utilização da ACBC e do RCC na composição de concretos**. 2014. 166p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.: [s.n.].
- NBR 6118, (2014). Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.” ABNT NBR 6118, 2014. [s.d.].
- NBR 8800, (2008). Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.” ABNT NBR 8800, 2008. [s.d.].
- NBR 12655, (2022). Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento” ABNT NBR 12655, 2022. [s.d.].
- NBR 15116, (2021). Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios.” ABNT NBR 15116, 2021. [s.d.].
- NILI, M.; SASANIPOUR, H.; ASLANI, F. The effect of fine and coarse recycled aggregates on fresh and mechanical properties of self-compacting concrete. **Materials**, v. 12, n. 7, 2019.
- NOUR, A. I.; GÜNEYISI, E. M. Prediction model on compressive strength of recycled

aggregate concrete filled steel tube columns. **Composites Part B: Engineering**, v. 173, 15 set. 2019.

OLIVEIRA, V. M. DE *et al.* Stability behavior of steel–concrete composite cellular beams subjected to hogging moment. **Thin-Walled Structures**, v. 173, p. 108987, abr. 2022.

OLIVEIRA, M. DO P. S. L. **Desenvolvimento de Estratégias para a Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição do Município de Manaus (Amazonas-Brasil) com Base no Conceito de Economia Circular**. 2021. 119p. Tese (Doutorado), Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2021.: [s.n.].

OLIVEIRA, T. M. **Análise estatística da resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos com agregados de resíduos**. 202. 47p. Monografia (Graduação), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.: [s.n.].

OLIVEIRA, W. L. A. DE O. **Análise teórico-experimental de pilares mistos preenchidos de seção circular**. 2008. 251p. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008: [s.n.].

OZBAKKALOGLU, T.; GHOLAMPOUR, A.; XIE, T. Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete: Effect of Recycled Aggregate Properties and Content. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 2, 2018.

RAMOS, M. **Reciclagem de resíduos da construção civil: confirma o cenário nacional**. Sienge, 2023. Disponível em: <https://www.sienge.com.br/blog/reciclagem-de-residuos-da-construcao-civil/>. Acesso em: 11 mai. 2023.: [s.n.].

ROSADO, L. P. *et al.* Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. **Waste Management**, v. 85, p. 477–489, 15 fev. 2019.

ROSSI, A. *et al.* Numerical assessment of lateral distortional buckling in steel-concrete composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 172, 1 set. 2020.

SALLES, P. V. *et al.* A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 177–196, set. 2021.

SHEN, H.; PENG, Y.; GUO, C. Analysis of the evolution game of construction and demolition waste recycling behavior based on prospect theory under environmental regulation. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 7, 18 jul. 2018.

SILVA, C. M. M. DE A. E. *et al.* Concrete produced with recycled concrete aggregate exposed to treatment methods. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, 1 jul. 2023.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1195–1203, 2005.

- TAM, V. W. Y.; WANG, Z. BIN; TAO, Z. Behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel stub columns. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 47, n. 1–2, p. 293–310, 2014.
- TANG, Y. *et al.* Mechanical properties and uniaxial compressive stress-strain behavior of fully recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 323, 14 mar. 2022.
- TAO, Z.; WANG, Z. BIN; YU, Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 89, p. 121–131, 2013.
- TEIXEIRA, E. DA C. *et al.* Estudo De Concretos Preparados Com Rcd E Metacaulim. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 63407–63414, 2018.
- THOMAS, J.; THAICKAVIL, N. N.; WILSON, P. M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 19, n. March, p. 349–365, 2018.
- UY, B.; TAO, Z.; HAN, L. H. Behaviour of short and slender concrete-filled stainless steel tubular columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, n. 3, p. 360–378, mar. 2011.
- VERIAN, K. P.; ASHRAF, W.; CAO, Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, n. October 2017, p. 30–49, 2018.
- WANG, Z. BIN *et al.* Strength, stiffness and ductility of concrete-filled steel columns under axial compression. **Engineering Structures**, v. 135, p. 209–221, 15 mar. 2017.
- WANG, E. *et al.* Confinement Effect and Efficiency of Concentrically Loaded RACFCST Stub Columns. **Materials**, v. 15, n. 1, 1 jan. 2022.
- WANG, Y.; CHEN, J.; GENG, Y. Testing and analysis of axially loaded normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns. **Engineering Structures**, v. 86, p. 192–212, 2015.
- XIAO, J. *et al.* An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 364–383, 2012.
- XIAO, J. Z.; LI, J. B.; ZHANG, C. On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 39, n. 6, p. 655–664, 2006.
- XU, J. J. *et al.* Novel prediction models for composite elastic modulus of circular recycled aggregate concrete-filled steel tubes. **Thin-Walled Structures**, v. 144, 1 nov. 2019.
- YANG, Y. F.; HAN, L. H. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 62, n. 12, p. 1310–1324, dez. 2006.

