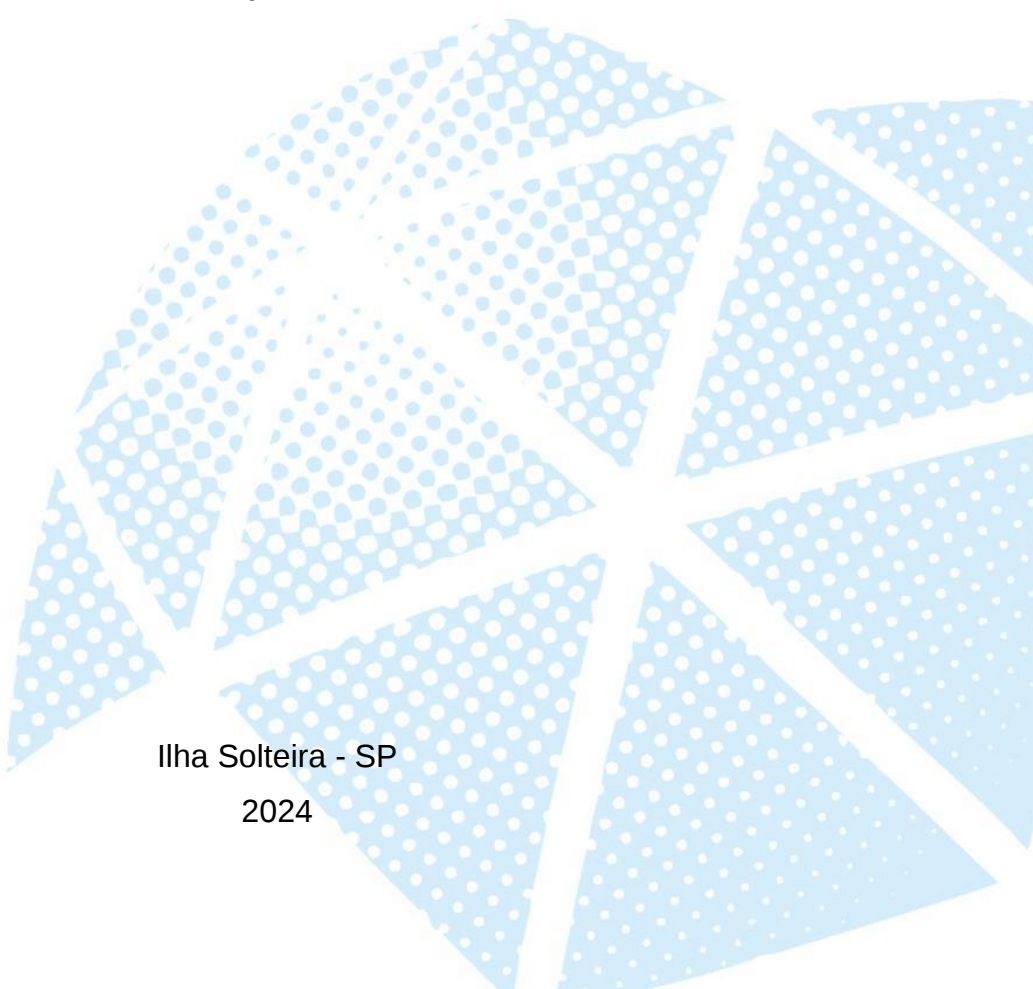


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ANA PAULA BERNARDINO

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO MICROCONFINAMENTO DO CONCRETO NA
REGIÃO DE INTRODUÇÃO DE CARGA PARA LIGAÇÕES SIMPLES ENTRE
VIGA E PILAR CIRCULAR DE AÇO PREENCHIDO COM CONCRETO**

Ilha Solteira - SP
2024



ANA PAULA BERNARDINO

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DO MICROCONFINAMENTO DO CONCRETO NA
REGIÃO DE INTRODUÇÃO DE CARGA PARA LIGAÇÕES SIMPLES ENTRE
VIGA E PILAR CIRCULAR DE AÇO PREENCHIDO COM CONCRETO**

TCC apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador(a): Prof. Dr. Rogério de Oliveira Rodrigues

Coorientador(a): Prof. Dr. Emerson Alexandro Bolandim

Ilha Solteira - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- B523a Bernardino, Ana Paula.
- Avaliação do efeito do microconfinamento do concreto na região de introdução de carga para ligações simples entre viga e pilar circular de aço preenchido com concreto / Ana Paula Bernardino. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024 79 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2024
- Orientador: Rogério de Oliveira Rodrigues
Coorientador: Emerson Alexandro Bolandim
Inclui bibliografia
1. Pilar misto tubular. 2. Seção circular. 3. Ligação simples. 4. Single plate. 5. Pinching. 6. Introdução de carga.

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANA PAULA BERNARDINO

AVALIAÇÃO DO EFEITO DO MICROCONFINAMENTO DO CONCRETO NA REGIÃO DE INTRODUÇÃO DE CARGA PARA LIGAÇÕES SIMPLES ENTRE VIGA E PILAR CIRCULAR DE AÇO PREENCHIDO COM CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ROGERIO DE OLIVEIRA RODRIGUES**
Data: 11/07/2024 14:50:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. _____

UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **EMERSON ALEXANDRO BOLANDIM**
Data: 11/07/2024 14:16:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. _____

UNESP – Campus de Ilha Solteira

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE ROSSI**
Data: 11/07/2024 11:20:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. _____

UFU – Campus de Uberlândia

Ilha Solteira

11/07/2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por me permitir chegar até aqui, por me guiar e sempre me conduzir pelos caminhos certos e por me resgatar em todas as vezes que deles me desviei.

Aos meus pais, Valdira e José Sérgio, minha Dinda, minhas irmãs, Lola, Ellen e Maju e também meu sobrinho, Levi, por serem minha base e me manterem de pé, por acreditarem em mim, torcerem e orarem por mim e por vibrarem a cada pequena conquista minha, mesmo que, na maioria das vezes, seja de longe.

Agradeço também a minha segunda família, Rep Label, por me acolher, aconselhar, por ser abrigo e fazer parte dos meus melhores momentos aqui em Ilha Solteira.

Expresso meus agradecimentos ao grupo PET por toda experiência e conhecimento adquirido e pelos amigos que fiz durante minha trajetória no grupo. Ao Ministério de Educação e Cultura (MEC) pelo apoio financeiro durante minha permanência no grupo. Ao Prof. Dr. Rogério de Oliveira Rodrigues, por todo o suporte tanto no grupo, quanto durante a graduação, por acreditar em mim e me orientar durante esses três anos.

Minha gratidão ao Prof. Dr. Emerson Alexandro Bolandim, por todo conhecimento transmitido e grande ajuda para realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a Unesp, pela estrutura e ensino de qualidade oferecido durante toda minha trajetória como graduanda.

RESUMO

Acerca de vantagens como aumento de rigidez, capacidade resistente e ductilidade, o uso de elementos mistos de aço e concreto tem crescido em edifícios de múltiplos pavimentos, sendo muito comum o emprego de pilares mistos tubulares contínuos, incluindo os de seção circular, neste tipo de construção. O objetivo deste trabalho é analisar numericamente a ligação simples, por meio *single plate*, entre um pilar tubular de aço de seção circular preenchido com concreto e duas vigas em perfil I adjacentes, sob carregamento típico de edifícios de múltiplos pavimentos, com foco na influência do *pinching* na introdução de carga. A análise numérica foi realizada por meio do *software ABAQUS*, o qual se fundamenta no Método dos Elementos Finitos. Para a definição dos materiais foram utilizados modelos que levam em conta as propriedades de plastificação e encruamento para o aço e plastificação com dano para o concreto, além das não-linearidades geométricas e de contato. Foram analisados três modelos diferentes com base no ensaio experimental de Shakir-Khalil (1993), variando entre eles a espessura da chapa e a presença de imperfeições geométricas locais na parede do tubo. Os resultados numéricos não apresentaram boa concordância com as curvas de deslizamento do ensaio experimental, mas os modelos apresentaram o comportamento mecânico compatível com o esperado. O estudo verificou o *pinching* e sua influência na resistência do concreto, apresentando ganho na compressão e perda na tração. A espessura das chapas influenciou significativamente os resultados, enquanto a imperfeição geométrica não teve impacto relevante.

Palavras-chave: pilar misto tubular; seção circular; ligação simples; *single plate*; *pinching*; introdução de carga, análise numérica.

ABSTRACT

Regarding advantages such as increased stiffness, load-carrying capacity, and ductility, the use of composite steel and concrete elements has increased in multi-story buildings, it is common to incorporate continuous composite tubular columns, including those with circular sections, in such constructions. This study aims to numerically analyze the simple connection, through the use of a single plate, between a circular steel tubular column filled with concrete and two adjacent I-section beams, under typical multi-story building loads, focusing on the influence of pinching on load introduction. The numerical analysis was conducted using the ABAQUS software, based on the Finite Element Method. The material definitions included models considering steel's yielding and strain hardening properties, concrete's plasticity with damage, as well as geometric and contact nonlinearities. Three different models were analyzed based on the experimental test by Shakir-Khalil (1993), varying the plate thickness and the presence of local geometric imperfections in the tube wall. Numerical results did not fully match the experimental load-slip curves, but the models exhibited mechanical behavior consistent with expectations. The study examined pinching and its impact on concrete strength, showing gains in compression and losses in tension. Plate thickness significantly influenced the results, while geometric imperfections had minimal impact.

Keywords: composite tubular column; circular section; simple connection; single plate; pinching; load introduction; numerical analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma das etapas da análise numérica.	16
Figura 2: Curva momento-rotação para ligações entre viga e pilar.	20
Figura 3: Curvas momento-rotação para ligações simples, totalmente restritas e parcialmente restritas.	21
Figura 4: Modelo de ligação com chapa soldada na parede do tubo.	23
Figura 5: Dimensões do tubo de aço.	24
Figura 6: Dimensões do núcleo de concreto.	25
Figura 7: Dimensões da chapa.	25
Figura 8: Dimensões do modelo montado.	26
Figura 9: Elemento C3D8R: a) nós e faces (vista 3D) e b) ponto de integração (vista 2D).	27
Figura 10: Discretização do tubo de aço: a) técnica e b) malha final.	28
Figura 11: Discretização do núcleo de concreto: a) técnica e b) malha final.	29
Figura 12: Discretização das chapas de ligação: a) técnica e b) malha final.	30
Figura 13: Condições de contorno do problema.	32
Figura 14: Diagrama tensão x deformação multilinear.	33
Figura 15: Resposta do concreto sob carregamento uniaxial de tração (a) e compressão (b)	36
Figura 16: Condições de contorno e carregamento para análise de flambagem do tubo.	38
Figura 17: Modo de flambagem considerado como imperfeição geométrica inicial.	39
Figura 18: Geometria do protótipo D1A (a) longitudinal e (b) no plano.	40
Figura 19: Arranjo experimental.	41
Figura 20: Relação carregamento-deslizamento do protótipo D1a.	42
Figura 21: Condição do protótipo D1a após o ensaio.	42
Figura 22: Resultados da análise numérica do experimento de Shakir-Khalil (1993): gráfico carga-deslizamento.	43
Figura 23: Gráficos Reação x Deslocamento Aplicado dos modelos numéricos.	44
Figura 24: Configuração deformada dos modelos, vista frontal.	45
Figura 25: Aproximação da configuração deformada dos modelos na região superior da ligação, corte no plano Z.	46

Figura 26: Aproximação da configuração deformada dos modelos na região inferior da ligação, corte no plano Z.	47
Figura 27: Distribuição das tensões de von Mises dos modelos.	48
Figura 28: CSLIP2 no elemento 2740 para os modelos.	50
Figura 29: Gráfico reação-deslizamento modelos do projeto e de referência.	51
Figura 30: Tensão principal mínima no núcleo de concreto dos modelos numéricos.	53
Figura 31: Análise resultados para modelo C10: a) Tensão S11; b) Deformações plásticas equivalentes do núcleo de concreto; c) Dano na compressão; d) Dano na tração; e) Deformações plásticas equivalentes no tubo de aço; e f) Status do contato.	54
Figura 32: Análise resultados para modelo C12SI: a) Tensão S11; b) Deformações plásticas equivalentes do núcleo de concreto; c) Dano na compressão; d) Dano na tração; e) Deformações plásticas equivalentes no tubo de aço; e f) Status do contato.	55
Figura 33: Análise resultados para modelo C12CI: a) Tensão S11; b) Deformações plásticas equivalentes do núcleo de concreto; c) Dano na compressão; d) Dano na tração; e) Deformações plásticas equivalentes no tubo de aço; e f) Status do contato.	56
Figura 34: Características geométricas do tubo.	61
Figura 35: Características geométricas da chapa.	62
Figura 36: Geometria final do modelo.	63
Figura 37: Gráfico Tensão real x Deformação plástica do aço do modelo de acordo com Eals (1999)	64
Figura 38: Discretização da geometria dos modelos.	65
Figura 39: Condições de contorno e carregamento utilizadas no modelo.	65
Figura 40: Tensões equivalentes de von Mises para os elementos: a) C3D8, b) C3D8R, c) C3D20 d) C3D20R, e) S4, f) S4R.	66
Figura 41: Tensões equivalentes de von Mises para os elementos: a) C3D8, b) C3D8R, c) C3D20 d) C3D20R, e) S4, f) S4R.	67
Figura 42: Deformação plástica máxima no plano principal para os elementos: a) C3D8,	68
Figura 43: Curva tensão de engenharia-deformação de engenharia para o aço estrutural do tubo.	70

Figura 44: Curva tensão real-deformação real para o aço estrutural do tubo.	71
Figura 45: Curva tensão real-deformação plástica para o aço estrutural do tubo.	71
Figura 46: Curva tensão de engenharia-deformação de engenharia para o núcleo de concreto frente à compressão.	74
Figura 47: curva tensão de real-deformação plástica para o núcleo de concreto frente à compressão.	74
Figura 48: Curva de dano para o núcleo de concreto frente à compressão.	75
Figura 49: Curva tensão de engenharia-deformação de engenharia para o núcleo de concreto frente à tração.	78
Figura 50: Curva tensão de real-deformação plástica para o núcleo de concreto frente à tração.	78
Figura 51: Curva de dano para o núcleo de concreto frente à tração.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dimensões da geometria do modelo.	26
Tabela 2: Dimensões do modelo montado.	27
Tabela 3: Dados para construção do gráfico tensão x deformação da Figura 37.	64
Tabela 4: Característica mecânicas do aço estrutural do tubo (Johansson, 2003). ..	70
Tabela 5: Tensões e deformações para aço estrutural do tubo (Earls, 1999).	70
Tabela 6: Característica mecânicas do núcleo de concreto (EN2-1-1:2004).	71
Tabela 7: Comportamento à compressão do concreto (Carreira e Chu, 1885) e dano (Yu <i>et. al</i> , 2010).	72
Tabela 8: Comportamento à tração do concreto (Carreira e Chu, 1885) e dano (Yu <i>et. al</i> , 2010).	75

SUMÁRIO

1 Introdução	14
1.1 GENERALIDADES	14
1.2 OBJETIVO	15
1.3 JUSTIFICATIVA	15
1.4 METODOLOGIA	16
2 Revisão Bibliográfica	17
2.1 PILARES MISTOS TUBULARES DE SEÇÃO CIRCULAR	17
2.2 LIGAÇÕES SIMPLES (<i>SHEAR CONNECTIONS</i>)	19
3 Análise Numérica	22
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	24
3.3 DISCRETIZAÇÃO DO MODELO	27
3.3.1 Elemento finito	27
3.3.2 Malha de elementos finitos	28
3.4 CONFIGURAÇÕES DO MODELO	30
3.4.1 Condição de contato	30
3.4.2 Soldas tubo-chapa	31
3.4.3 Condições de contorno e carregamento	31
3.5 MODELOS CONSTITUTIVOS E SUPERFÍCIE DE FALHA	33
3.5.1 Aço estrutural	33
3.5.2 Concreto	34
3.5.3 Tensões e deformações	37
3.6 IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS	37
4 Validação do modelo numérico	39
4.1 TRABALHO DE REFERÊNCIA	39
5 Resultados e discussão	43

5.1 ANÁLISE COMPARATIVA	43
5.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO NÚCLEO DE CONCRETO	52
6 Conclusão	57
6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	58
REFERÊNCIAS.....	59
APÊNDICE A – TESTE DE ELEMENTOS FINITOS PARA PROBLEMA DE LIGAÇÃO SIMPLES POR MEIO DE <i>SINGLE PLATE</i>	61
APÊNDICE B – VALORES E CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA OS MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS.....	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

Desde os anos 2000, as estruturas tubulares de aço têm gradualmente conquistado espaço no setor da construção civil no Brasil. Do ponto de vista estrutural, a utilização de tubos apresenta vantagens em relação aos perfis abertos tradicionais, como I, H e U, mesmo quando possuem massas e dimensões semelhantes. Essa superioridade é atribuída ao fato de os perfis tubulares possuírem um raio de giração aproximadamente 40% maior, o que os torna elementos eficazes para resistir a esforços axiais e de flexão. Por essa razão, são amplamente empregados como pilares (Araújo *et al.*, 2016).

Adicionalmente, os pilares tubulares de aço podem ser preenchidos com concreto, transformando-se em elementos mistos. Nessa configuração, o aço e o concreto trabalham em conjunto para resistir aos esforços de compressão ou flexão (Queiroz, 2001).

A colaboração entre perfis de aço e o concreto, originando os elementos mistos de aço e concreto, oferece diversos benefícios, como o aumento de rigidez, capacidade resistente e ductilidade, mesmo com seções transversais de tamanho reduzido, além da eliminação da necessidade de fôrmas adicionais durante o processo de construção (Araújo *et al.*, 2016). Diante dessas vantagens, o uso dos elementos mistos de aço e concreto tem crescido, a rigor, em edifícios de múltiplos pavimentos, devido aos elevados níveis de carregamento gravitacional. Nesse tipo de construção, é muito comum o emprego de pilares mistos tubulares contínuos, incluindo os de seção circular preenchidos com concreto. Para as situações em que esses pilares são secundários, ou seja, não participam do sistema estabilizante, é consenso a utilização de ligações simples ao cisalhamento (*shear connections*) entre esses elementos e as vigas secundárias, geralmente em perfil I. Uma das maneiras de executar esse tipo de ligação é por meio de chapas soldadas (*single plate*) no tubo de aço e parafusadas ao perfil da viga, transferindo o esforço cortante devido à reação vertical para o pilar.

Com relação à introdução de carga, ou seja, a transferência de forças entre o tubo de aço e o núcleo de concreto do pilar misto, essa deve ser feita levando em conta a resistência ao cisalhamento na interface entre o tubo de aço e o concreto, ou

seja, depende o atrito resistente entre os dois materiais. Caso esse atrito não seja suficiente, a utilização de dispositivos mecânicos para transferência de forças, tal como conectores de cisalhamento ou parafusos de alta resistência, se faz necessária.

As normas brasileiras ABNT NBR 8800:2008 e 16239:2013 estabelecem um procedimento de cálculo para a determinação da resistência da interface, que depende do tipo da seção transversal. No entanto, estudos experimentais e numéricos (Dunberry *et al.*, 1987; Shakir-Khalil, 1992; Shakir-Khalil, 1993; Johansson, 2003; Mollazadeh e Wang, 2014) têm investigado as situações de carregamento em edifícios de múltiplos pavimentos, revelando que, nas regiões de ligação com as vigas, a resistência ao cisalhamento na interface pode ser maior do que a prevista analiticamente. Esse ganho de resistência pode ser atribuído ao chamado efeito de pinçamento (*pinching*), no qual a chapa, quando submetida ao carregamento das vigas, rotaciona e cria regiões de concentração de tensões de compressão no tubo e, conseqüentemente, no concreto, potencializando a resistência, localmente.

Contudo, mesmo com os estudos realizados sobre o comportamento das ligações por *single plate* entre pilares mistos tubulares preenchidos com concreto e vigas secundárias em perfil I, ainda há pouco conhecimento sobre o efeito de pinçamento e a sua real contribuição para fins de introdução de carga no sistema.

1.2 OBJETIVO

Analisar numericamente o comportamento da ligação simples, por meio de *single plate*, entre um pilar tubular circular de aço preenchido com concreto e duas vigas, em perfil I, adjacentes, em uma condição de carregamento que simula um edifício de múltiplos pavimentos, com foco na influência do efeito de pinçamento para fins de introdução de carga.

O objetivo específico refere-se ao desenvolvimento, calibração e validação de um modelo numérico a partir do ensaio experimental de Shakir-Khalil (1993).

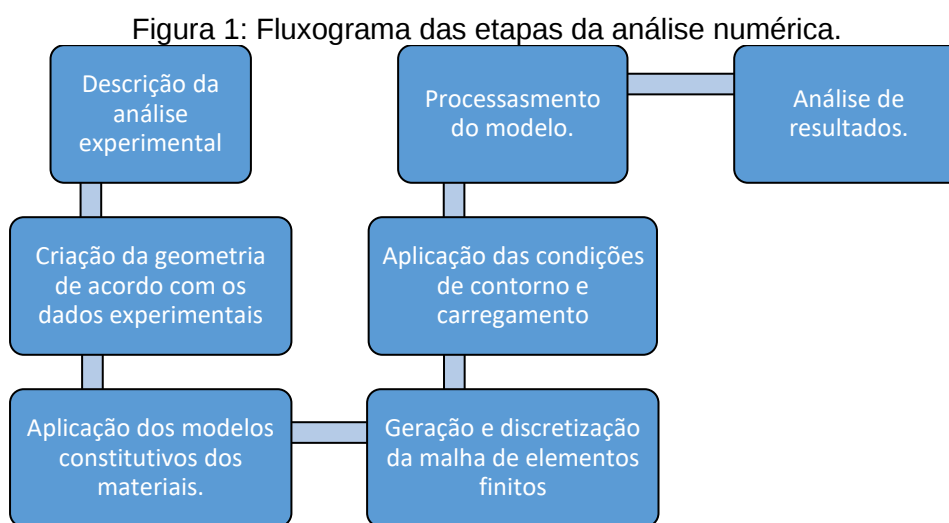
1.3 JUSTIFICATIVA

A busca por sistemas construtivos cada vez mais efetivos tem se tornado fundamental para a viabilização de edifícios de múltiplos pavimentos, dentre os sistemas existentes, o misto de aço e concreto tem mostrado o seu valor, entretanto,

quando o assunto são os mecanismos de introdução de carga em pilares mistos tubulares circulares, percebe-se que pouco se avançou nesse sentido (Wardeneier *et al.*, 2010; Voth, 2010; Mollazadeh, Wang, 2014). Dessa forma, o propósito deste estudo é averiguar o desconfinamento do concreto, na região tracionada, e o micro confinamento localizado do concreto (*pinching effect*), na região de compressão, na vizinhança da ligação entre a viga de aço e o pilar misto tubular circular preenchido com concreto, aferindo o efeito desses mecanismos localizados na capacidade resistente à compressão do pilar.

1.4 METODOLOGIA

A principal ferramenta metodológica utilizada para desenvolver o modelo numérico foi o *software ABAQUS*, que se fundamenta no método dos elementos finitos. A metodologia do trabalho se dividirá nas etapas da análise numérica, tal como apresenta o fluxograma ilustrado na Figura 1.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: quadros com fundo azul com escritos em branco seguindo a ordem das etapas da etapa numérica que são: Descrição da análise experimental, criação da geometria de acordo com os dados experimentais, aplicação dos modelos constitutivos dos materiais, geração e discretização da malha de elementos finitos, aplicação das condições de contorno e carregamento, processamento do modelo e análise de resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PILARES MISTOS TUBULARES DE SEÇÃO CIRCULAR

Pilares mistos são elementos estruturais que podem ser solicitados por compressão centrada (pura) ou flexão. Para a situação em que o pilar é puramente comprimido, também se observa a manifestação de momento fletor como resultado das imperfeições geométricas iniciais, referentes aos processos de fabricação dos elementos estruturais. Consequentemente, a combinação das solicitações de flexão (devido às imperfeições) e de compressão, acrescida dos efeitos de segunda ordem que podem ocorrer na estrutura deformada após o carregamento, pode levar a seção transversal à plastificação total, modo de falha comum de um pilar misto submetido à compressão centrada (Queiroz, 2001).

Com relação ao comportamento de pilares tubulares mistos de seção circular submetidos à compressão centrada, esse pode ser dimensionado pelo método simplificado da norma brasileira ABNT NBR 8800 (2008). Como limite de aplicabilidade do método, a norma estabelece que as capacidades resistentes de todos os materiais (aço e concreto) devem ser atingidas respeitando o limite de flambagem local do perfil de aço. Para garantir essa condição, deve-se atender a relação entre diâmetro e espessura (esbeltez) da Equação 1.

$$\frac{D}{T} \leq 0,15 \frac{E}{f_y} \quad (1)$$

Sendo respeitado o limite de esbeltez local (1), a força axial resistente de cálculo é determinada de acordo com a Equação 2.

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

onde $N_{pl,Rd}$ é a força axial de compressão resistente de cálculo da seção transversal à plastificação total e χ o fator de redução associado à resistência a compressão, levando em conta a instabilidade por flexão. Esses parâmetros podem ser calculados de acordo com as Equações 3 e 4, respectivamente.

$$N_{pl,Rd} = f_{yd} \cdot A_a + 0,95f_{cd} \cdot A_c + f_{ys} \cdot A_s \quad (3)$$

onde os parâmetros f_{yd} , f_{cd} , f_{ys} correspondem, respectivamente, aos valores de cálculo da resistência ao escoamento do aço, resistência do concreto e resistência ao escoamento da armadura de aço (quando houver) e, de maneira análoga, A_a , A_c ,

A_s correspondem às áreas das seções transversais de aço, de concreto e da armadura de aço. Com relação ao fator redução χ , este é estabelecido em função do índice de esbeltez reduzido:

$$\chi = \begin{cases} 0,658^{\lambda_{0,m}^2}, & \lambda_{0,m} \leq 1,5 \\ \frac{0,877}{\lambda_{0,m}^2}, & \lambda_{0,m} > 1,5 \end{cases} \quad (4)$$

O cálculo do índice de esbeltez reduzido se dá por meio da Equação 5.

$$\lambda_{0,m} = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_e}} \quad (5)$$

sendo $N_{pl,R}$ a força de compressão resistente axial característica, calculada em função das resistências f_y e f_{ck} , conforme Equação 6, e N_e a força axial de flambagem elástica, dada pela Equação 7.

$$N_{pl,R} = f_y \cdot A_a + 0,95 f_{ck} \cdot A_c \quad (6)$$

$$N_e = \frac{\pi^2 \cdot (EI)_e}{(KL)^2} \quad (7)$$

onde KL é o comprimento de flambagem do pilar e $(EI)_e$ é a rigidez efetiva à flexão da seção transversal mista, calculada de acordo com a Equação (8).

$$(EI)_e = E_a \cdot I_a + 0,6 E_c \cdot I_c + E_s \cdot I_s \quad (8)$$

sendo I_a , I_c e I_s os momentos de inércias da seção transversal do perfil de aço, do concreto não fissurado e da armadura do concreto, respectivamente, e E_a , E_c e E_s os módulos de elasticidade na devida ordem.

Além da resistência à compressão, outro fator deve ser levado em conta no comportamento de pilares mistos tubulares de seção circular. Esse fator refere-se à análise de esforços cortantes transferidos pelas vigas por meio de ligações. Essas ligações ocasionam variações localizadas nos esforços solicitantes em algumas regiões, que são denominadas regiões de introdução de carga, onde é fundamental evitar o escorregamento significativo entre o perfil de aço e o núcleo de concreto, ou seja, deve ocorrer uma transferência de esforços de cisalhamento entre os dois elementos (ABNT NBR 8800:2008).

Conforme a norma brasileira, é possível definir o comportamento das regiões de introdução de carga, para tanto, calculando-se um comprimento fictício de introdução de carga (L_{int}), de acordo com a Equação 9.

$$L_{int} \leq \begin{cases} 2a \\ \frac{1}{3} d_{int} \end{cases} \quad (9)$$

sendo a a menor dimensão do pilar e d_{int} a distância entre pontos de introdução de carga para um mesmo pilar (pilar contínuo). É importante evidenciar que o comprimento de introdução de carga pode ser considerado tanto acima quanto abaixo da ligação com a viga e, dentro dessa região, a parcela de carga que deve ser transferida do perfil de aço para o concreto é dada pela Equação 10.

$$V_{l,Sd} = V_{Sd} \left(1 - \frac{f_{yd} \cdot A_a}{N_{pl,Rd}} \right) \quad (10)$$

onde V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo na ligação, ou seja, soma das cargas introduzidas pelas vigas e $N_{pl,Rd}$ é dado conforme equação (3).

Adicionalmente, tem-se que, para a transferência da parcela de carga ser garantida apenas pela interação entre os dois materiais, deve-se respeitar a resistência ao cisalhamento na superfície de contato entre eles de acordo com as Equações 11 e 12.

$$V_{l,Sd} \leq V_{l,Rd} \quad (11)$$

$$V_{l,Rd} = \tau_{Rd} \cdot L_{int} \cdot \pi(D - 2t) \quad (12)$$

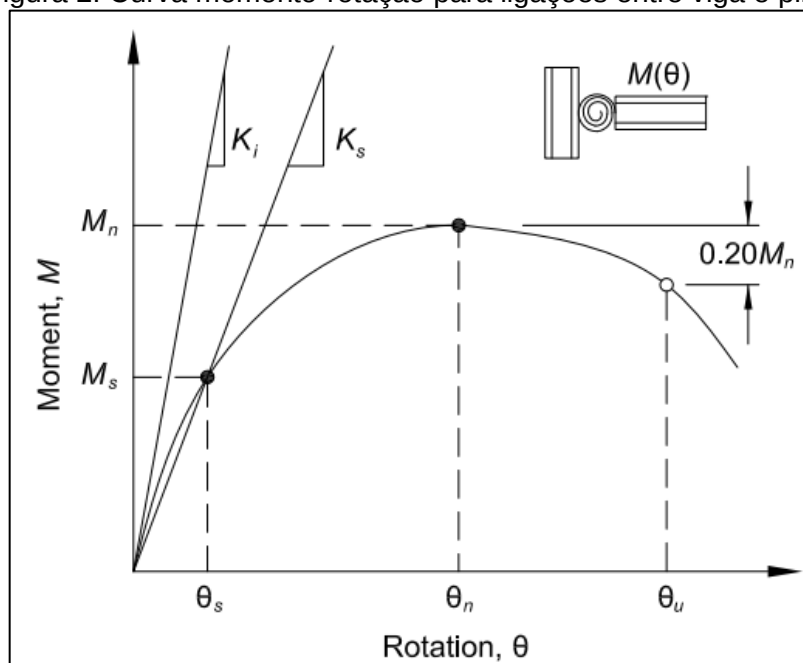
com τ_{Rd} sendo a tensão de cisalhamento resistente de cálculo igual a 0,55 (Tabela P.1 da ABNT NBR 8800:2008) para seção tubular circular preenchida com concreto, D o diâmetro do tubo e t sua respectiva espessura.

Na condição de $V_{l,Sd} > V_{l,Rd}$, torna-se necessário o uso de conectores de cisalhamento para garantir a transferência de esforços.

2.2 LIGAÇÕES SIMPLES (SHEAR CONNECTIONS)

O comportamento de uma ligação pode ser descrito de acordo com sua curva momento-rotação, $M-\Theta$. A configuração dessa curva é mostrada na Figura 2 e relaciona o momento fletor aplicado à ligação e a rotação relativa que essa apresenta em relação ao pilar (Pereira, 2013).

Figura 2: Curva momento-rotação para ligações entre viga e pilar.



Fonte: ANSI AISC 360-22 (2022).

Legenda: gráfico no qual o eixo Y representa o momento fletor da ligação e o eixo X representa sua rotação. Nele são representadas duas retas com inclinações diferentes (K_i e K_s) e uma curva, em formato de parábola, com três pontos marcados, sendo o primeiro o ponto (M_s e θ_s) marcado no local onde a inclinada K_s encontra com a curva, o segundo é o ponto (M_n e θ_n), corresponde ao pico da curva e o terceiro é o ponto ($0,2M_n$ e θ_u), correspondente ao local da curva abaixo do pico em 20%.

Com base nessa definição, a curva fornece parâmetros que permitem a classificação da ligação em função da sua rigidez, resistência e ductilidade, podendo assim ser considerada como ligações simples (sem restrição à momento), totalmente restritas ou parcialmente restritas. Tais parâmetros são definidos na seção de comentários B3.4 da ANSI AISC 360-22 (2022) de modo que:

1) O parâmetro de rigidez leva em consideração a manifestação do comportamento não linear da ligação, portanto é estabelecido conforme sua rigidez secante, K_s . Tal parâmetro é expresso na Equação 13.

$$K_s = \frac{M_s}{\theta_s} \quad (13)$$

Sendo M_s e θ_s o momento e a rotação para cargas de serviço.

2) O parâmetro de resistência é estabelecido função do momento máximo que a ligação pode resistir, M_n , que representa o pico da curva. A rotação correspondente a esse esforço recebe a nomenclatura θ_n .

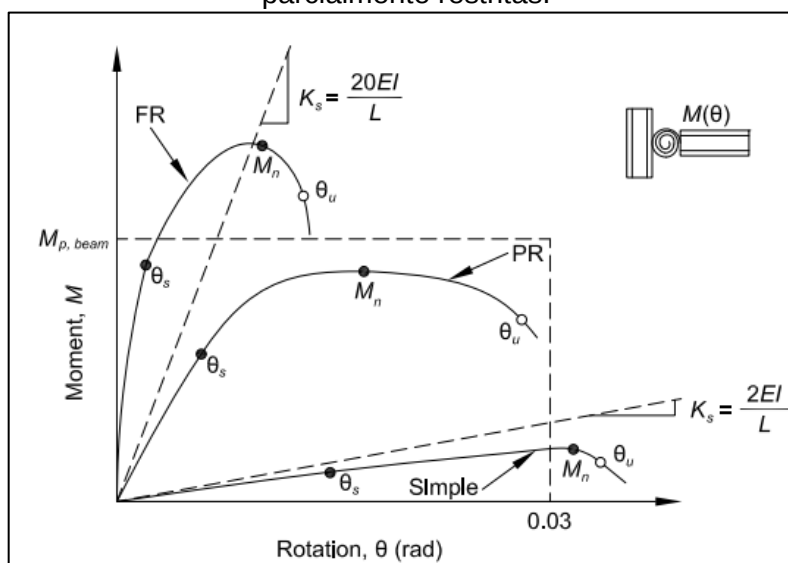
3) O parâmetro de ductilidade é dado conforme capacidade de deformação plástica da ligação durante a rotação, podendo alcançar uma capacidade de θ_u ,

correspondente a um momento de até $0,8M_n$ ou à rotação de $0,03 \text{ rad}$, o que for atingido primeiro.

Ainda no escopo dos comentários da norma americana, com base nos parâmetros definidos, tem-se que as ligações simples são aquelas cuja rigidez é limitada pela Equação 14 e cuja resistência é inferior em comparação às outras classificações (total e parcialmente restritas), apresentando o menor valor de M_n . Quanto à ductilidade, são as que apresentam a maior capacidade de deformação mesmo submetidas a menores cargas, ou seja, apresenta uma maior rotação e, conseqüentemente, sua curva é mais inclinada. A figura 3 ilustra o comportamento pelas curvas M- θ dos diferentes tipos de ligação.

$$K_s \cdot \frac{L}{EI} \leq 2 \quad (14)$$

Figura 3: Curvas momento-rotação para ligações simples, totalmente restritas e parcialmente restritas.



Fonte: ANSI AISC 360-22 (2022).

Legenda: gráfico com mesmos eixos da Figura 2, apresenta duas retas inclinadas (K_s) e três curvas, em formato de parábola, com três pontos marcados em cada uma sendo eles (θ_s , M_n e θ_u), as curvas são apresentadas de maneira diferente em termos de suas inclinações.

Adicionalmente, ressalta-se que as ligações simples não são eficientes com relação a transmissão de momentos das vigas para os pilares, com as parcelas sendo insignificantes ou até mesmo nulas. E que, no contexto da análise estrutural, essas conexões são projetadas para permitir uma rotação relativa sem restrições entre os elementos estruturais interligados. (ANSI AISC 360-22, item B3.4).

Desse modo, as ligações simples entre vigas e pilares devem ser flexíveis e dimensionadas apenas para transferência de esforços cortantes de reação. Devem permitir deformações e acomodar a rotação final de uma viga, mas respeitando-se os limites plásticos (ANSI AISC 360-22, item J.1.2).

3 ANÁLISE NUMÉRICA

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

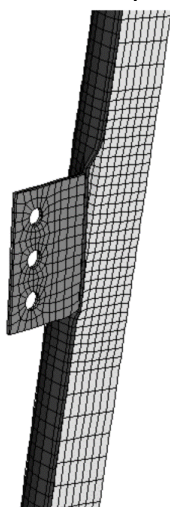
A análise numérica por meio do Método dos Elementos Finitos, principalmente na área de pesquisa, tem ganhado espaço na Engenharia Civil, pois é uma alternativa que permite investigar novos fenômenos de maneira mais rápida e menos custosa em comparação as análises experimentais, fornecendo resultados igualmente confiáveis. Diante disso, existem autores que já vêm tratando de análises numéricas sobre ligações simples entre vigas e pilares tubulares de aço preenchidos com concreto.

Johansson (2003) conduziu um estudo numérico utilizando o *software ABAQUS*, com o objetivo de analisar mais detalhadamente as tensões em torno de ligações simples, através de *single plate*, entre vigas e pilares tubulares metálicos de seção circular preenchidos com concreto de alto desempenho.

Nesse estudo, uma das simulações que o autor realizou consistiu em um modelo de ligação no qual as chapas estavam soldadas ao tubo metálico. O modelo foi submetido a um carregamento semelhante à situação real de um edifício de múltiplos pavimentos, incluindo carga axial na coluna (representando os pavimentos superiores) e carga excêntrica nas chapas (representando as vigas do pavimento em questão). A estrutura já deformada é apresentada na Figura 4.

Com os resultados das simulações numéricas, Johansson (2003) concluiu que a ligação com as chapas presas ao tubo de aço possui uma alta capacidade de transferência de cisalhamento para o núcleo de concreto, podendo ser atribuída, principalmente, pelos efeitos de pinçamento e contração do tubo advindos da rotação da ligação. Adicionalmente, seus resultados alcançaram uma resistência de aderência significativamente maior em comparação com os valores de projetos fornecidos pelo EN4-1-1:2004, apontando que a norma pode ser conservadora quanto ao dimensionamento de ligações por *single plate*.

Figura 4: Modelo de ligação com chapa soldada na parede do tubo.



Fonte: Johansson (2003).

Legenda: Quarto de tubo modelado por método dos elementos finitos representado com uma divisão em pequenos quadrados (malha), a figura possui uma chapa, com furos para parafusos, grudada ao tubo que rotacionou e puxou o aço do tubo deformando-o.

Mais adiante, também utilizando o *ABAQUS*, Mollazadeh e Wang (2014) realizaram um estudo sobre pilares tubulares quadrados preenchidos com concreto. O objetivo foi reexaminar o mecanismo de introdução de carga nessas estruturas através de ligações de cisalhamento (*single plate*) entre o pilar e as vigas.

No estudo, os autores propõem um novo mecanismo de introdução de carga, considerando a ocorrência do fenômeno no comprimento acima e dentro da região de ligação, diferentemente dos mecanismos convencionais (que consideram o comprimento abaixo da ligação). Para validar essa abordagem, eles desenvolveram modelos numéricos permitindo uma investigação mais aprofundada do novo mecanismo proposto.

Com base nesses modelos, Mollazadeh e Wang (2014) realizaram uma análise paramétrica para examinar o impacto da introdução de carga em função da variação dos seguintes parâmetros: dimensões da seção transversal do pilar, espessura do tubo de aço, comprimento da ligação, comprimento acima da ligação, comprimento abaixo da ligação e tensão de cisalhamento máxima.