- YANG, Y. F.; MA, G. L. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel tube stub columns and beams. **Thin-Walled Structures**, v. 66, p. 62–75, 2013.
- YANG, Y.-F.; HAN, L.-H.; ZHU, L.-T. Experimental Performance of Recycled Aggregate Concrete-Filled Circular Steel Tubular Columns Subjected to Cyclic Flexural Loadings. **Advances in Structural Engineering**, v. 12, n. 2, p. 183–194, 7 abr. 2009.
- YE, Y. *et al.* Concrete-filled bimetallic tubes under axial compression: Experimental investigation. **Thin-Walled Structures**, v. 108, p. 321–332, 1 nov. 2016.
- YU, F. *et al.* Stress-strain relationship of recycled self-compacting concrete filled steel tubular column subjected to eccentric compression. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 14, n. 3, p. 760–772, 1 jun. 2020.
- YUAN, H. *et al.* A dissipative structure theory-based investigation of a construction and demolition waste minimization system in China. **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 65, n. 3, p. 514–535, 2022.
- ZHANG, H. *et al.* Long-term shrinkage and mechanical properties of fully recycled aggregate concrete: Testing and modelling. **Cement and Concrete Composites**, v. 130, 1 jul. 2022.
- ZHAO, M. Z. *et al.* Response and modeling of axially-loaded concrete-filled steel columns with recycled coarse and fine aggregate. **Engineering Structures**, v. 234, 1 maio 2021.
- ZHAO, Y. G. *et al.* Loading paths of confined concrete in circular concrete loaded CFT stub columns subjected to axial compression. **Engineering Structures**, v. 156, n. July 2017, p. 21–31, 2018.
- ZHONG, Y.; ZHAO, O. Behaviour of eccentrically loaded circular recycled aggregate concrete-filled stainless steel tube stub columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 198, 1 nov. 2022.

# APÊNDICE A

O APÊNDICE A contém os dados da análise paramétrica.

A Tabela A-1 mostra todas as combinações avaliadas e a respectiva força normal resistente referente a deformação 10‰.

**Tabela A-1: Força normal resistente dos 54 modelos avaliados (continua)**

ID	Diâmetro [mm]	L/D	D/t	$f_y$ [MPa]	Força [kN]
1	114,3	3	8,4	300	1717
2	114,3	3	8,4	400	2189
3	114,3	3	18,1	300	1092
4	114,3	3	18,1	400	1331
5	114,3	3	28,6	300	865
6	114,3	3	28,6	400	1022
7	114,3	4	8,4	300	1702
8	114,3	4	8,4	400	2168
9	114,3	4	18,1	300	1083
10	114,3	4	18,1	400	1321
11	114,3	4	28,6	300	861
12	114,3	4	28,6	400	1017
13	114,3	5	8,4	300	1689
14	114,3	5	8,4	400	2154
15	114,3	5	18,1	300	1079
16	114,3	5	18,1	400	1318
17	114,3	5	28,6	300	855
18	114,3	5	28,6	400	1012
19	219,1	3	8,4	300	5992
20	219,1	3	8,4	400	7609
21	219,1	3	18,1	300	4019
22	219,1	3	18,1	400	4918
23	219,1	3	28,6	300	3211
24	219,1	3	28,6	400	3833
25	219,1	4	8,4	300	5937
26	219,1	4	8,4	400	7539
27	219,1	4	18,1	300	3999
28	219,1	4	18,1	400	4899
29	219,1	4	28,6	300	3193
30	219,1	4	28,6	400	3802
31	219,1	5	8,4	300	5899
32	219,1	5	8,4	400	7482
33	219,1	5	18,1	300	3985
34	219,1	5	18,1	400	4886
35	219,1	5	28,6	300	3181
36	219,1	5	28,6	400	3791
37	323,8	3	8,4	300	10375
38	323,8	3	8,4	400	12939
39	323,8	3	18,1	300	8508
40	323,8	3	18,1	400	10401
41	323,8	3	28,6	300	6765
42	323,8	3	28,6	400	8022
43	323,8	4	8,4	300	10324
44	323,8	4	8,4	400	12890
45	323,8	4	18,1	300	8478



**Tabela A-1: Força normal resistente dos 54 modelos avaliados (continuação)**

ID	Diâmetro [mm]	L/D	D/t	$f_y$ [MPa]	Força [kN]
46	323,8	4	18,1	400	10344
47	323,8	4	28,6	300	6725
48	323,8	4	28,6	400	7970
49	323,8	5	8,4	300	10238
50	323,8	5	8,4	400	12780
51	323,8	5	18,1	300	8440
52	323,8	5	18,1	400	10314
53	323,8	5	28,6	300	6703
54	323,8	5	28,6	400	7944

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela A-2 mostra a comparação entre a força normal resistente da modelagem numérica e das recomendações normativas, considerando valor experimental para o módulo de elasticidade.

**Tabela A-2: Comparação entre a força normal resistente modelagem e recomendações normativas, considerando  $E_c$  experimental (continua)**

ID	Modelo numérico [kN]	ABNT NBR 8800 (2008) [kN]	Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) [kN]	AS/NZS 2327 (2016) [kN]	Ma et al, (2018) [kN]
1	1717	1542 (-10,2%)	1855 (+8%)	1492 (-13,1%)	1523 (-11,3%)
2	2189	1982 (-9,5%)	2341 (+6,9%)	1905 (-13%)	1963 (-10,3%)
3	1092	941 (-13,8%)	1181 (+8,2%)	914 (-16,3%)	914 (-16,3%)
4	1331	1155 (-13,2%)	1439 (+8,1%)	1131 (-15%)	1128 (-15,3%)
5	865	736 (-14,9%)	909 (+5,1%)	687 (-20,6%)	706 (-18,4%)
6	1022	872 (-14,7%)	1078 (+5,5%)	829 (-18,9%)	843 (-17,5%)
7	1702	1534 (-9,9%)	1754 (+3,1%)	1427 (-16,2%)	1515 (-11%)
8	2168	1969 (-9,2%)	2199 (+1,4%)	1803 (-16,8%)	1950 (-10,1%)
9	1083	936 (-13,6%)	1114 (+2,9%)	871 (-19,6%)	910 (-16%)
10	1321	1148 (-13,1%)	1347 (+2%)	1066 (-19,3%)	1121 (-15,1%)
11	861	732 (-15%)	862 (+0,1%)	656 (-23,8%)	702 (-18,5%)
12	1017	866 (-14,8%)	1013 (-0,4%)	783 (-23%)	837 (-17,7%)
13	1689	1524 (-9,8%)	1661 (-1,7%)	1359 (-19,5%)	1505 (-10,9%)
14	2154	1952 (-9,4%)	2063 (-4,2%)	1710 (-20,6%)	1934 (-10,2%)
15	1079	930 (-13,8%)	1052 (-2,5%)	827 (-23,4%)	904 (-16,2%)
16	1318	1138 (-13,7%)	1259 (-4,5%)	1006 (-23,7%)	1112 (-15,6%)
17	855	726 (-15,1%)	816 (-4,6%)	624 (-27%)	698 (-18,4%)
18	1012	858 (-15,2%)	950 (-6,1%)	741 (-26,8%)	830 (-18%)
19	5992	5363 (-10,5%)	6508 (+8,6%)	5217 (-12,9%)	5287 (-11,8%)
20	7609	6864 (-9,8%)	8197 (+7,7%)	6646 (-12,7%)	6789 (-10,8%)
21	4019	3497 (-13%)	4387 (+9,2%)	3398 (-15,5%)	3396 (-15,5%)
22	4918	4295 (-12,7%)	5349 (+8,8%)	4208 (-14,4%)	4196 (-14,7%)
23	3211	2761 (-14%)	3416 (+6,4%)	2587 (-19,4%)	2651 (-17,4%)
24	3833	3282 (-14,4%)	4063 (+6%)	3131 (-18,3%)	3174 (-17,2%)
25	5937	5335 (-10,1%)	6156 (+3,7%)	4987 (-16%)	5260 (-11,4%)
26	7539	6819 (-9,6%)	7692 (+2%)	6281 (-16,7%)	6745 (-10,5%)
27	3999	3478 (-13%)	4138 (+3,5%)	3238 (-19%)	3379 (-15,5%)
28	4899	4267 (-12,9%)	5007 (+2,2%)	3965 (-19,1%)	4170 (-14,9%)
29	3193	2744 (-14,1%)	3237 (+1,4%)	2469 (-22,7%)	2637 (-17,4%)
30	3802	3259 (-14,3%)	3814 (+0,3%)	2955 (-22,3%)	3154 (-17%)
31	5899	5300 (-10,2%)	5827 (-1,2%)	4747 (-19,5%)	5226 (-11,4%)
32	7482	6762 (-9,6%)	7208 (-3,7%)	5951 (-20,5%)	6690 (-10,6%)