Os resultados da análise permitiram os autores concluir que o comprimento do pilar abaixo da ligação pouco influencia na resistência total da coluna, de modo que o cisalhamento entre o aço e o núcleo do concreto pode alcançar a máxima resistência ao longo do comprimento da coluna acima e dentro da ligação. Eles também evidenciam que a transferência de carga abaixo da ligação ocorre apenas em casos

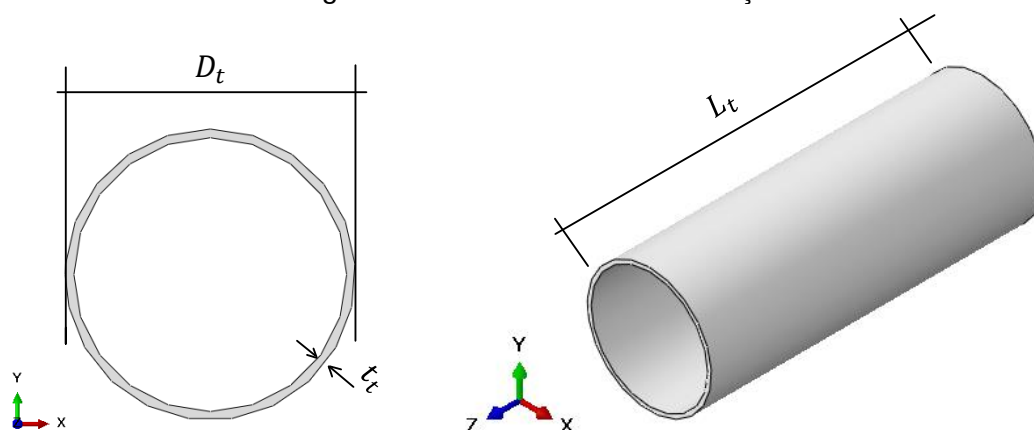
que o concreto não tenha atingido sua resistência plástica total, o que, consequentemente, reduz a força na seção de aço.

3.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Foram considerados 3 modelos numéricos simulando pilares tubulares de aço de seção circular preenchidos com concreto e com chapas de ligação presas à parede do tubo de aço, a fim de comparação de comportamentos e resultados. A diferença entre eles é dada pela espessura das chapas e pela presença ou não de imperfeições geométricas.

A geometria dos modelos pode ser descrita pelas imagens e tabelas mostradas a seguir, sendo chapa a única parte com duas variações.

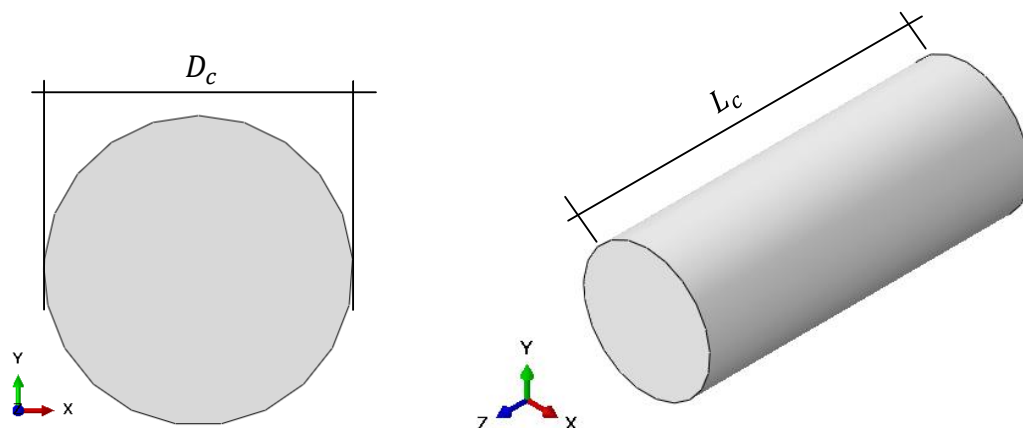
Figura 5: Dimensões do tubo de aço.



Fonte: Autoria Própria.

Legenda: Imagem frontal do tubo com as marcações D_t e t_t indicando respectivamente seu diâmetro externo e a espessura da parede e, ao lado, imagem em perspectiva do tubo com a marcação L_t indicando seu comprimento. Nas duas imagens acompanha o sistema de coordenadas, 2D na primeira (X, Y) e 3D na segunda (X, Y, Z).

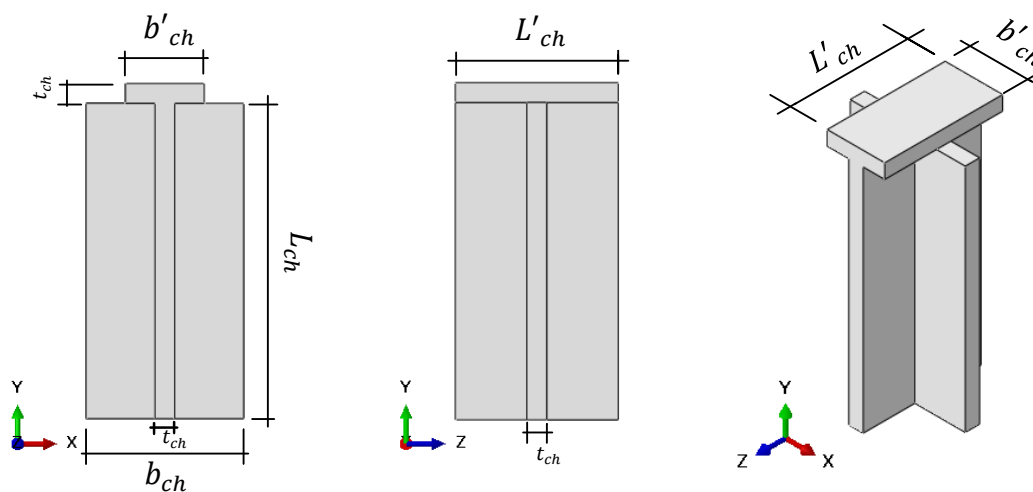
Figura 6: Dimensões do núcleo de concreto.



Fonte: Autoria Própria.

Legenda: Imagem frontal do núcleo de concreto com a marcação D_c indicando seu diâmetro externo e, ao lado, imagem em perspectiva do núcleo com a marcação L_c indicando seu comprimento. Nas duas imagens acompanha o sistema de coordenadas, 2D na primeira (X, Y) e 3D na segunda (X, Y, Z).

Figura 7: Dimensões da chapa.



Fonte: Autoria própria

Legenda: Imagem frontal da chapa de ligação com as marcações b_{ch} , t_{ch} , L_{ch} e b'_{ch} indicando, respectivamente sua largura, espessura, comprimento e largura da placa de apoio; ao lado, imagem lateral da chapa com as marcações L'_{ch} e t_{ch} indicando respectivamente, o comprimento da placa de apoio e a espessura; e ainda ao lado, imagem em perspectiva com marcações já mencionadas para ajudar no entendimento das direções. Nas três imagens acompanha o sistema de coordenadas, 2D na primeira (X, Y) e na segunda (Y, Z) e 3D na terceira (X, Y, Z).

Tabela 1: Dimensões da geometria do modelo.

Tubo de aço			Núcleo de concreto	
D_t (mm)	t_t (mm)	L_t (mm)	D_c (mm)	L_c (mm)
168	5	450	158	400

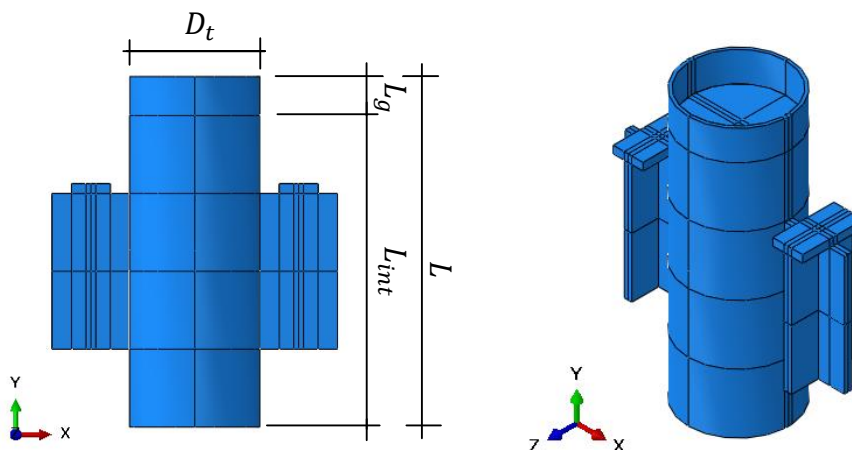
Chapa de ligação 1				
t_{ch} (mm)	b_{ch} (mm)	L_{ch} (mm)	b'_{ch} (mm)	L'_{ch} (mm)
10	100	200	50	100

Chapa de ligação 2				
t_{ch} (mm)	b_{ch} (mm)	L_{ch} (mm)	b'_{ch} (mm)	L'_{ch} (mm)
12,5	100	200	50	102,5

Fonte: Autoria própria.

Quando a disposição e dimensões das partes no conjunto final do modelo, essa encontra-se na Figura 8 e Tabela 2.

Figura 8: Dimensões do modelo montado.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: Imagem frontal do conjunto do modelo em azul, com as marcações D_t , L_g , L_{int} e L indicando o diâmetro externo do tubo, o comprimento do espaço vazio, o comprimento da interface entre o aço e o concreto e o comprimento total do modelo, ao lado, imagem, também em azul, em perspectiva do modelo com o núcleo de concreto dentro do tubo de aço e um espaço vazio, as chapas se localizam uma em cada lado do tubo na região média da interface. Nas duas imagens acompanha o sistema de coordenadas, 2D na primeira (X, Y) e 3D na segunda (X, Y, Z).

Tabela 2: Dimensões do modelo montado.

L_g (mm)	L_{int} (mm)	L (mm)
50	400	450

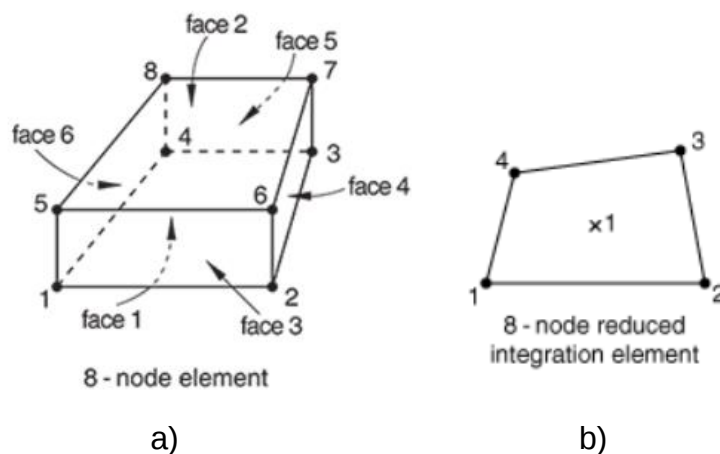
Fonte: Autoria própria

3.3 DISCRETIZAÇÃO DO MODELO

3.3.1 Elemento finito

Para a discretização da geometria do modelo, baseando-se no teste de elementos apresentado no Apêndice A, utilizou-se o elemento C3D8R (Figura 9), um elemento tridimensional composto por oito nós, um em cada extremidade e três graus de liberdade, translações nos eixos X, Y e Z, em cada um deles. Adicionalmente, é um elemento de integração reduzida, ou seja, possui apenas um ponto de integração para o qual as respostas são calculadas e extrapoladas em seu entorno (*Abaqus Analysis User's Manual*, 2014).

Figura 9: Elemento C3D8R: a) nós e faces (vista 3D) e b) ponto de integração (vista 2D).



Fonte: Abaqus Analysis User's Manual (2014).

Legenda: a) paralelepípedo com todas as arestas e faces enumeradas (de 1 a 6), para as faces além dos números há o destaque por meio de setas, abaixo da figura escrito "8 – node element". c) quadrilátero com as arestas enumeradas (de 1 a 4) e um "x" desenhado no centro indicado pelo número 1, abaixo da figura escrito "8 – node reduced integration element"

3.3.2 Malha de elementos finitos

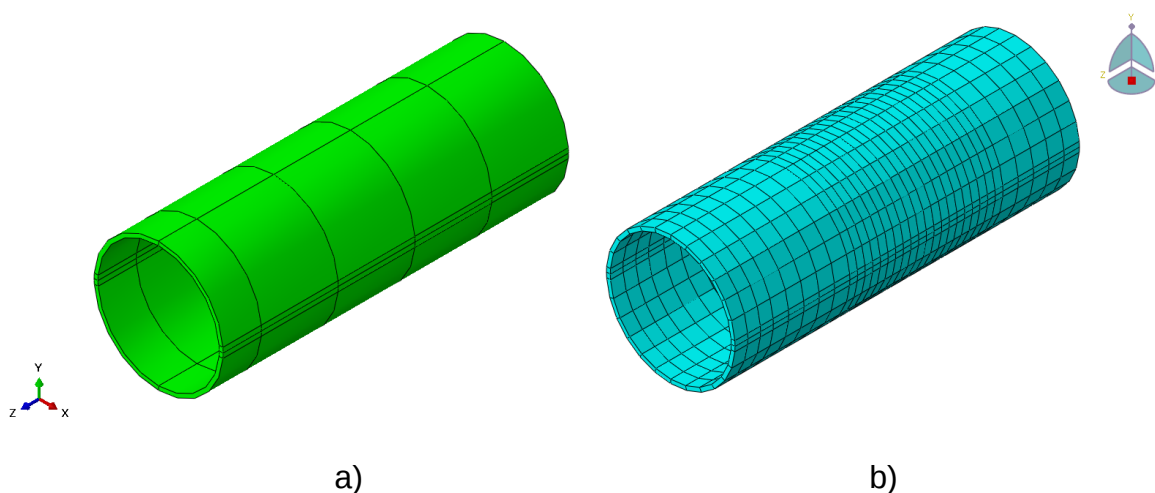
Refere-se a etapa de geração da malha de elementos finitos, na qual a geometria é subdividida em função do tamanho dos elementos. Utilizou-se a técnica *structured* para todas as partes do modelo, que gera a malha de maneira regular obtendo melhor precisão nas respostas, sobre o formato do elemento. Também por apresentar melhor regularidade, optou-se pela utilização de hexaedros.

Cada parte do modelo contou com um refinamento, ou seja, divisão diferente de acordo com a necessidade, conforme descrito nos tópicos a seguir.

- TUBO DE AÇO:

Utilizou-se um tamanho médio dos elementos (*global size*) de 20 mm para as regiões fora da ligação, na região da ligação o refinamento foi um pouco melhor (elementos menores), por conta de ser a região de maior concentração de tensões, de modo que o tamanho radial continuou como 20 mm, mas o longitudinal foi reduzido pela metade. A discretização é apresentada na Figura 10.

Figura 10: Discretização do tubo de aço: a) técnica e b) malha final.



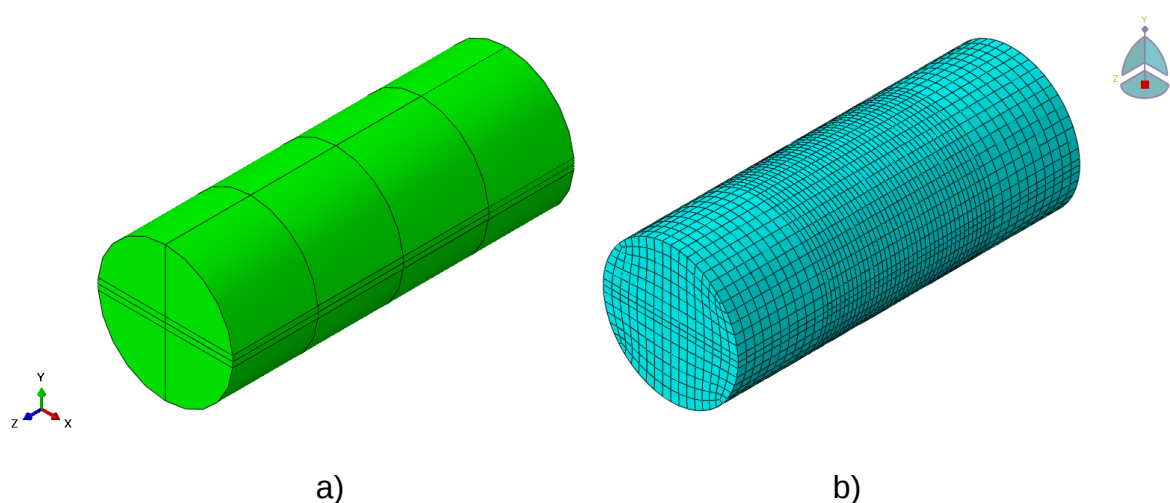
Fonte: Autoria própria.

Legenda: a) casca cilíndrica verde com linhas marcando as divisões necessárias para o modelo. b) casca cilíndrica ciano dividido em pequenos quadrados, representando a malha de elementos finitos. Na extremidade esquerda da Imagem a) há um sistema de coordenadas (X, Y, Z).

- NÚCLEO DE CONCRETO:

Para a discretização do concreto, seguiu-se o mesmo padrão do tubo de aço, com a região de ligação mais refinada, entretanto, por se tratar do elemento menos rígidos dentre os que estão em contato (aço e concreto), teve a malha mais refinada como um todo, com o tamanho geral de 10 mm e da região de ligação 5 mm. A discretização é mostrada na Figura 11.

Figura 11: Discretização do núcleo de concreto: a) técnica e b) malha final.



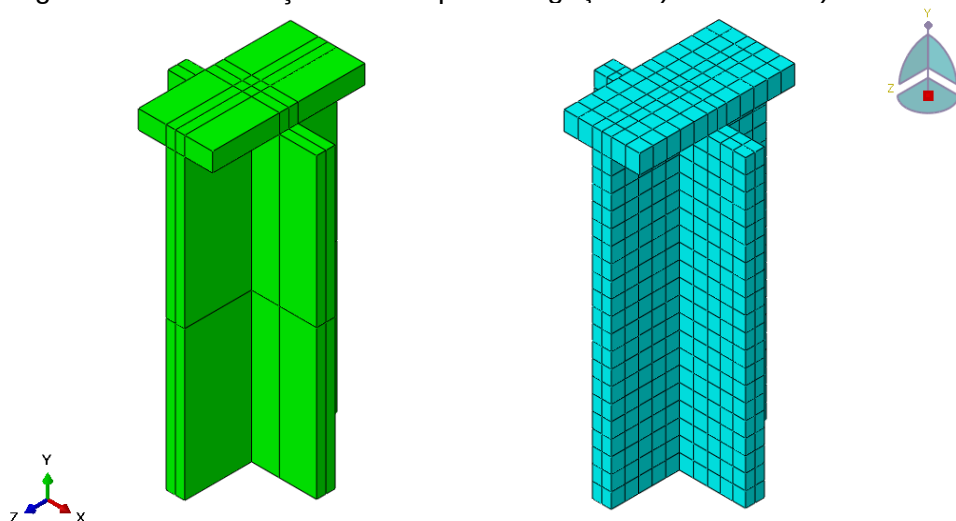
Fonte: Autoria própria.

Legenda: a) cilindro verde maciço com linhas marcando as divisões necessárias para o modelo. b) cilindro ciano maciço dividido em pequenos quadrados, representando a malha de elementos finitos. Na extremidade esquerda da Imagem a) há um sistema de coordenadas (X, Y, Z).

-CHAPAS DE LIGAÇÃO:

Optou-se por um tamanho padrão de elementos para as chapas, compatibilizando com o tamanho da região de ligação do tubo, que é onde elas estão inseridas. Desse modo, utilizou-se um tamanho geral de 10mm. A discretização é mostrada na Figura 12.

Figura 12: Discretização das chapas de ligação: a) técnica e b) malha final.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: a) peça estrutural verde 3D em forma de x, composta por duas colunas verticais paralelas conectadas e uma seção horizontal no topo, formando um "T". b) peça estrutural ciano 3D em forma de x dividida em pequenos quadrados, representando a malha de elementos finitos, composta por duas colunas verticais paralelas conectadas e uma seção horizontal no topo, formando um "T". Na extremidade esquerda da Imagem a) há um sistema de coordenadas (X, Y, Z).

3.4 CONFIGURAÇÕES DO MODELO

3.4.1 Condição de contato

O contato entre o tubo de aço e o núcleo de concreto foi simulado utilizando uma interação baseada em superfície com deslizamento finito e suavização de superfícies (*surface smoothing*) disponível no *software*. Segundo o *Abaqus Analysis User's Manual* (2014) essa interação envolve a definição de um par de contato, especificando quais superfícies estão envolvidas: uma controla o comportamento (*master surface*) e a outra se adapta e deforma conforme as condições de movimento (*slave surface*). Neste contexto, com base na rigidez de cada material (aço mais rígido, concreto menos rígido), o tubo pode ser considerado a superfície *master*, enquanto o concreto atua como superfície *slave*.

Ainda, para assegurar uma representação mais realista do contato, torna-se necessário configurar algumas propriedades. No comportamento normal das duas superfícies, adotou-se a condição de contato rígido (*hard-contact pressure-overclosure*), conforme definido pelo *ABAQUS*, onde a pressão de contato (p) é transmitida entre as superfícies quando estão em contato e reduzida a zero quando

separadas. Quanto ao comportamento tangencial, foi utilizado o modelo de atrito de Coulomb, que estabelece uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a pressão de contato dada pela Equação 15, sendo μ o coeficiente de atrito ajustável para representar as características específicas do contato entre o aço e o concreto (*Abaqus Analysis User's Manual*, 2014).

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (15)$$

Para o modelo do projeto, considerou-se um coeficiente de atrito de 0,5, de acordo com modelagens de Johansson (2003) que atingiram resultados satisfatórios.

3.4.2 Soldas tubo-chapa

Para simular as soldas entre as chapas e o tubo foi utilizada uma restrição do tipo *tie* entre as superfícies do tubo e da chapa que estão em contato. Nesse tipo de restrição, as superfícies atuam de maneira conjunta, como se fossem uma só, compartilhando os mesmos movimentos de rotação e de translação.

Assim como na condição de contato, define-se uma superfície *master* e uma superfície *slave*. Neste caso, como ambos os elementos possuem a mesma rigidez por serem do mesmo material, a escolha foi baseada na estabilidade das partes. O tubo foi considerado a superfície *master*, enquanto as chapas foram designadas como superfície *slave*. Em caso de sobreposição, os nós da superfície *slave* são eliminados para evitar duplicação e garantir a precisão da simulação (*Abaqus Analysis User's Manual*, 2014).

3.4.3 Condições de contorno e carregamento

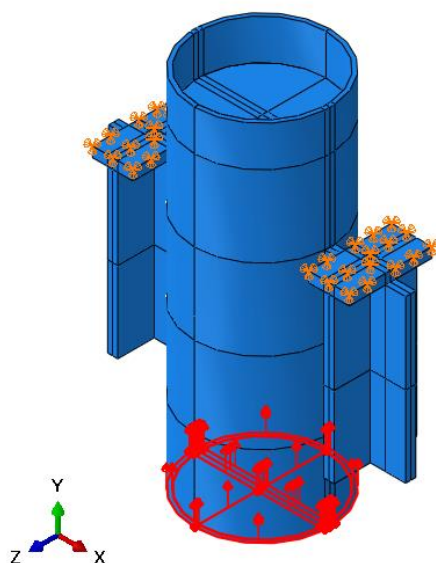
A superfície da extremidade inferior do núcleo de concreto juntamente com o tubo de aço foi restrita à rotação em todos os eixos X, Y e Z. Quanto ao movimento de translação, os movimentos nas direções laterais foram restritos (eixos X e Z), e o movimento na direção longitudinal foi liberado (eixo Y). A extremidade inferior, tanto do núcleo de concreto quanto do tubo de aço, não apresentou restrições de graus de liberdade, permanecendo livres.

Adicionalmente, a fim de simular o arranjo experimental do item 4 deste trabalho, restringiu-se a superfície de apoio das chapas (região retangular) à rotação

no plano (eixo Y) e liberou-se as rotações fora do plano (eixos X e Z). Quanto à translação, o movimento foi restrito em todas as direções (X, Y e Z).

Com relação ao carregamento, a fim de obter um menor custo computacional, optou-se por aplicar um deslocamento prescrito na superfície inferior do tudo e do concreto ao invés de aplicar o carregamento. O valor de deslocamento aplicado foi suficiente para superar a carga resistida experimentalmente, totalizando 5,24 mm, correspondente a 20 vezes o valor necessário para alcançar o valor de 800 kN (carga próxima da experimental) para uma relação linear de tensão x deformação. Esse valor foi extrapolado justamente pelo problema considerar a relação não linear do diagrama tensão-deformação. A Figura 13, abaixo, apresenta as condições de contorno do problema.

Figura 13: Condições de contorno do problema.



Fonte: Autoria própria.

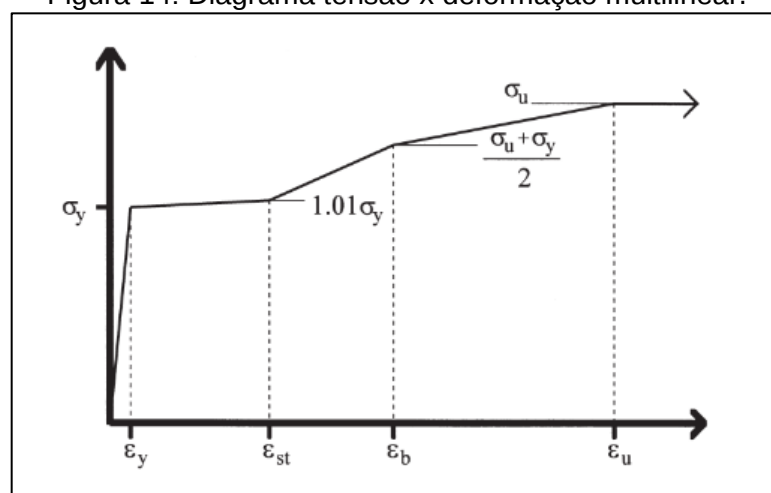
Legenda: estrutura azul, em perspectiva, do modelo com o núcleo de concreto dentro do tubo de aço e um espaço vazio, as chapas se localizam uma em cada lado do tubo na região média da interface. A extremidade inferior do elemento aparece destacada em vermelho com setas apontadas para cima simulando o carregamento. As superfícies de apoio presente nas chapas aparecem com os símbolos dos apoios. No canto inferior esquerdo, apresenta-se o sistema de coordenadas (X, Y e Z).

3.5 MODELOS CONSTITUTIVOS E SUPERFÍCIE DE FALHA

3.5.1 Aço estrutural

Para o aço do perfil do projeto considera-se o comportamento elasto-plástico com encruamento isotrópico uniaxial utilizado por Earls (1999), cujo diagrama tensão-deformação ($\sigma \times \varepsilon$) é multilinear (Figura 14) e apresenta o comportamento elástico por meio de uma região definida pelo módulo de Young (E), tendo como limite a tensão de escoamento (f_y) e a respectiva deformação (ε_y). Com relação ao comportamento plástico, o diagrama apresenta três regiões diferentes, cujas tensões limites são em função das tensões de escoamento e de ruptura (f_u), sendo essa o limite final, e suas respectivas deformações em função de ε_y .

Figura 14: Diagrama tensão x deformação multilinear.



Fonte: Earls (1999).

Legenda: gráfico com o eixo vertical sendo representado pela tensão do material e o eixo horizontal pela deformação, sua primeira parte é descrita por uma região de comportamento linear até alcançar a tensão de escoamento, em seguida, apresenta outra região linear até alcançar 1,01 dessa mesma tensão, a próxima região linear cresce uma tensão que representa a média entre a tensão de escoamento e de ruptura e, a última região, também linear cresce até alcançar a tensão de ruptura.

As tensões de escoamento (f_y) e ruptura (f_u) e o módulo de elasticidade longitudinal (E) adotados para o modelo numérico deste trabalho são referentes aos adotados por Johansson (2003) tendo seus valores respectivos de 318 MPa, 488 MPa e 208 GPa.

Adicionalmente a isso, como critério de falha, considerou-se o de von Mises, que relaciona as energias de deformação causadas pelas tensões normais e de cisalhamento com a energia de deformação causada pela tensão de escoamento.

3.5.2 Concreto

O comportamento do concreto no interior da coluna pode ser descrito de acordo com os modelos constitutivos de Carreira e Chu (1985) para compressão e de acordo com o modelo de Carreira e Chu (1986) para tração.

Com relação ao comportamento frente à compressão, os autores propõem o uso de uma equação (Equação 16) que permite expressar a curva tensão-deformação ($\sigma \times \varepsilon$) do concreto.

$$f_c = f'_c \frac{\beta(\varepsilon_c/\varepsilon'_c)}{\beta-1+(\varepsilon_c/\varepsilon'_c)^\beta} \quad (16)$$

Os parâmetros da curva são dados com base no ensaio de um cilindro padrão de 150 x 300 mm, sendo f'_c e ε'_c , respectivamente, a tensão máxima de compressão e a deformação máxima correspondente. Quanto ao parâmetro adimensional β , uma das maneiras de determiná-lo é em função apenas da tensão máxima de compressão, de acordo com a Equação 17.

$$\beta = \left(\frac{f'_c}{32,4} \right)^3 + 1,55 \quad (17)$$

Para a determinação de f'_c e ε'_c optou-se por utilizar o procedimento da norma europeia EN2-1-1:2004. Desse modo, os parâmetros são expressos as Equações 18 e 19.

$$f'_c = f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (18)$$

$$\varepsilon'_c = \varepsilon_{c1} = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 0,0028 \quad (19)$$

Com relação ao comportamento frente à tração, os autores propõem o uso do mesmo modelo de equação utilizada para compressão (Equação 20) que permite expressar a curva tensão-deformação ($\sigma \times \varepsilon$) do concreto, porém levando em conta os parâmetros de tração.

$$f_t = f'_t \frac{\beta(\varepsilon_t/\varepsilon'_t)}{\beta-1+(\varepsilon_t/\varepsilon'_t)^\beta} \quad (20)$$

sendo f'_t e ε'_t , respectivamente, a tensão máxima de tração e a deformação máxima correspondente. Para determinar estes parâmetros, também se optou por utilizar o

procedimento da norma europeia EN2-1-1:2004. Desse modo, f'_t e ε'_t são expressos nas Equações 21 e 22.

$$f'_t = f_{ctm} = 0,3f_{ck}^{(2/3)} \quad (21)$$

$$\varepsilon'_t = \varepsilon_t = \frac{f_{ctm}}{E_{cm}} \quad (22)$$

onde E_{cm} é o módulo de elasticidade secante do concreto, dado pela Equação 23.

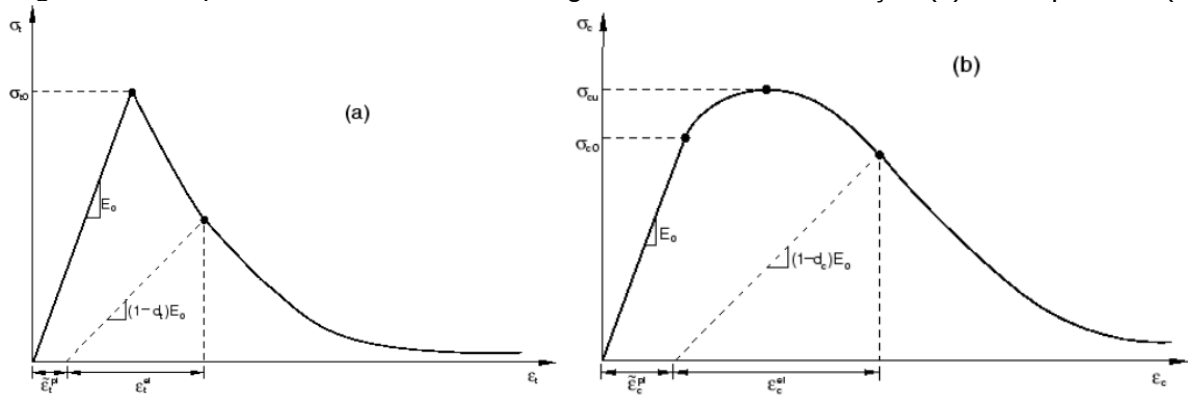
$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad (23)$$

Com relação ao parâmetro β , Carreira e Chu (1986) sugerem que pode ser vantajoso adotar o mesmo valor calculado para compressão. Os autores argumentam acerca da igual relevância dos diagramas tensão x deformação tanto para compressão quanto para tração, e que os dados disponíveis para tração são consideravelmente escassos, especialmente em casos que o concreto já foi fissurado.

Cabe comentar nessa seção que a resistência característica do concreto (correspondente ao ensaio do cilindro padrão) foi o mesmo adotado por Shakir-Khalil (1993), descrito no item 4.1, com valor de 40,1 MPa.

Para representar ainda mais fielmente o comportamento do concreto, a superfície de falha do material é dada de acordo com o modelo CDP (*Concrete Damaged Plasticity*), proposto por Lubliner *et al.* (1989) e modificado por Lee e Fenves (1998). O modelo está disponível no *ABAQUS* e é definido pelo comportamento plástico do material acrescido da teoria do dano (Figura 15), que considera o esmagamento e a fissuração do concreto quando submetido a carregamentos uniaxiais.

Figura 15: Resposta do concreto sob carregamento uniaxial de tração (a) e compressão (b)



Fonte: Abaqus Analysis User's Manual (2014).

Legenda: A imagem mostra dois gráficos de tensão x deformação do concreto. A curva a) refere-se ao comportamento frente à tração, o gráfico sobe linearmente da origem até a tensão máxima de tração (σ_{to}), seguida por uma descida não linear, ilustrando o comportamento elástico inicial e a redução de rigidez pós-pico, indicando danos no material. Existem duas linhas inclinadas E_0 e $(1 - d_t)E_0$, representam o módulo de elasticidade inicial e sua redução devido a danos na tração, respectivamente. A curva b) refere-se ao comportamento frente à compressão, o gráfico sobe linearmente da origem até a tensão máxima de tração (σ_{to}), seguida por crescimento não linear em forma de parábola até alcançar a tensão de pico (σ_{cu}) e iniciar a descida, ilustrando o comportamento elástico inicial e a redução de rigidez pós-pico, indicando danos no material. Existem duas linhas inclinadas E_0 e $(1 - d_c)E_0$, representam o módulo de elasticidade inicial e sua redução devido a danos na compressão, respectivamente.

Para definir o parâmetro de dano (d) optou-se pela utilização do modelo de Yu *et al.* (2010). Os autores propõem o uso das Equações 24 e 25 para definir o dano para o concreto sob carregamentos uniaxiais de compressão e tração respectivamente.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f'_c} \quad (24)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f'_t} \quad (25)$$

neste contexto, σ_c e σ_t são, respectivamente, as tensões de compressão e tração do concreto ao longo das curvas de comportamento, e f'_c e f'_t são as tensões de pico correspondentes.

Além do dano, é necessário fornecer cinco outros parâmetros de plasticidade do concreto ao ABAQUS para completar o comportamento pelo modelo CDP. Esses parâmetros são calibrados experimentalmente e definem a função da superfície de plastificação, o potencial de plastificação e viscosidade do material. São eles, ângulo de dilatância (ψ), geralmente adotado como 36° ; excentricidade (ε), geralmente adotada como 0,1; relação entre tensão de escoamento biaxial de compressão e tensão de escoamento uniaxial de compressão (f_{b0}/f_{c0}), geralmente adotada com

1,16; fator K_c , geralmente adotado como 0,667, e viscosidade (μ), geralmente adotada com baixos valores, ou até próximos de 0. (Sousa, 2019).

3.5.3 Tensões e deformações

As tensões e deformações dos modelos constitutivos dos materiais são dadas em valores de engenharia (σ_{eng} e ε_{eng}), ou seja, não leva em consideração a variação da geometria do corpo de prova no ensaio. Desse modo, torna-se necessário fazer a conversão para os valores de tensão e deformação verdadeiros (σ_{true} e ε_{true}) pelas equações 26 e 27.

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} (1 + \varepsilon_{eng}) \quad (26)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln (1 + \varepsilon_{eng}) \quad (27)$$

Adicionalmente o *software ABAQUS* trata separadamente as deformações elásticas e plásticas, logo, para esses respectivos trechos os valores são definidos de acordo com as Equações 28 e 29.

$$\varepsilon_{elast} = \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (28)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln (1 + \varepsilon_{eng}) \quad (29)$$

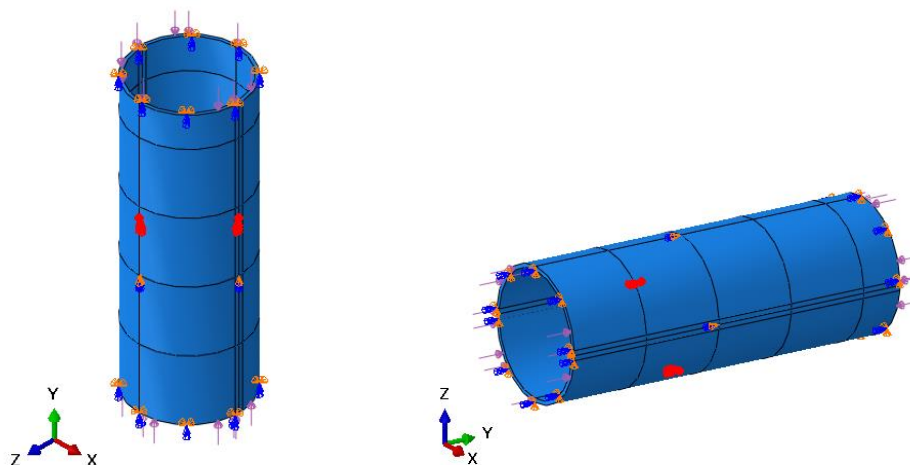
As curvas de tensões e deformações referentes s às formulações apresentadas nos itens 3.5.1 e 3.5.2 e os valores utilizados no projeto, considerando os parâmetros descritos nesta seção, podem ser encontradas no Apêndice B.

3.6 IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS

A fim de tentar melhorar a adesão entre o concreto e o aço e simular uma situação mais real do problema, foram utilizadas imperfeições geométricas locais ao longo da parede do tubo em um dos modelos. Neste sentido, o primeiro passo é realizar uma análise de flambagem (*buckling analysis*) para o elemento de aço, no caso o tubo, e assim definir o modo de instabilidade que mais se adequa ao caso estudado para, então, usado como imperfeição geométrica. Dessa maneira, criou-se um modelo apenas com o tubo e a ele foram atribuídas as mesmas características utilizadas no problema principal, desde as partições até a malha conforme item 3.3.2.

Com relação às condições de contorno, as superfícies inferior e superior foram restritas quanto à translação nos eixos X e Z, e à rotação em torno do eixo Y, permitindo o movimento na direção longitudinal (eixo Y) e rotações em torno dos eixos X e Z. No centro do tubo, as condições foram aplicadas nas arestas de extremidade, nelas foram restritos o movimento na direção longitudinal (eixo Y), a fim de evitar movimento de corpo rígido, e a rotação no mesmo eixo, a fim de evitar a torção. Quanto ao carregamento, aplicou-se compressão em forma de pressão unitária nas superfícies de extremidade do tubo. As condições de contorno e carregamento são apresentadas na Figura 16.

Figura 16: Condições de contorno e carregamento para análise de flambagem do tubo.

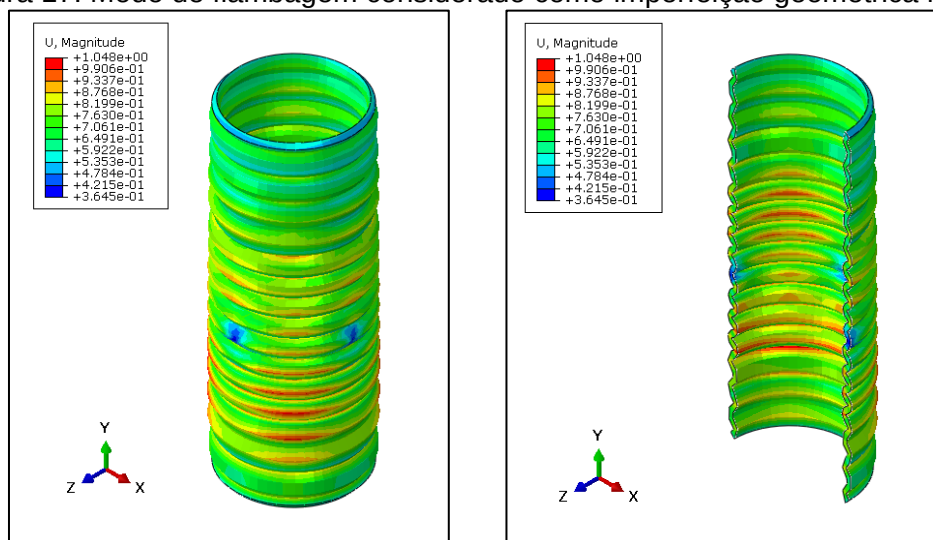


Fonte: Autoria própria.

Legenda: casca cilíndrica azul representando o tubo de aço com linhas marcando as divisões necessárias para o modelo. As extremidades inferior e superior do elemento aparecem com os símbolos de apoio e setas indicando carregamento entrando na estrutura, destacado em vermelho duas arestas representando a parte de trás da geometria. Ao lado, o mesmo elemento, porém em outra perspectiva (deitado). Apresentam-se dois sistemas de coordenadas, um para cada imagem (X, Y e Z).