**Tabela A-2: Comparação entre a força normal resistente modelagem e recomendações normativas, considerando  $E_c$  experimental (continuação)**

ID	Modelo numérico [kN]	ABNT NBR 8800 (2008) [kN]	Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) [kN]	AS/NZS 2327 (2016) [kN]	Ma et al, (2018) [kN]
33	3985	3454 (-13,3%)	3908 (-1,9%)	3075 (-22,8%)	3358 (-15,7%)
34	4886	4231 (-13,4%)	4680 (-4,2%)	3745 (-23,4%)	4137 (-15,3%)
35	3181	2724 (-14,4%)	3065 (-3,6%)	2350 (-26,1%)	2619 (-17,7%)
36	3791	3230 (-14,8%)	3602 (-5%)	2796 (-26,2%)	3128 (-17,5%)
37	10375	9142 (-11,9%)	11410 (+10%)	8974 (-13,5%)	8942 (-13,8%)
38	12939	11454 (-11,5%)	14135 (+9,2%)	11267 (-12,9%)	11256 (-13%)
39	8508	7406 (-13%)	9286 (+9,1%)	7174 (-15,7%)	7185 (-15,6%)
40	10401	9064 (-12,9%)	11291 (+8,6%)	8861 (-14,8%)	8844 (-15%)
41	6765	5825 (-13,9%)	7183 (+6,2%)	5419 (-19,9%)	5584 (-17,5%)
42	8022	6888 (-14,1%)	8505 (+6%)	6529 (-18,6%)	6649 (-17,1%)
43	10324	9095 (-11,9%)	10774 (+4,4%)	8560 (-17,1%)	8898 (-13,8%)
44	12890	11380 (-11,7%)	13228 (+2,6%)	10620 (-17,6%)	11186 (-13,2%)
45	8478	7366 (-13,1%)	8762 (+3,3%)	6836 (-19,4%)	7148 (-15,7%)
46	10344	9004 (-13%)	10571 (+2,2%)	8350 (-19,3%)	8789 (-15%)
47	6725	5790 (-13,9%)	6811 (+1,3%)	5174 (-23,1%)	5554 (-17,4%)
48	7970	6839 (-14,2%)	7990 (+0,3%)	6166 (-22,6%)	6606 (-17,1%)
49	10238	9035 (-11,8%)	10174 (-0,6%)	8131 (-20,6%)	8842 (-13,6%)
50	12780	11285 (-11,7%)	12362 (-3,3%)	10033 (-21,5%)	11096 (-13,2%)
51	8440	7315 (-13,3%)	8278 (-1,9%)	6494 (-23,1%)	7102 (-15,9%)
52	10314	8928 (-13,4%)	9882 (-4,2%)	7887 (-23,5%)	8719 (-15,5%)
53	6703	5746 (-14,3%)	6453 (-3,7%)	4927 (-26,5%)	5515 (-17,7%)
54	7944	6777 (-14,7%)	7498 (-5,6%)	5836 (-26,5%)	6551 (-17,5%)