Após processar o modelo, verificou-se que o primeiro modo de flambagem (Figura 17) é o que melhor atende as condições desejadas, simulando a rugosidade na parede do tubo em forma de imperfeições locais. Desse modo, aplicou-se no modelo principal a imperfeição de $0,01\text{mm}$ ($t/500$), correspondente ao modo selecionado.

Figura 17: Modo de flambagem considerado como imperfeição geométrica inicial.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: casca cilíndrica com espectro de cores arco-íris, e com o corpo cheio de curvas, ao lado, o mesmo corpo, porém partido ao meio. Na extremidade esquerda das duas imagens, apresentam-se os sistemas de coordenadas (X, Y e Z).

4 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

4.1 TRABALHO DE REFERÊNCIA

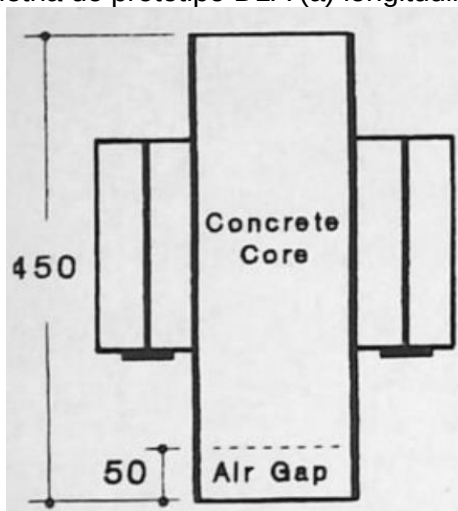
A validação do modelo numérico é dada por meio do trabalho experimental de Shakir-Khalil (1993). O autor realizou ensaios de compressão em diferentes protótipos de tubos de aço preenchidos com concreto, variando entre eles as seções transversais (circulares e quadradas), o uso de conectores de cisalhamento, o uso de chapas de ligações e o uso de placas de reforço laterais.

Os comprimentos dos corpos de prova se mantiveram os mesmos em todos os ensaios, o tubo de aço medindo 450 mm e a interface entre aço e concreto medindo 400 mm, ou seja, restando um espaço sem preenchimento (*air gap*). E sobre os materiais, foram utilizados o aço carbono grau 43 para confecção do tubo e das chapas e concreto com traço 1:1,9:2,4/0,5 (tensão resistente de compressão do cilindro, $f_{c0} = 40,1 \text{ MPa}$) no núcleo.

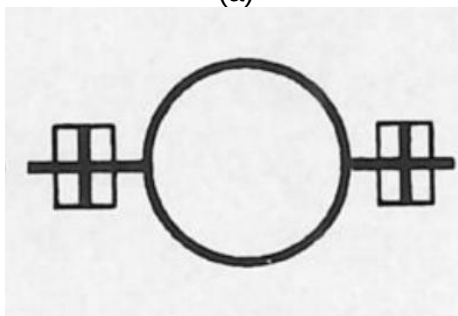
Dentre os protótipos ensaiados, escolheu-se o tubo D1a para se representar numericamente. Suas características consistem em: seção transversal circular 168,3x5 mm, com chapas de ligações enrijecidas (*brackets*) de 200 mm de comprimento anexadas no tubo de aço na região média do comprimento da interface

conforme ilustra a Figura 18, informações a respeito da largura e espessura da chapa e espessuras e larguras dos seus enrijecedores não são fornecidas.

Figura 18: Geometria do protótipo D1A (a) longitudinal e (b) no plano.



(a)



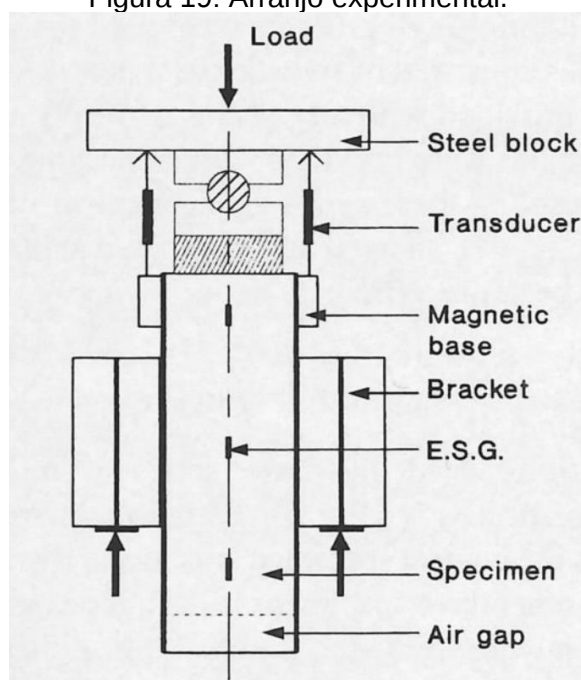
b)

Fonte: Shakir-Khalil (1993).

Legenda: a) Imagem frontal do protótipo, retângulo maior simulando o tubo e dois retângulos menores simulando as chapas grudadas uma de cada lado. Apresenta as medidas do comprimento total do corpo de prova (450 mm) e do espaço vazio (50mm). b) vista superior do protótipo, círculo com bordas finas com retângulos pouco espessos em disposição de cruz com um retângulo maior sobrepondo.

Quanto ao arranjo experimental, o corpo de prova foi apoiado sob as chapas de ligação, por meio de placas largas de seção quadrada, e o carregamento foi aplicado no núcleo de concreto utilizando um sistema de rotulado (Figura 19). Este modelo de vinculação, permite a rotação livre das chapas, simulando o carregamento de vigas.

Figura 19: Arranjo experimental.

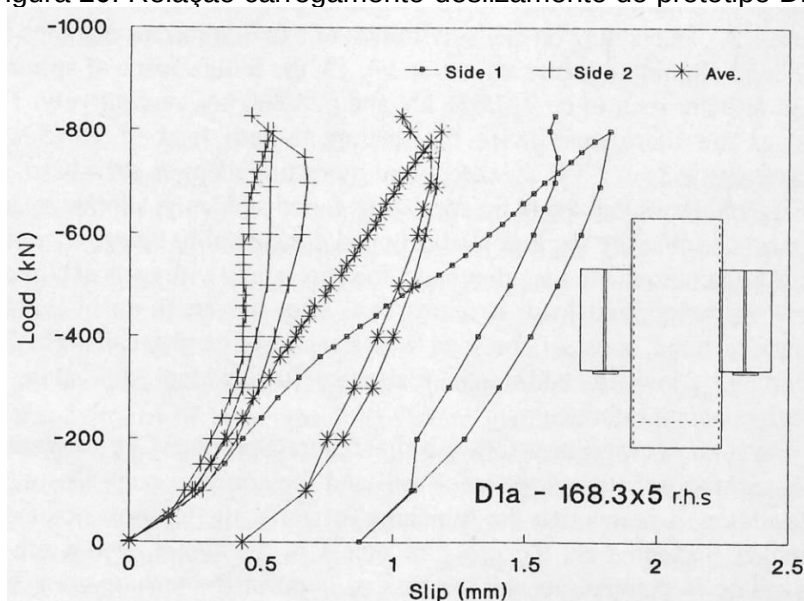


Fonte: Shakir-Khalil (1993).

Legenda: Imagem frontal do protótipo, igual a figura anterior, mas essa apresenta um sistema com uma placa empurrando um pedaço do tubo. Setas indicando cada parte e escrito: *load*, *steel block*, *transducer*, *magnetic base*, *bracket*, *E.S.G.*, *specimen* e *air gap*.

O corpo de prova ensaiado suportou um carregamento de 830 kN e a interface entre o tubo de aço e o concreto alcançou 4 MPa de resistência ao cisalhamento. Com relação ao deslizamento na região em questão, esse ocorreu em pequenas proporções, pois o modo de falha do protótipo foi por deformação excessiva nas chapas de ligação. Na Figura 20, abaixo, encontra-se a relação carregamento-deslizamento e na Figura 21 pode-se observar o protótipo após o ensaio.

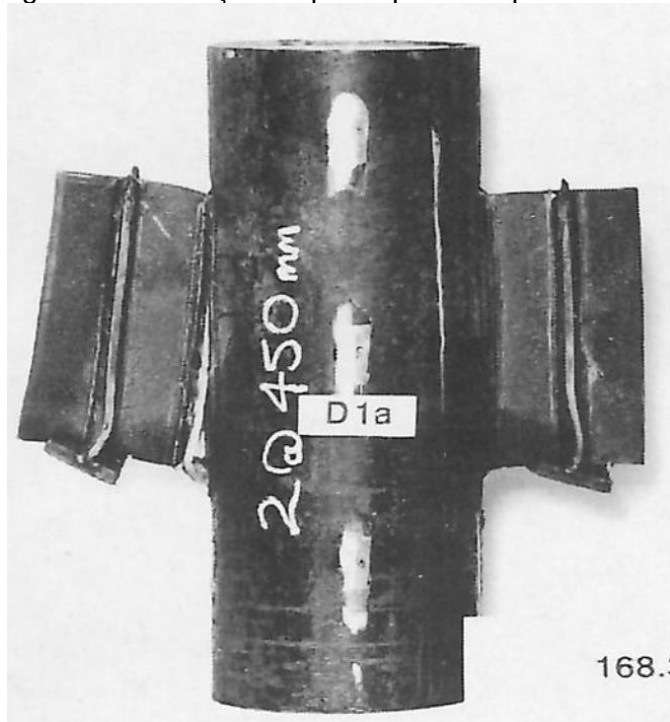
Figura 20: Relação carregamento-deslizamento do protótipo D1a.



Fonte: Shakir-Khalil (1993).

Legenda: gráfico de dispersão que relaciona a carga em kN (eixo Y) com o deslizamento em mm (eixo X). Existem três linhas no gráfico: *Side 1*, com pontos demarcados por bolinhas, *Side 2*, com pontos demarcados por cruzes, e a média *Ave.* demarcada por asteriscos. A carga varia de 0 a 1000 kN e o deslizamento de 0 a 2.5 mm. À direita, há um desenho esquemático de uma seção transversal do protótipo.

Figura 21: Condição do protótipo D1a após o ensaio.

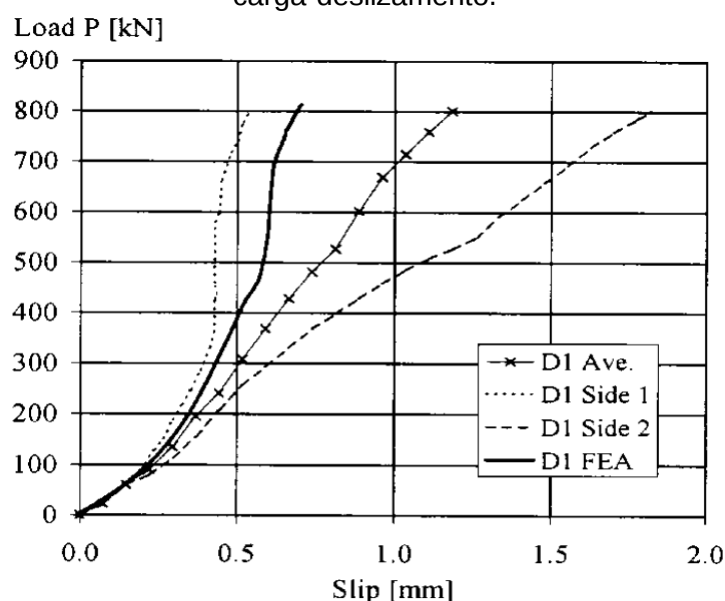


Fonte: Shakir-Khalil (1993)

Legenda: A imagem mostra o protótipo do experimento, identificado pela etiqueta "D1a". O componente é um tubo cilíndrico com chapas enrijecidas dos dois lados. O tubo apresenta a parede do lado esquerdo rompida e as duas chapas deformadas.

Cabe ressaltar que Johansson (2003) também utilizou esse experimento para calibração e validação do seu modelo numérico, e seus resultados apresentaram boa concordância com os resultados apresentados por Shakir-Khalil (1993), conforme Figura 20. Desse modo, seu estudo também foi considerado para ajustar o modelo numérico do trabalho.

Figura 22: Resultados da análise numérica do experimento de Shakir-Khalil (1993): gráfico carga-deslizamento.



Fonte: Johansson (2003).

Legenda: gráfico de dispersão que relaciona a carga em kN (eixo Y) com o deslizamento em mm (eixo X). Existem quatro linhas no gráfico: D1 Side 1, linha pontilhada, D1 Side 2, linha tracejada, e a média D1 Ave. linha com pontos demarcados por cruzes. A carga varia de 0 a 900 kN e o deslizamento de 0 a 2 mm.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

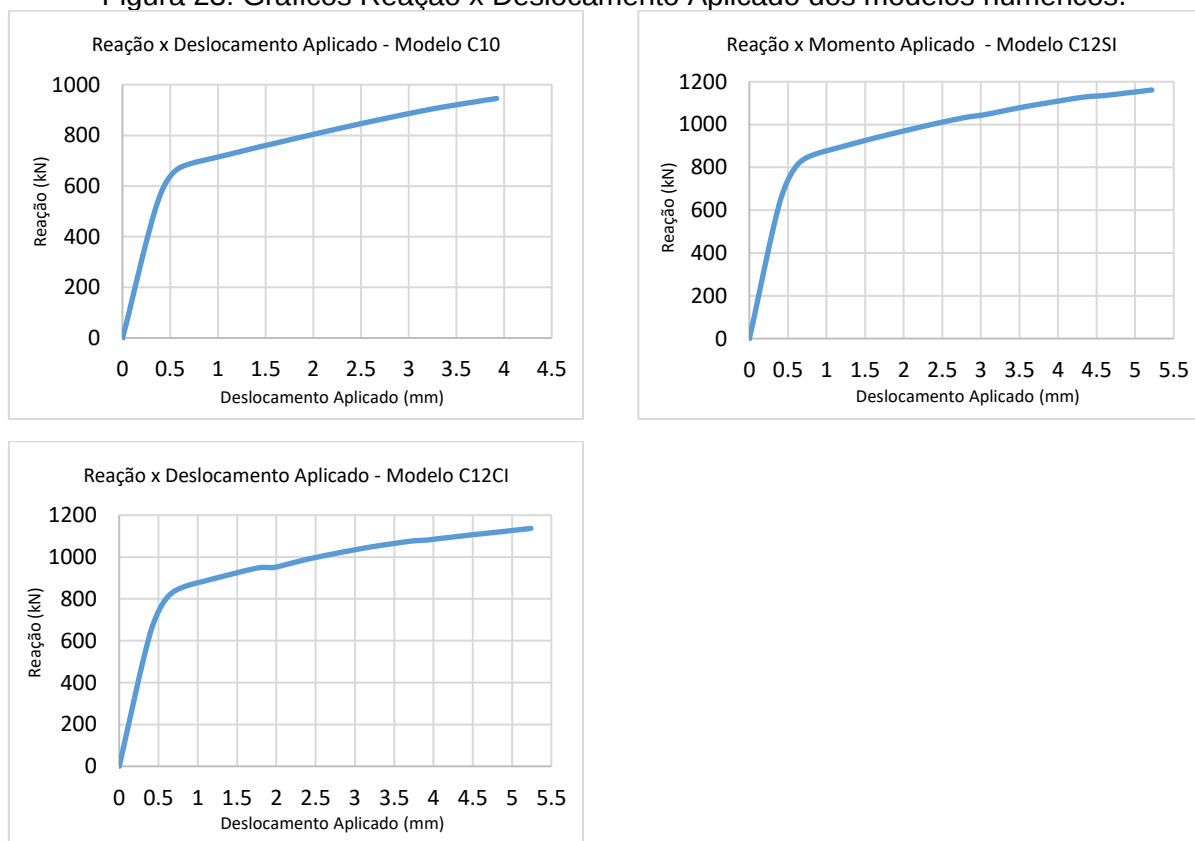
5.1 ANÁLISE COMPARATIVA

Durante o procedimento numérico do trabalho foram processados cerca de 50 modelos diferentes, variando entre eles as características físicas de material, o uso de imperfeições geométricas, as condições de contorno e carregamento, as propriedades de contato e a espessura das chapas, entretanto a grande maioria não gerou resultados significativos. Dentre os resultados analisados, foram selecionados três modelos, com melhor comportamento, para a comparação com os trabalhos de referência.

Com relação aos modelos considerados, todos apresentam as mesmas condições de contato, restrições e condições de contorno e carregamento, conforme descrito no item 3 deste trabalho, os modelos diferem na espessura da chapa de ligação e na presença de imperfeições geométricas, sendo nomeados como modelo C10 (Chapa com 10 mm de espessura) modelo C12SI (Chapa com 12,5 mm de espessura e Sem Imperfeição geométrica) e modelo C12CI (Chapa com 12,5 mm de espessura e Com Imperfeição geométrica).

Prosseguindo com a análise de resultados, em função do carregamento ter sido aplicado em forma de deslocamento, primeiro foi necessário verificar as forças de reação nas placas de apoio (*brackets*) para determinar a magnitude do carregamento aplicado, a fim de garantir a compatibilidade com as unidades dos trabalhos de referência. Desse modo, gerou-se gráficos reação-deslocamento para os dois modelos, apresentados na Figura 23.

Figura 23: Gráficos Reação x Deslocamento Aplicado dos modelos numéricos.



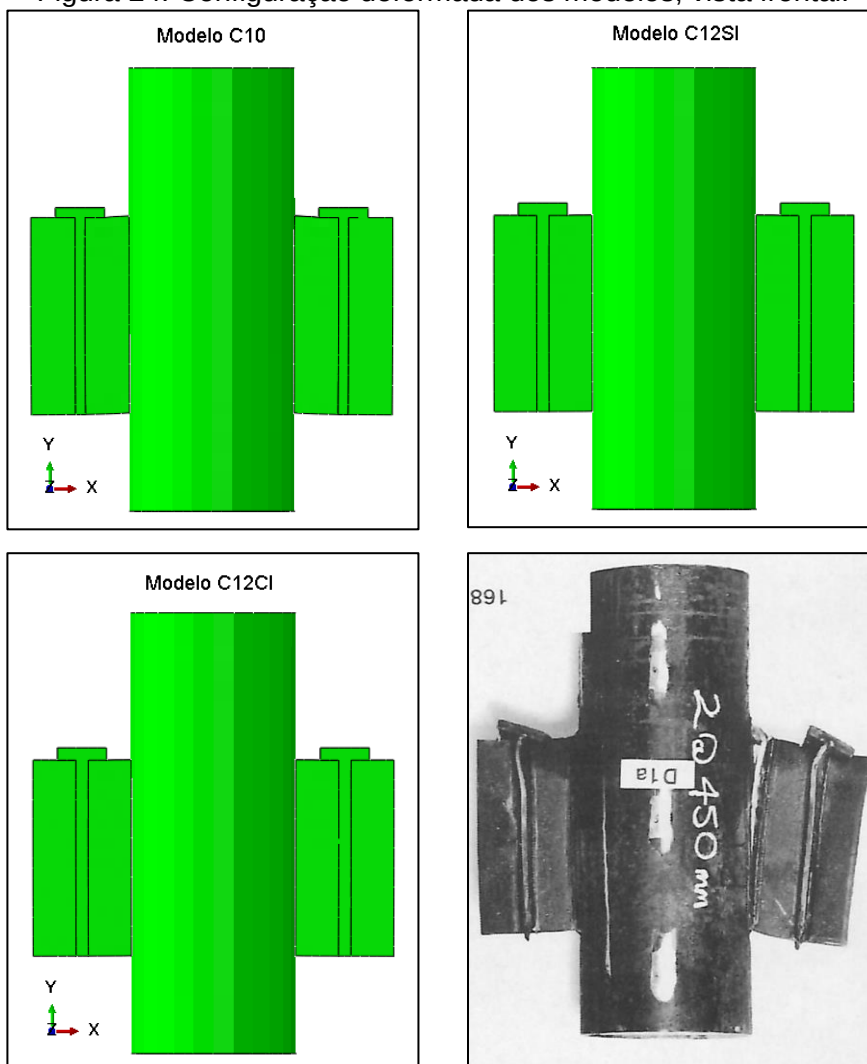
Fonte: Autoria própria.