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela A-3 mostra a comparação entre a força normal resistente da modelagem e recomendações normativas, considerando módulo de elasticidade previsto de acordo com recomendação das mesmas normas.

**Tabela A-3: Comparação entre a força normal resistente modelagem e recomendações normativas, considerando  $E_c$  das mesmas normas (continua)**

ID	Modelo numérico [kN]	ABNT NBR 8800 (2008) - $\alpha E = 0,7$ [kN]	ABNT NBR 8800 (2008) - $\alpha E = 1,2$ [kN]	Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) [kN]	AS/NZS 2327 (2016) [kN]
1	1717	1542 (-10,2%)	1542 (-10,2%)	1857 (+8,2%)	1493 (-13%)
2	2189	1982 (-9,5%)	1982 (-9,5%)	2343 (+7%)	1906 (-12,9%)
3	1092	941 (-13,8%)	942 (-13,7%)	1184 (+8,4%)	915 (-16,2%)
4	1331	1155 (-13,2%)	1155 (-13,2%)	1444 (+8,5%)	1133 (-14,9%)
5	865	736 (-14,9%)	736 (-14,9%)	913 (+5,5%)	688 (-20,5%)
6	1022	872 (-14,7%)	873 (-14,6%)	1084 (+6,1%)	831 (-18,7%)
7	1702	1534 (-9,9%)	1534 (-9,9%)	1756 (+3,2%)	1428 (-16,1%)
8	2168	1969 (-9,2%)	1969 (-9,2%)	2202 (+1,6%)	1804 (-16,8%)
9	1083	936 (-13,6%)	937 (-13,5%)	1118 (+3,2%)	873 (-19,4%)
10	1321	1147 (-13,2%)	1148 (-13,1%)	1352 (+2,3%)	1271 (-3,8%)
11	861	732 (-15%)	732 (-15%)	866 (+0,6%)	658 (-23,6%)
12	1017	866 (-14,8%)	867 (-14,7%)	1020 (+0,3%)	786 (-22,7%)
13	1689	1524 (-9,8%)	1524 (-9,8%)	1664 (-1,5%)	1609 (-4,7%)

**Tabela A-3: Comparação entre a força normal resistente modelagem e recomendações normativas, considerando  $E_c$  das mesmas normas (continuação)**