Pode-se perceber que, para todos os modelos, o carregamento suportado é maior que o previsto experimentalmente de 830kN, também se pode observar que o

modelo C10 não suportou o deslocamento total aplicado de 5,24 mm, chegando próximo de 4mm, e que os modelos com chapas de 12,5 mm de espessura apresentam comportamento similar.

Para fins de análise e comparação, toma-se como base os resultados em que os deslocamentos correspondem ao carregamento experimental, sendo 2,31 mm para o modelo C10 e 0,68 mm para o modelo C12SI e para o modelo C12CI. Dessa forma, apresentam-se na sequência, figuras comparativas da configuração deformada dos modelos numéricos do trabalho e do modelo experimental de Shakir-Khalil (1993).

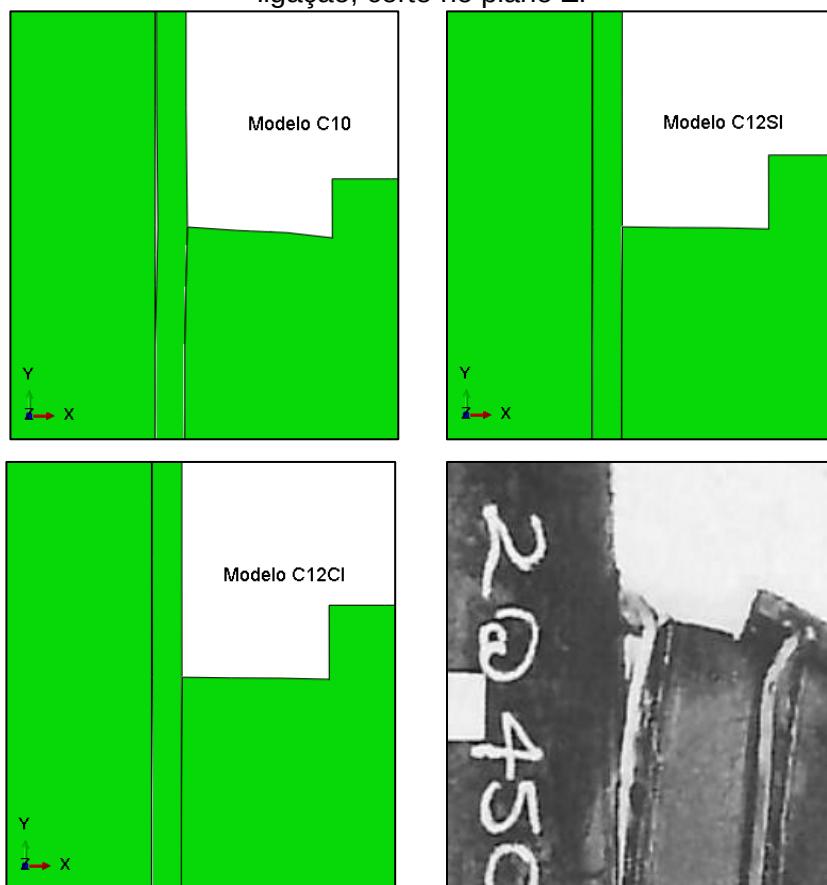
Figura 24: Configuração deformada dos modelos, vista frontal.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: A imagem mostra três modelos estruturais digitais representados em verde e o modelo real descrito na Figura 21. Os modelos digitais são indicados como C10, C12SI e C12CI e consistem em cilindros centrais com chapas enrijecidas nos dois os lados. No canto inferior esquerdo de todos os modelos digitais, há um sistema de coordenadas (X, Y)

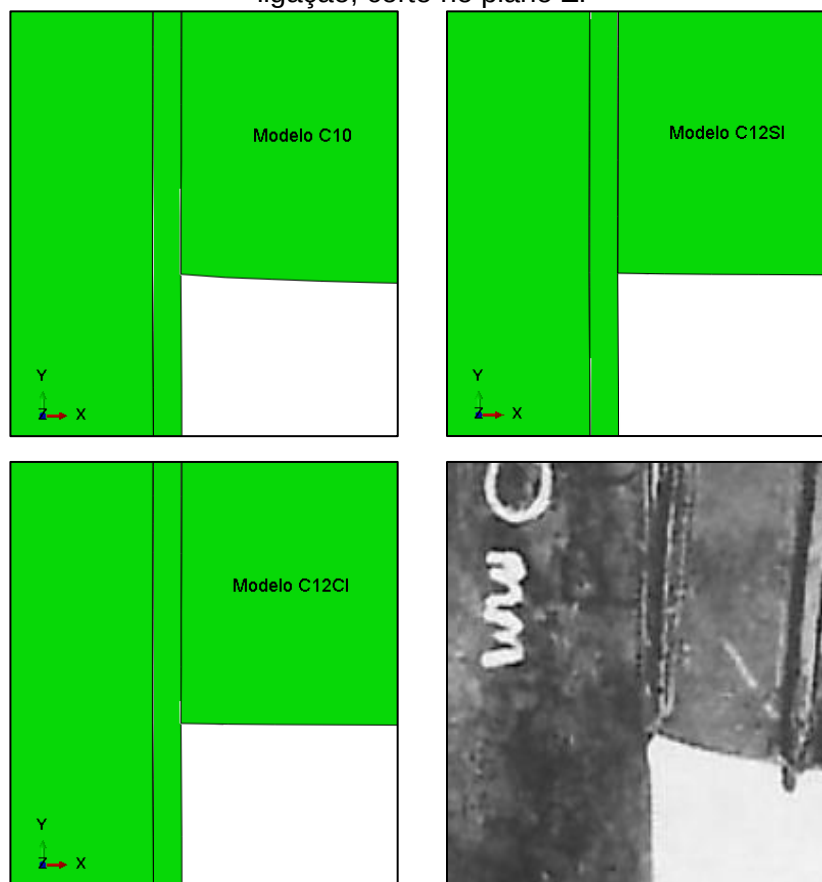
Figura 25: Aproximação da configuração deformada dos modelos na região superior da ligação, corte no plano Z.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: A imagem mostra os mesmos quatro modelos da Figura 24 em corte no plano Z. As imagens estão aproximadas na região superior direita de conexão entre a chapa e o tubo. No canto inferior esquerdo de todos os modelos digitais, há um sistema de coordenadas (X, Y)

Figura 26: Aproximação da configuração deformada dos modelos na região inferior da ligação, corte no plano Z.



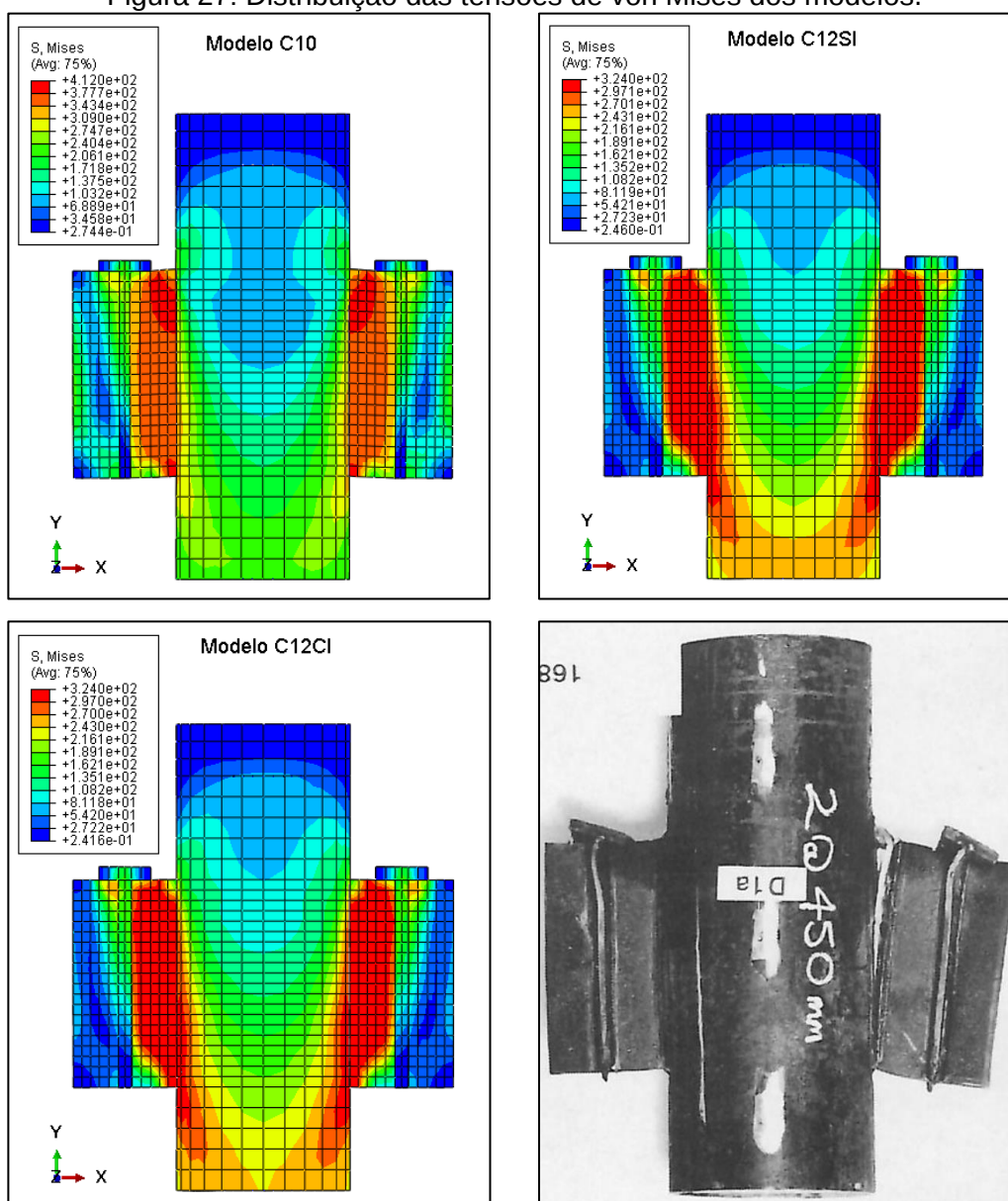
Fonte: Autoria própria.

Legenda: A imagem mostra os mesmos quatro modelos da Figura 24 em corte no plano Z. As imagens estão aproximadas na região inferior direita de conexão entre a chapa e o tubo. No canto inferior esquerdo de todos os modelos digitais, há um sistema de coordenadas (X, Y)

A observação de tais figuras permite verificar que o estado deformado dos modelos numéricos diverge do experimental, de modo que na Figura 24, os modelos C12SI e C12CI não apresentam deformações aparentes, mesmo nas Figuras 25 e 26, aproximadas, enquanto o modelo C10 apresenta uma deformação aparente sutil (Figura 24), e nas figuras aproximadas ela se confirma como sendo a configuração mais semelhante ao corpo de prova experimental.

Quanto às distribuições de tensões equivalentes de von Mises correspondentes à configuração deformada dos modelos, essas são apresentadas na Figura 27. Nas imagens, evidencia-se que, em todos os casos, a tensão limite de escoamento (318,49 MPa) foi atingida, e até ultrapassada, em boa parte da área interna das chapas.

Figura 27: Distribuição das tensões de von Mises dos modelos.



Fonte: Autoria própria.

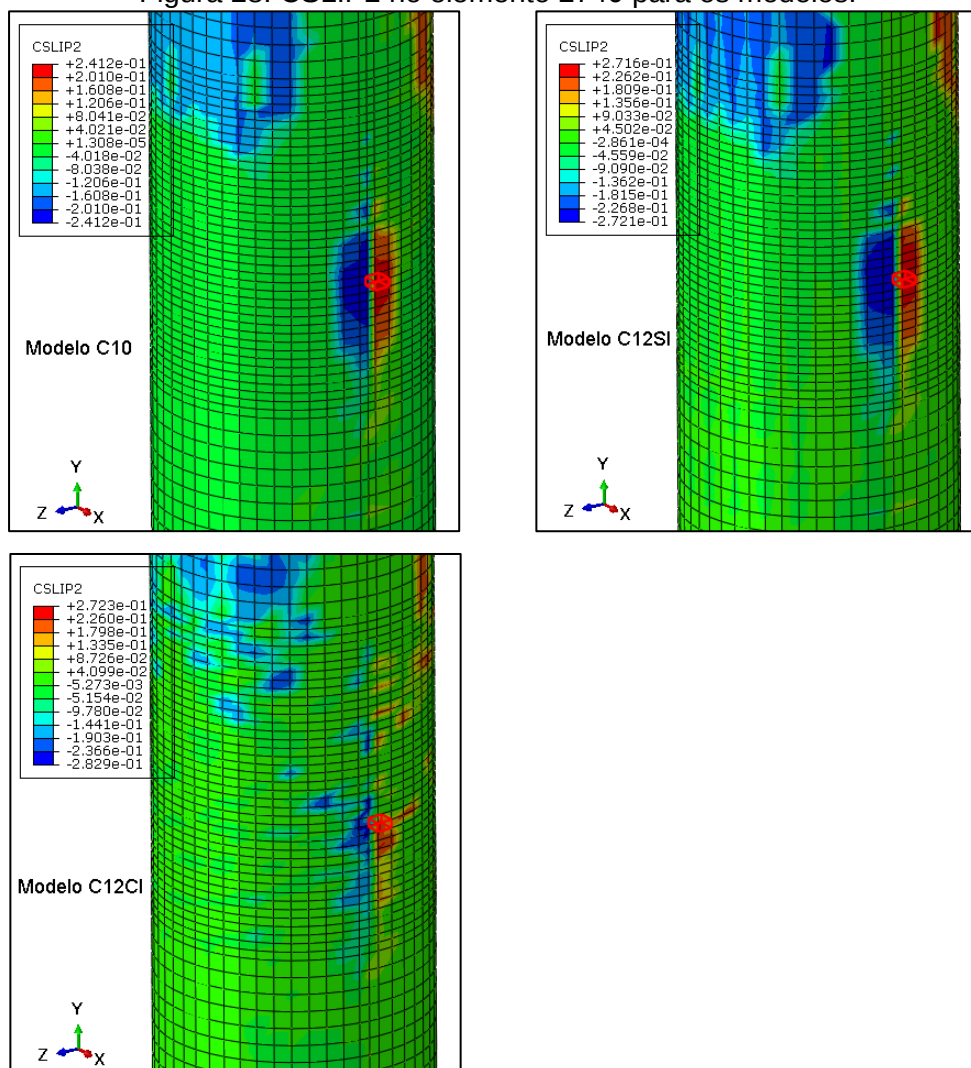
Legenda: A imagem mostra três modelos estruturais digitais representados com espectro de cores arco íris e o modelo real descrito na Figura 21. Os modelos digitais são indicados como C10, C12SI e C12CI e consistem em cilindros centrais com chapas enrijecidas nos dois os lados marcados por pequenos quadrados simulando a malha de elementos finitos. No canto superior esquerdo de todos os modelos digitais há um quadro com título S, Mises e os valores de acordo com as cores. No canto inferior esquerdo de todos os modelos digitais, há um sistema de coordenadas (X, Y).

Adicionalmente, observa-se que os modelos C12SI e C12CI apresentam comportamentos de tensões praticamente idênticos e muito próximos ao limite de escoamento, com um valor de 324 MPa, distantes do ponto de ruptura (521,57 MPa). Isso indica um baixo índice de deformações plásticas, conforme gráficos e tabelas do Apêndice B, o que contrasta significativamente com os resultados experimentais. Por

outro lado, o modelo C10 exibe tensões mais elevadas, alcançando 412 MPa, quase atingindo o início de encruamento (420,25 MPa) e, conseqüentemente, apresentando um nível mais elevado de deformações plásticas. Embora o modelo com as chapas de 10 mm de espessura ainda permaneça distante do ponto de ruptura, ele se aproxima mais da resposta observada experimentalmente.

Com relação ao comportamento da interface entre o aço e o concreto, foram plotados os gráficos reação-deslizamento para todos os modelos. Como não há especificação do ponto de medição para o deslizamento nos trabalhos de referência (Shakir-Khalil, 1993 e Johansson, 2003), tomou-se por base o parâmetro de deslizamento acumulado na direção de interesse (CSLIP2), fornecido pelo *software ABAQUS*. Os valores utilizados na construção dos gráficos foram considerados no ponto cujo CSLIP2 é máximo, correspondente ao nó 292 do elemento 2740 da superfície *slave* (concreto), para todos os modelos, conforme mostra a Figura 28. As curvas plotadas foram comparadas com os resultados do ensaio experimental e numérico.

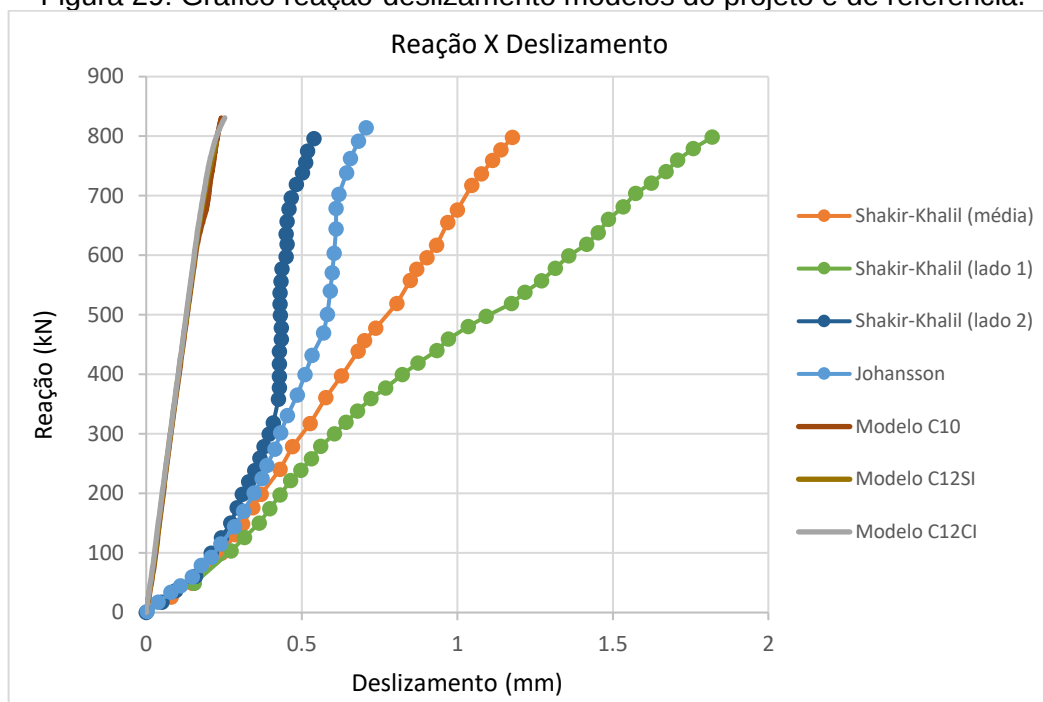
Figura 28: CSLIP2 no elemento 2740 para os modelos.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: A imagem mostra três modelos digitais com um cilindro representando o concreto, espectro de cores é arco-íris. Os cilindros estão divididos em pequenos quadrados representando a malha de elementos finitos, tendo um dos elementos destacado com contorno vermelho. Os modelos são indicados como C10, C12SI e C12CI. No canto superior esquerdo de todos os modelos há um quadro com título CSLIP2 e os valores de acordo com as cores. No canto inferior esquerdo de todos os modelos, há um sistema de coordenadas (X, Y)

Figura 29: Gráfico reação-deslizamento modelos do projeto e de referência.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: gráfico de dispersão que relaciona a carga em kN (eixo Y) com o deslizamento em mm (eixo X). Existem sete linhas no gráfico: Shakir-Khalil (média) com a linha e os pontos em laranja, Shakir-Khalil (lado1) com a linha e os pontos em verde, Shakir-Khalil (lado2) com a linha e os pontos em azul escuro, Johansson, com a linha e os pontos em azul claro, Modelo C10 com a linha marrom, Modelo C12SI com a linha bege e Modelo C12CI com a linha cinza. A carga varia de 0 a 900 kN e o deslizamento de 0 a 2 mm.

Como ilustrado no gráfico da Figura 29, as curvas dos modelos C12SI e C12CI exibem comportamentos quase idênticos, enquanto a curva do modelo C10 também se aproxima significativamente das demais. Contudo, em nenhum dos casos há concordância com os resultados de referência, pois as curvas experimentais e a curva numérica de Johansson apresentam um maior deslizamento à medida que o corpo de prova é carregado em comparação com as curvas dos modelos numéricos deste estudo, que alcançaram um deslizamento substancialmente menor.

A incompatibilidade dos resultados pode ser atribuída a diversos fatores diferentes, como espessura e largura das chapas (que não foram fornecidas), condições de contato e o ponto de medição do deslizamento. Ainda, como mencionado anteriormente, variaram-se os parâmetros dentre os modelos processados, mas os resultados não tiveram efeitos relevantes com relação a inclinação das curvas, sendo esses os modelos com melhor comportamento.

Adicionalmente, tem-se que os testes com as condições de carregamento do ensaio experimental (carga aplicada diretamente no núcleo de concreto) não geraram

resultados positivos, pois, mesmo variando os parâmetros de contato e imperfeição geométrica local inicial, essas condições não foram suficientes para simular o comportamento, mesmo que aproximado, da interface aço-concreto. Portanto, fez-se necessária a aplicação de carregamento nas duas seções (aço e concreto), que também pode ser um motivo para divergência dos resultados.

Diante disso, é provável que a abordagem utilizada neste trabalho não seja ideal para a problemática em estudo e que a falta de informações dos trabalhos de referência pode ter influenciado nos resultados obtidos e na dificuldade da calibração, pois alguma informação crucial para a configuração dos modelos pode ter sido omitida.

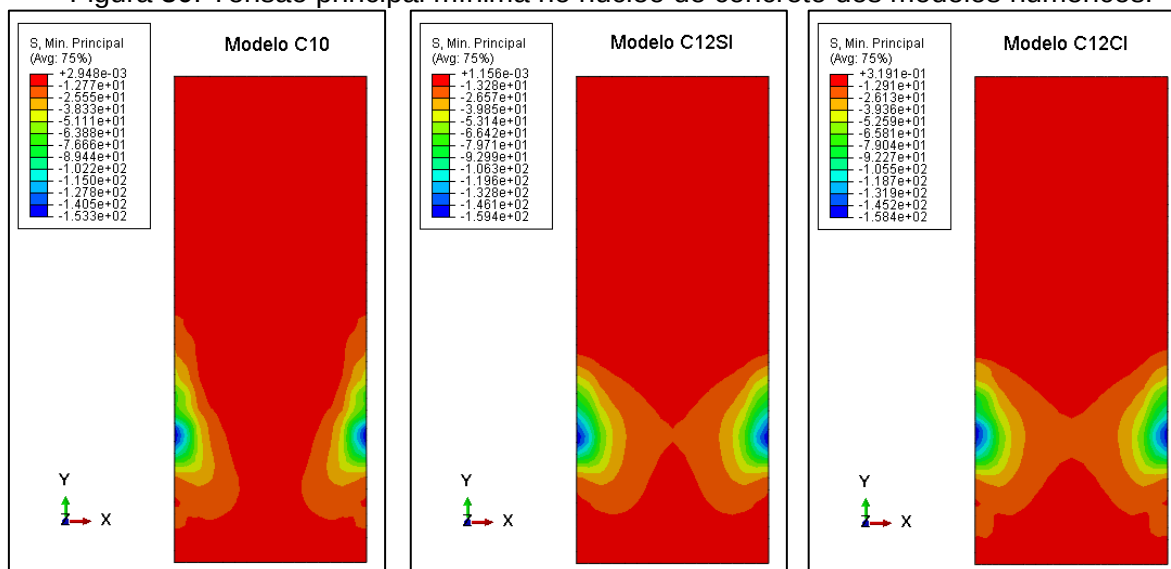
5.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO NÚCLEO DE CONCRETO

A respeito do CDP sabe-se que este já leva em conta o confinamento do concreto quando existe a presença das armaduras e também o estado de tensão bi ou triaxial de compressão do concreto. Adicionalmente, devido a presença do tubo de aço e em função da geometria circular da seção, existe uma potencialização do confinamento do concreto em função da distribuição radial de tensões, o que é benéfico para a sua capacidade resistente.

Ao se tratar do problema em questão, ainda existe a necessidade de se levar em consideração o microconfinamento gerado pelo *pinching*, que é a pressão de contato exercida pela chapa de ligação na parede do tubo de aço, aumentando a compressão do concreto a nível local. Esse estado de tensão resultante possui elevada dificuldade para entendimento, sendo uma das maneiras mais fáceis a análise por meio das tensões principais mínimas, deformações plásticas e parâmetro de dano.

Desse modo, o primeiro parâmetro a ser analisado é a tensão principal mínima, para verificar a tensão que concreto chegou quando submetido a carga experimental (Figura 30).

Figura 30: Tensão principal mínima no núcleo de concreto dos modelos numéricos.



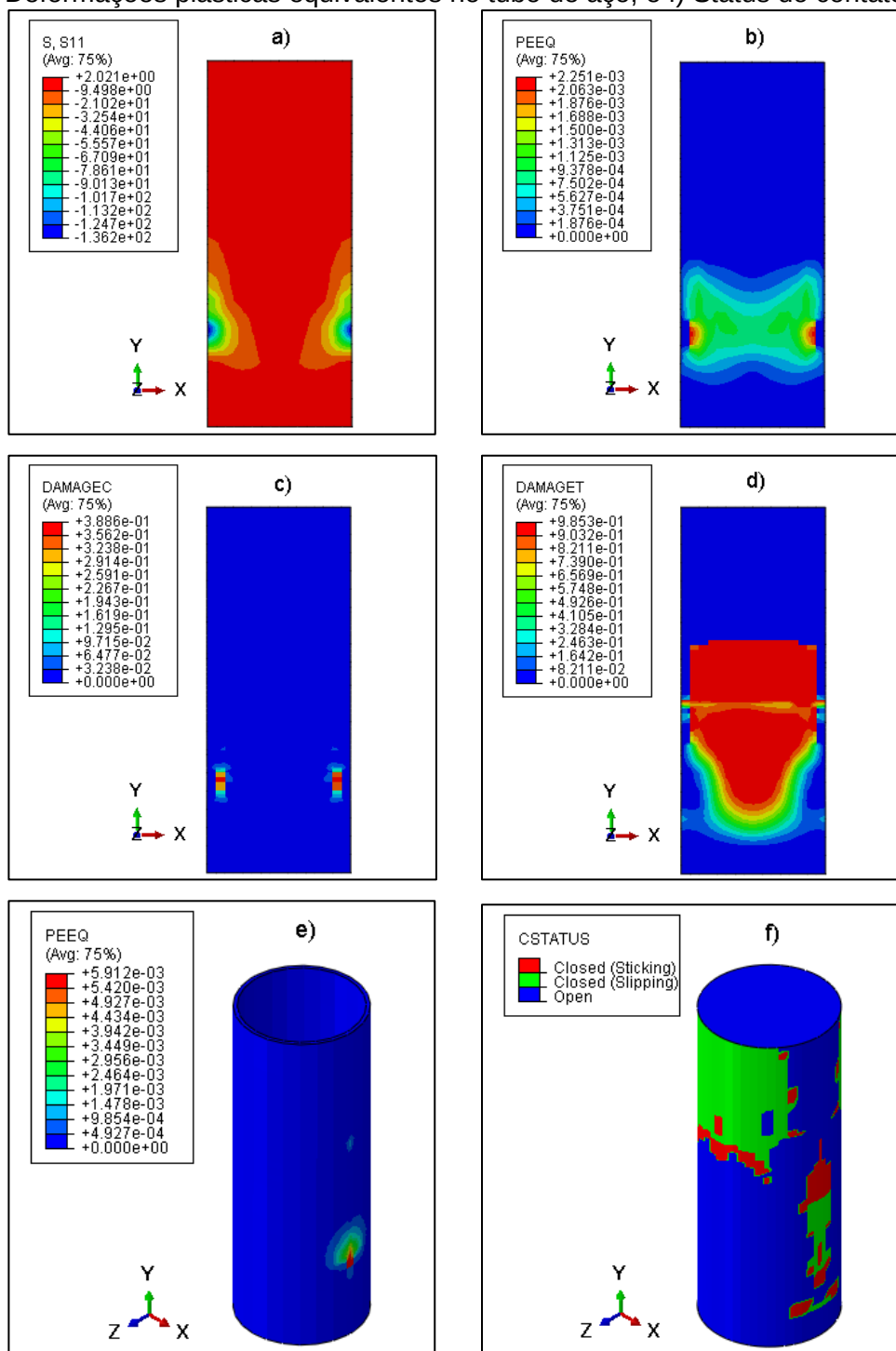
Fonte: Autoria própria.

Legenda: a figura apresenta três imagens de retângulos simulando o núcleo de concreto com corte no plano Z. Em sua maior parte são vermelhos, mas apresentam regiões com espectro de cores em arco-íris. Os modelos são identificados como C10, C12SI e C12CI. No canto superior esquerdo de todos os modelos há um quadro com título S, Min. Principal e os valores de acordo com as cores. No canto inferior esquerdo de todos os modelos, há um sistema de coordenadas (X, Y).

Pelas imagens observa-se que há regiões de concentração de tensões de compressão em todos os modelos, confirmando o efeito de *pinching*, além disso, percebe-se que o valor de compressão máxima (tensão mínima) é muito similar para todos os modelos, próxima de 150 MPa, e ultrapassa em cerca de quatro vezes a resistência do concreto utilizado (40,1 MPa). Este valor é extremamente elevado, indicando que a pressão exercida pela rotação das chapas de ligação é alta, podendo influenciar diretamente na capacidade resistente do pilar misto, dentro da região de introdução de carga.

Para compreender os efeitos causados pelo elevado nível de tensão, é necessário analisar os parâmetros de plastificação e danos à tração e à compressão e compará-los com o comportamento frente a tensão na direção correspondente. As imagens mostradas a seguir apresentam os parâmetros mencionados.

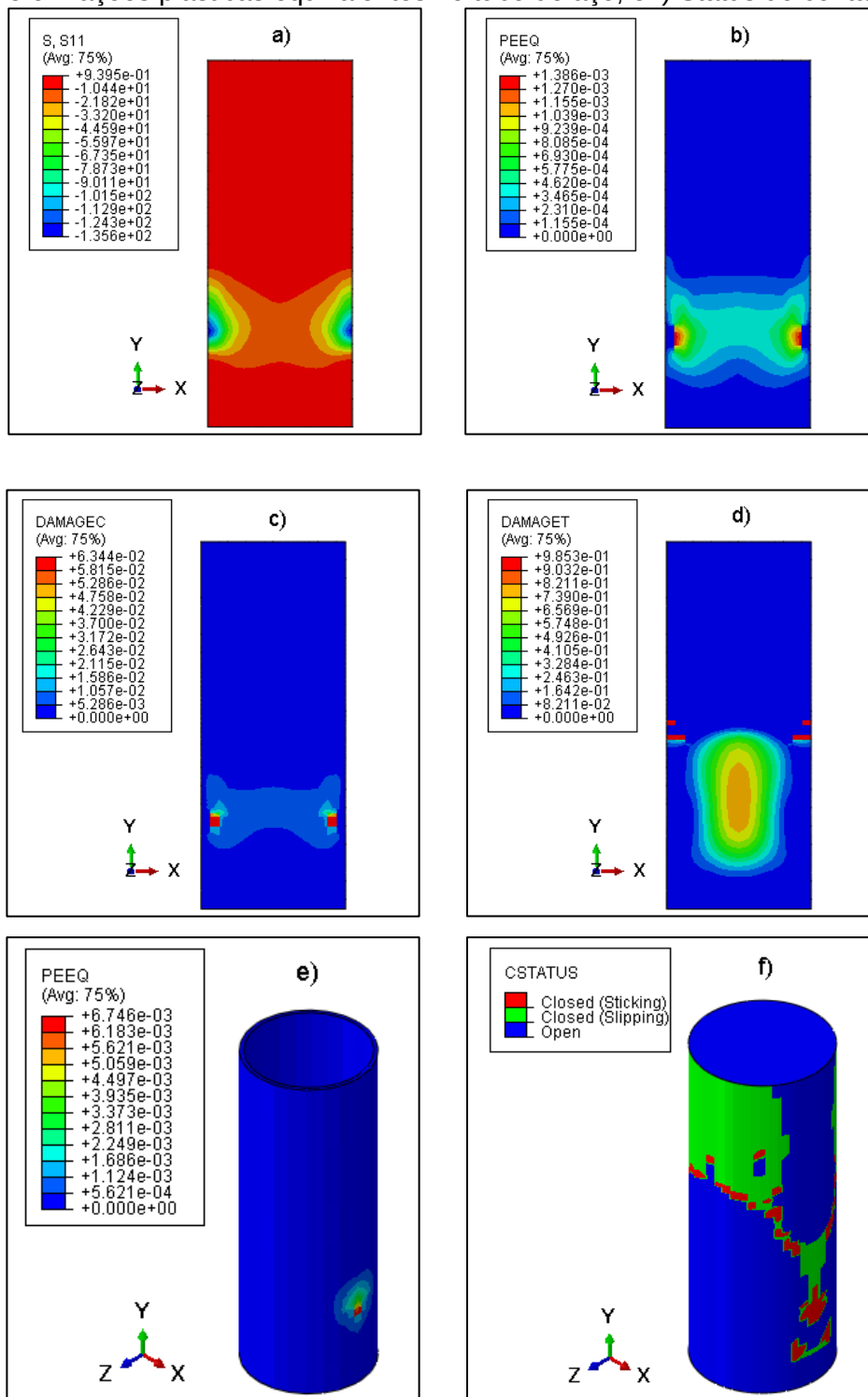
Figura 31: Análise resultados para modelo C10: a) Tensão S11; b) Deformações plásticas equivalentes do núcleo de concreto; c) Dano na compressão; d) Dano na tração; e) Deformações plásticas equivalentes no tubo de aço; e f) Status do contato.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: a figura apresenta seis imagens referentes ao modelo C10, quatro de retângulos simulando o núcleo de concreto com corte no plano Z, uma casca cilíndrica (representando o tubo) e um cilindro (representando o núcleo de concreto), apresentando espectro de cores em arco-íris. No canto superior esquerdo de todas as imagens há um quadro com títulos S, S11, PEEQ, DAMAGEC, DAMAGET, PEEQ e CSTATUS. Principal e os valores de acordo com as cores. No canto inferior esquerdo de todos os modelos, há um sistema de coordenadas (X, Y, Z).

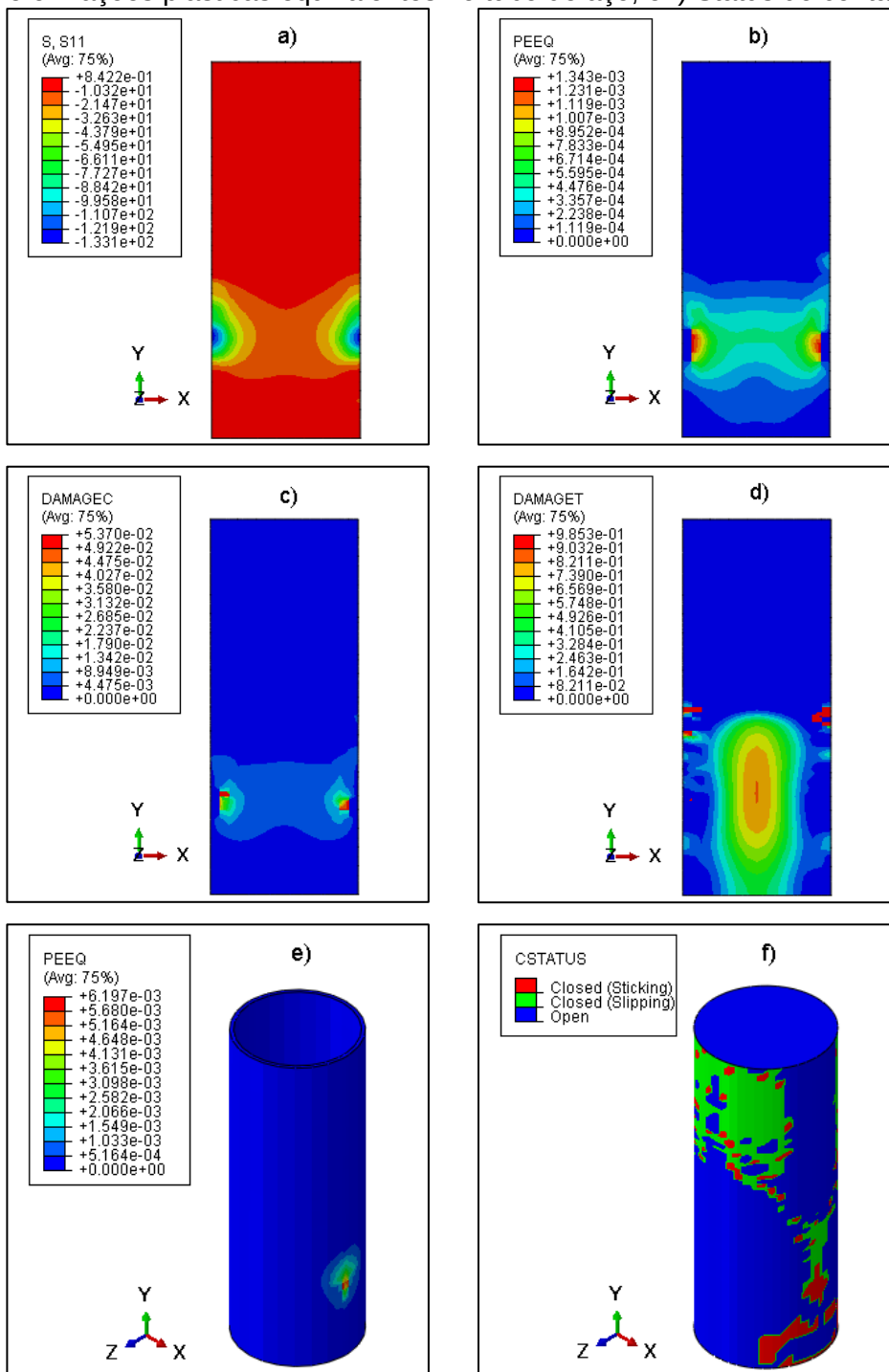
Figura 32: Análise resultados para modelo C12SI: a) Tensão S11; b) Deformações plásticas equivalentes do núcleo de concreto; c) Dano na compressão; d) Dano na tração; e) Deformações plásticas equivalentes no tubo de aço; e f) Status do contato.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: a figura apresenta as mesmas seis imagens da figura anterior (32), mas referentes ao modelo C12SI.

Figura 33: Análise resultados para modelo C12Cl: a) Tensão S11; b) Deformações plásticas equivalentes do núcleo de concreto; c) Dano na compressão; d) Dano na tração; e) Deformações plásticas equivalentes no tubo de aço; e f) Status do contato.



Fonte: Autoria própria

Legenda: a figura apresenta as mesmas seis imagens das Figura 32 e 33, mas referentes ao modelo C12Cl.

É possível observar pelas imagens que o modelo C10, quando submetido à carga experimental, alcança uma tensão S_{11} (na direção X global) de cerca de 136 MPa, as deformações plásticas equivalentes correspondentes, conforme curva de comportamento do material apresentada no Apêndice B, alcançam o patamar de $2,25 \times 10^{-3}$, gerando um dano na compressão de até 39% e dano na tração de até 98%. Esses valores indicam que, para a o carregamento aplicado, o concreto apresenta um elevado nível de deformação tal que ultrapassa por muito a sua tensão de pico. Em relação à compressão o concreto entra em fase de amolecimento (*softening*) e apresenta uma perda de 39% da sua rigidez. Com relação à tração, as deformações atingiram um nível muito elevado em relação ao suportado, gerando uma perda de 98% da sua rigidez, ou seja, o concreto perdeu toda sua capacidade resistente à tração.

Para o modelo C12SI, a tensão S_{11} alcança cerca de 136 MPa, assim como o modelo C10, gerando um nível de deformações plásticas equivalentes (Apêndice B) de até $1,4 \times 10^{-3}$, dano à compressão de 7% e dano à tração de 73%, com apenas alguns pontos alcançando 98%. Nesse caso, percebe-se que, para um mesmo nível de tensões do modelo anterior, as deformações diminuíram, mantendo ainda o estado de amolecimento para compressão, mas com perda de rigidez de apenas 7%. Com relação a tração também se observou uma “melhoria” no comportamento, no entanto a perda de rigidez continua significativa.

Com relação ao modelo C12CI, a tensão S_{11} alcança cerca de 133 MPa, próximo dos outros modelos, gerando um nível de deformações plásticas e dano muito parecido com o modelo C12SI, apresentando reduções pouco significativas. Em termos de comportamento, pode-se considerar o mesmo do caso anterior, exceto que a região do dano a tração, aqui considerada, é maior, ou seja, a presença das imperfeições geométricas contribuiu para um maior nível de fissuração na região.