ID	Modelo numérico [kN]	ABNT NBR 8800 (2008) - $\alpha E = 0,7$ [kN]	ABNT NBR 8800 (2008) - $\alpha E = 1,2$ [kN]	Eurocode 4 (EN 1994-1-1:2004) [kN]	AS/NZS 2327 (2016) [kN]
14	2154	1952 (-9,4%)	1953 (-9,3%)	2066 (-4,1%)	1711 (-20,6%)
15	1079	930 (-13,8%)	931 (-13,7%)	1057 (-2%)	829 (-23,2%)
16	1318	1137 (-13,7%)	1139 (-13,6%)	1265 (-4%)	1009 (-23,4%)
17	855	726 (-15,1%)	727 (-15%)	822 (-3,9%)	627 (-26,7%)
18	1012	858 (-15,2%)	859 (-15,1%)	958 (-5,3%)	744 (-26,5%)
19	5992	5363 (-10,5%)	5363 (-10,5%)	6515 (+8,7%)	5219 (-12,9%)
20	7609	6864 (-9,8%)	6865 (-9,8%)	8207 (+7,9%)	6650 (-12,6%)
21	4019	3496 (-13%)	3497 (-13%)	4400 (+9,5%)	3403 (-15,3%)
22	4918	4295 (-12,7%)	4297 (-12,6%)	5367 (+9,1%)	4214 (-14,3%)
23	3211	2760 (-14%)	2762 (-14%)	3432 (+6,9%)	2593 (-19,2%)
24	3833	3282 (-14,4%)	3284 (-14,3%)	4084 (+6,5%)	3138 (-18,1%)
25	5937	5335 (-10,1%)	5336 (-10,1%)	6164 (+3,8%)	4991 (-15,9%)
26	7539	6819 (-9,6%)	6820 (-9,5%)	7703 (+2,2%)	6287 (-16,6%)
27	3999	3477 (-13,1%)	3479 (-13%)	4152 (+3,8%)	3245 (-18,9%)
28	4899	4266 (-12,9%)	4269 (-12,9%)	5027 (+2,6%)	3974 (-18,9%)
29	3193	2744 (-14,1%)	2746 (-14%)	3254 (+1,9%)	2478 (-22,4%)
30	3802	3258 (-14,3%)	3262 (-14,2%)	3842 (+1,1%)	2966 (-22%)
31	5899	5300 (-10,2%)	5301 (-10,1%)	5837 (-1,1%)	4751 (-19,5%)
32	7482	6761 (-9,6%)	6763 (-9,6%)	7221 (-3,5%)	5956 (-20,4%)
33	3985	3453 (-13,4%)	3456 (-13,3%)	3926 (-1,5%)	3083 (-22,6%)
34	4886	4230 (-13,4%)	4234 (-13,3%)	4704 (-3,7%)	3755 (-23,1%)
35	3181	2722 (-14,4%)	2726 (-14,3%)	3086 (-3%)	2359 (-25,8%)
36	3791	3228 (-14,9%)	3234 (-14,7%)	3605 (-4,9%)	2808 (-25,9%)
37	10375	9141 (-11,9%)	9143 (-11,9%)	11433 (+10,2%)	8983 (-13,4%)
38	12939	11453 (-11,5%)	11455 (-11,5%)	14168 (+9,5%)	11279 (-12,8%)
39	8508	7405 (-13%)	7408 (-12,9%)	9315 (+9,5%)	7185 (-15,6%)
40	10401	9063 (-12,9%)	9067 (-12,8%)	11332 (+9%)	8876 (-14,7%)
41	6765	5824 (-13,9%)	5827 (-13,9%)	7226 (+6,8%)	5431 (-19,7%)
42	8022	6886 (-14,2%)	6891 (-14,1%)	8552 (+6,6%)	6547 (-18,4%)
43	10324	9094 (-11,9%)	9097 (-11,9%)	10801 (+4,6%)	8573 (-17%)
44	12890	11378 (-11,7%)	11383 (-11,7%)	13264 (+2,9%)	10637 (-17,5%)
45	8478	7365 (-13,1%)	7369 (-13,1%)	8795 (+3,7%)	6852 (-19,2%)
46	10344	9002 (-13%)	9009 (-12,9%)	10618 (+2,6%)	8372 (-19,1%)
47	6725	5788 (-13,9%)	5794 (-13,8%)	6849 (+1,8%)	5192 (-22,8%)
48	7970	6837 (-14,2%)	6845 (-14,1%)	8050 (+1%)	6191 (-22,3%)
49	10238	9033 (-11,8%)	9038 (-11,7%)	10208 (-0,3%)	8145 (-20,4%)
50	12780	11283 (-11,7%)	11290 (-11,7%)	12405 (-2,9%)	10051 (-21,4%)
51	8440	7313 (-13,4%)	7320 (-13,3%)	8318 (-1,4%)	6511 (-22,9%)
52	10314	8925 (-13,5%)	8934 (-13,4%)	9936 (-3,7%)	7910 (-23,3%)
53	6703	5743 (-14,3%)	5752 (-14,2%)	6501 (-3%)	4947 (-26,2%)
54	7944	6773 (-14,7%)	6786 (-14,6%)	7561 (-4,8%)	5863 (-26,2%)

Fonte: Elaborada pelo autor