6 CONCLUSÃO

Embora a introdução de carga tenha ocorrido conforme o ensaio experimental, a metodologia utilizada não se mostrou adequada para representar o deslizamento registrado pelos artigos de Shakir-Khalil (1993) e Johansson (2003), embora nenhum dos dois trabalhos tenha comentado sobre a região de medição de tal parâmetro.

Mesmo com a incompatibilidade nos resultados de deslizamento, do ponto de vista mecânico o comportamento dos modelos de estudo se mostrou bastante promissor e compatível com o esperado. Confirmou-se a ocorrência de rotação das ligações (*pinching*), o microconfinamento do concreto, e a concentração das tensões de escoamento nas chapas, indicando altos níveis de deformação plástica e a possibilidade de falha conforme o experimento.

No núcleo de concreto verificou-se o microconfinamento causado pelo *pinching* para todos os modelos, no entanto o efeito desse fenômeno em cada um deles se mostrou diferente. Com relação à compressão, apontou-se um ganho de resistência para os modelos com chapas mais espessas (C12SI e C12CI), com os valores ultrapassando o valor de resistência do concreto considerado de 40,1 MPa para 136 MPa, com perda de rigidez de apenas 7%. Para a chapa mais fina (10mm) o ganho não foi significativo em função da perda de rigidez elevada (39%). Em relação à tração, os modelos com chapas mais espessas também apresentaram melhor desempenho, contudo, a perda de rigidez foi tão significativa (73% a 98%) que não se pode atribuir um aumento, mas sim a perda de capacidade resistente.

Assim, mesmo com o objetivo da calibração e validação do modelo numérico não tendo sido atingido, pode-se concluir que a espessura da chapa influencia no comportamento perante a rotação da ligação, plastificações das seções e na resistência da região de microconfinamento do concreto e que a imperfeição geométrica utilizada não foi um parâmetro significativo no problema analisado. Ainda, pode-se dizer que os trabalhos utilizados como referência carecem de informações, podendo ser um dos principais motivos dos resultados alcançados.

6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se este trabalho como ponto de partida para o desenvolvimento de uma dissertação de mestrado, a fim de avaliar a influência de outros parâmetros, como modelos constitutivos, condições de contato e geometrias das chapas, na análise da região de introdução de carga para pilares tubulares de seção circular de aço preenchidos com concreto e conectados às vigas por meio de *single plate*. Também sugere-se realizar a calibração e validação do modelo numérico por meio de ensaios experimentais mais consistentes.

REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI/AISC 360:22** – Specification for Structural Steel Buildings. Washington, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16239**: Projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de aço e concreto de edificações com perfis tubulares. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ARAÚJO, A. H. M. *et al.* **Projeto de estruturas de edificações com perfis tubulares de aço**. Belo Horizonte: do Autor, 2016.

Carreira, D.J.; Chu, K.H. Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression. **ACI Journal**, n.82, p. 797-804, November-December, 1985.

Carreira, D.J.; Chu, K.H. Stress-Strain Relationship for Reinforced Concrete in Tension. **ACI Journal**, n. 83, p. 21–28, January-February, 1986.

DUNBERRY, E.; LEBLANC, D.; REDWOOD, R. G. Cross-Section Strength of Concrete-Filled HSS Columns at Simple Beam Connections. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Canada, v. 14, n. 3, p. 408-417, January, 1987.

EARLS, C. J. On the inelastic failure of high strength steel I-shaped beams, **Journal of Constructional Steel Research**, v. 49, p. 1–24, January, 1999.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-1:2004**: Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, 227 p., April, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1994-1-1:2004**: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, 121 p., May, 2004.

JOHANSSON, M. Composite action in connection regions of concrete-filled steel tube columns. **Steel and Composite Structures**, South Korea, v. 3, n. 1, p. 47-64, January, 2003.

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, 1998.

LUBLINER, J. *et al.* A plastic-damage model for concrete. **International Journal of Solids and Structures**, v. 25, n. 3, p. 299-326, 1989.

MOLLAZADEH, M.H., WANG, Y.C. New insights into the mechanism of load introduction into concrete-filled steel tubular column through shear connection. **Engineering Structures**, v. 75, p. 139-151, September, 2014.

PEREIRA, D. H. F. **Análise do comportamento estrutural de ligações em aço entre viga de seção I e pilar de seção tubular circular**. Orientador: Prof. Dr. Roberto Martins Gonçalves. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

QUEIROZ, G.; PIMENTA, R. J. **Elementos das estruturas mistas de aço-concreto**. Belo Horizonte: O Lutador, 2001.

SIMULIA, **Abaqus Analysis User's Manual**. Providence, RI, USA, Dassault Systems Simulia Corp, 2014

SHAKIR-KHALIL, H. Full-scale tests on composite connections. **Composite Construction in Steel and concrete II, Proceedings of the Engineering Foundation Conference**, Potosi, Missouri, ASCE, New York, USA, p. 539-554, June, 1992.

SHAKIR-KHALIL, H. Resistance of concrete-filled steel hollow tubes to pushout forces. **The Structural Engineer**, v.71, n.13, p. 234-243, July 1993.

SOUSA, A. M. D. **Contribuição à análise da resistência à força cortante em lajes de concreto estrutural sem armadura transversal**. Orientador: Prof. Titular Mounir Khalil El Debs. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

VOTH, A. P. **Branch Plate-to-Circular Hollow Structural Section Connections**. Thesis (Doctor of Philosophy in Civil Engineering)-Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, 2010.

WARDENIER, J. *et al.* **Hollow Sections in Structural Applications**. Switzerland: Bouwen met Staal, 2010.

Yu, T.; Teng, J.G.; Wong, Y.L.; Dong, S.L. Finite element modeling of confined concrete-II: Plastic-damage model. **Engineering Structures**, v. 32, n. 3, p. 680-691, March, 2010.

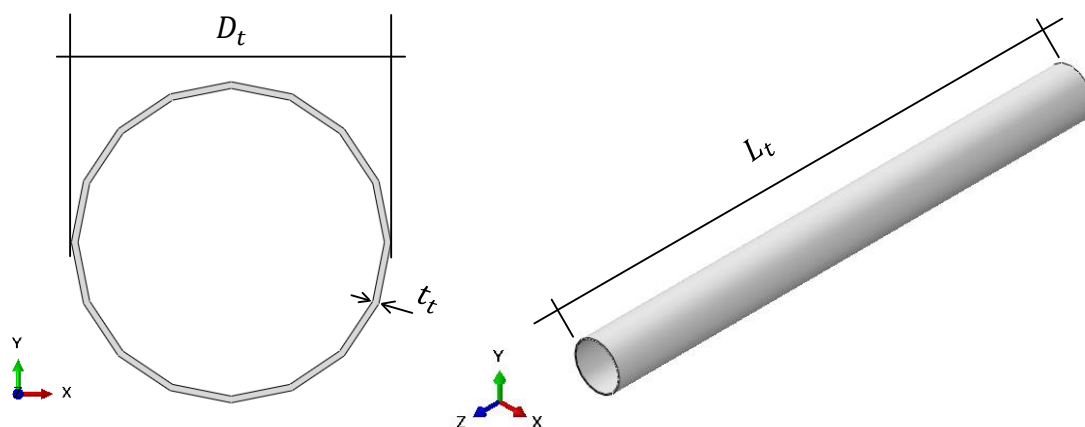
APÊNDICE A – TESTE DE ELEMENTOS FINITOS PARA PROBLEMA DE LIGAÇÃO SIMPLES POR MEIO DE *SINGLE PLATE*

Analizou-se o comportamento de diferentes elementos frente a um problema de ligações simples para um pilar tubular de aço de seção circular. Abaixo segue o procedimento para análise até a escolha do elemento.

1) Geometria dos modelos

- TUBO:

Figura 34: Características geométricas do tubo.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: Imagem frontal do tubo com as marcações D_t e t_t indicando respectivamente seu diâmetro externo e a espessura da parede e, ao lado, imagem em perspectiva do tubo com a marcação L_t indicando seu comprimento. Nas duas imagens acompanha o sistema de coordenadas, 2D na primeira (X, Y) e 3D na segunda (X, Y, Z).

Onde:

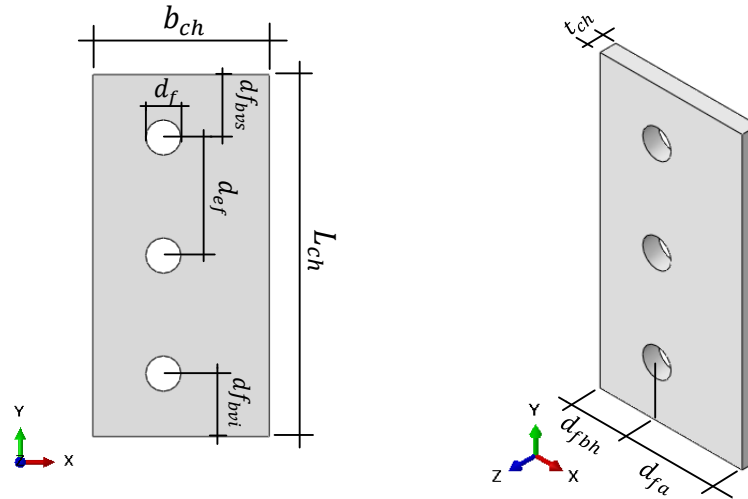
$$D_t = 600 \text{ mm}$$

$$t_t = 12,5 \text{ mm},$$

$$L_t = 6350 \text{ mm}$$

-CHAPA:

Figura 35: Características geométricas da chapa.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: Imagem frontal da chapa de ligação (retângulo com três furos) com as marcações b_{ch} , L_{ch} , d_f , d_{ef} , d_{fbvs} e d_{fbvi} indicando, respectivamente, sua largura, comprimento, diâmetro do furo, distância entre furos, distância entre furo e borda superior, distância entre furo e borda inferior. Ao lado, a mesma imagem em perspectiva com as marcações t_{ch} , d_{fbh} e d_{fba} indicando, respectivamente sua espessura, distância entre furo e borda externa e distância entre furo e borda interna. Nas duas imagens acompanha o sistema de coordenadas, 2D na primeira (X, Y) e 3D na segunda (X, Y, Z).

Onde:

$$b_{ch} = 112,5 \text{ mm}$$

$$L_{ch} = 230 \text{ mm}$$

$$d_f = 22,5 \text{ mm}$$

$$d_{ef} = 75 \text{ mm}$$

$$d_{fbvs} = d_{fbvi} = 40 \text{ mm}$$

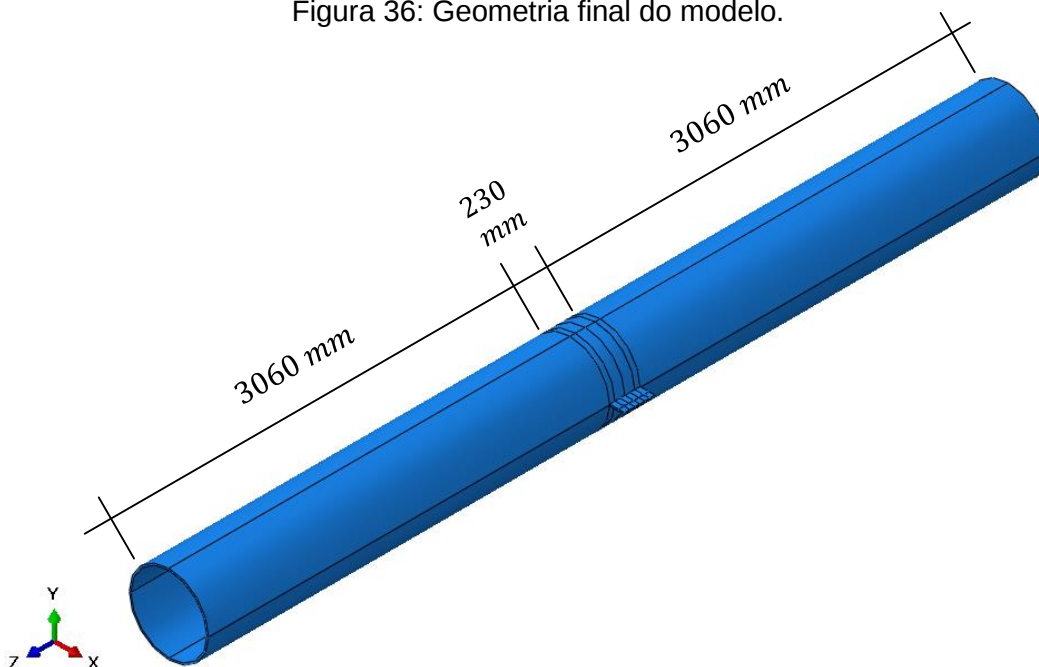
$$t_{ch} = 12,5 \text{ mm}$$

$$d_{fbh} = 45 \text{ mm}$$

$$d_{fba} = 67,5 \text{ mm}$$

-CONJUNTO FINAL DOS MODELOS

Figura 36: Geometria final do modelo.



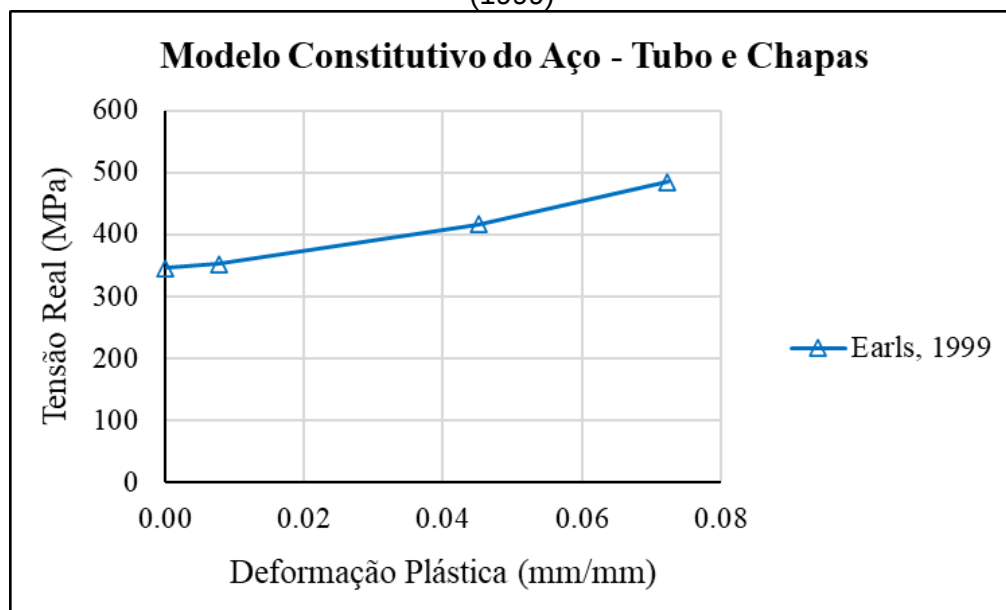
Fonte: Autoria própria.

Legenda: Imagem em perspectiva do modelo do tubo junto com as chapas, na cor azul. É possível ver apenas uma das chapas pela perspectiva colocada, sendo esta localizada na região média do tubo. Exibem-se as medidas do topo do tubo até o início da ligação (3060 mm), da região de ligação (230 mm) e do fim da ligação até a base do tubo 3060 mm). Na imagem acompanha o sistema de coordenadas 3D (X, Y, Z).

2) Modelo constitutivo do material

Utilizou-se o aço A572 Gr. 50, cuja tensão de escoamento, $f_y = 345 \text{ MPa}$ e tensão de ruptura, $f_u = 450 \text{ MPa}$. A curva tensão-deformação (Figura 37) foi plotada considerando o modelo constitutivo de Earls (1999), conforme seção 3.5 deste trabalho.

Figura 37: Gráfico Tensão real x Deformação plástica do aço do modelo de acordo com Eals (1999)



Fonte: Autoria própria.

Tabela 3: Dados para construção do gráfico tensão x deformação da Figura 37.

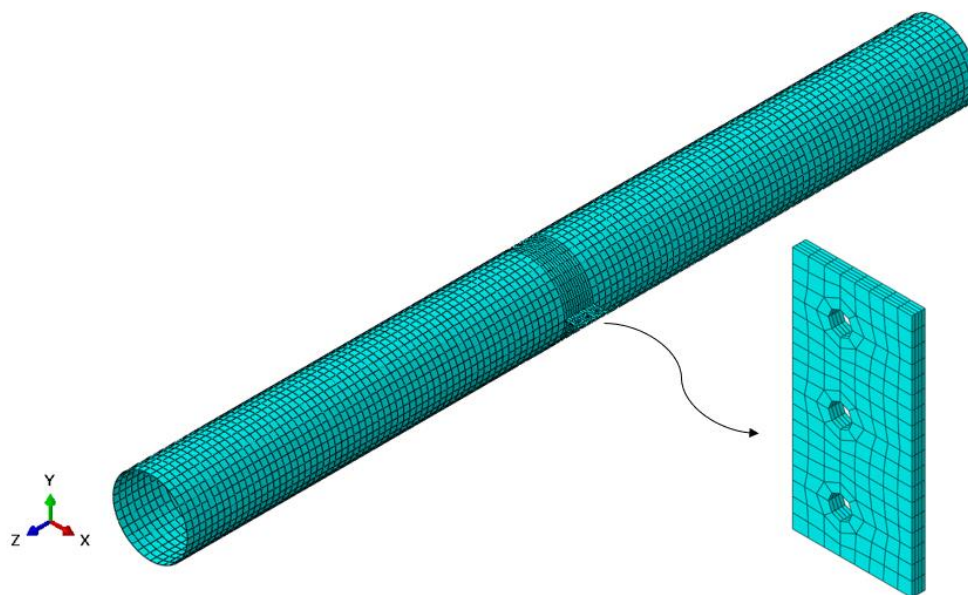
Tensões e deformações para aço (Earls, 1999)					
σ_{Eng} MPa	ϵ_{Eng}	σ_{True} MPa	ϵ_{True}	$\epsilon_{Elastica}$	$\epsilon_{Plástica}$
0.00	0.000000	0.00	0.000000		
345.00	0.001725	345.60	0.001724	0.001728	0.000000
348.45	0.009488	351.76	0.009443	0.001759	0.007684
397.50	0.048300	416.70	0.047170	0.002083	0.045086
450.00	0.077625	484.93	0.074760	0.002425	0.072335

Fonte: Autoria própria.

3) Discretização do modelo

A discretização foi feita considerando um elemento por modelo (tubo e chapas), somando no total seis elementos diferentes, os sólidos tridimensionais C3D8, C3D8R, C3D20 e C3D20R e os elementos de casca bidimensionais S4 e S4R. Com relação a malha de elementos finitos (Figura 38), para o tubo utilizou-se um tamanho global de 50mm e local, na região de ligação, de 15mm. Para a chapa, utilizou-se um tamanho geral de 15 mm.

Figura 38: Discretização da geometria dos modelos.



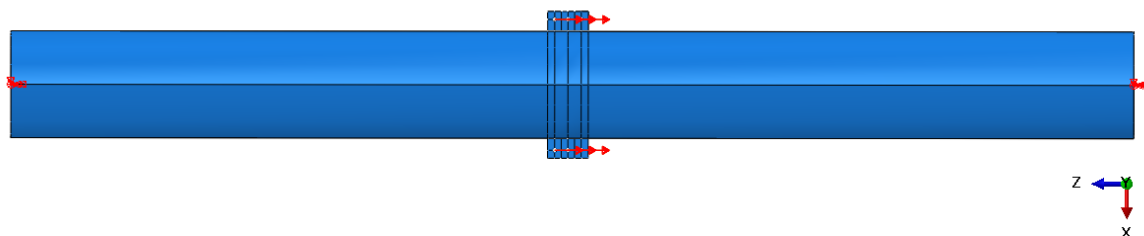
Fonte: Autoria própria.

Legenda: casca cilíndrica e retângulo com três furos, em ciano, dividido em pequenos quadrados, representando a malha de elementos finitos. Na extremidade inferior esquerda da Imagem há um sistema de coordenadas (X, Y, Z).

4) Configurações de contorno e carregamento

Considerou-se o tubo como bi-apoiado e o carregamento aplicado direto nas chapas, através dos furos (Figura 39). No total, foram introduzidos 900 kN em cada chapa.

Figura 39: Condições de contorno e carregamento utilizadas no modelo.

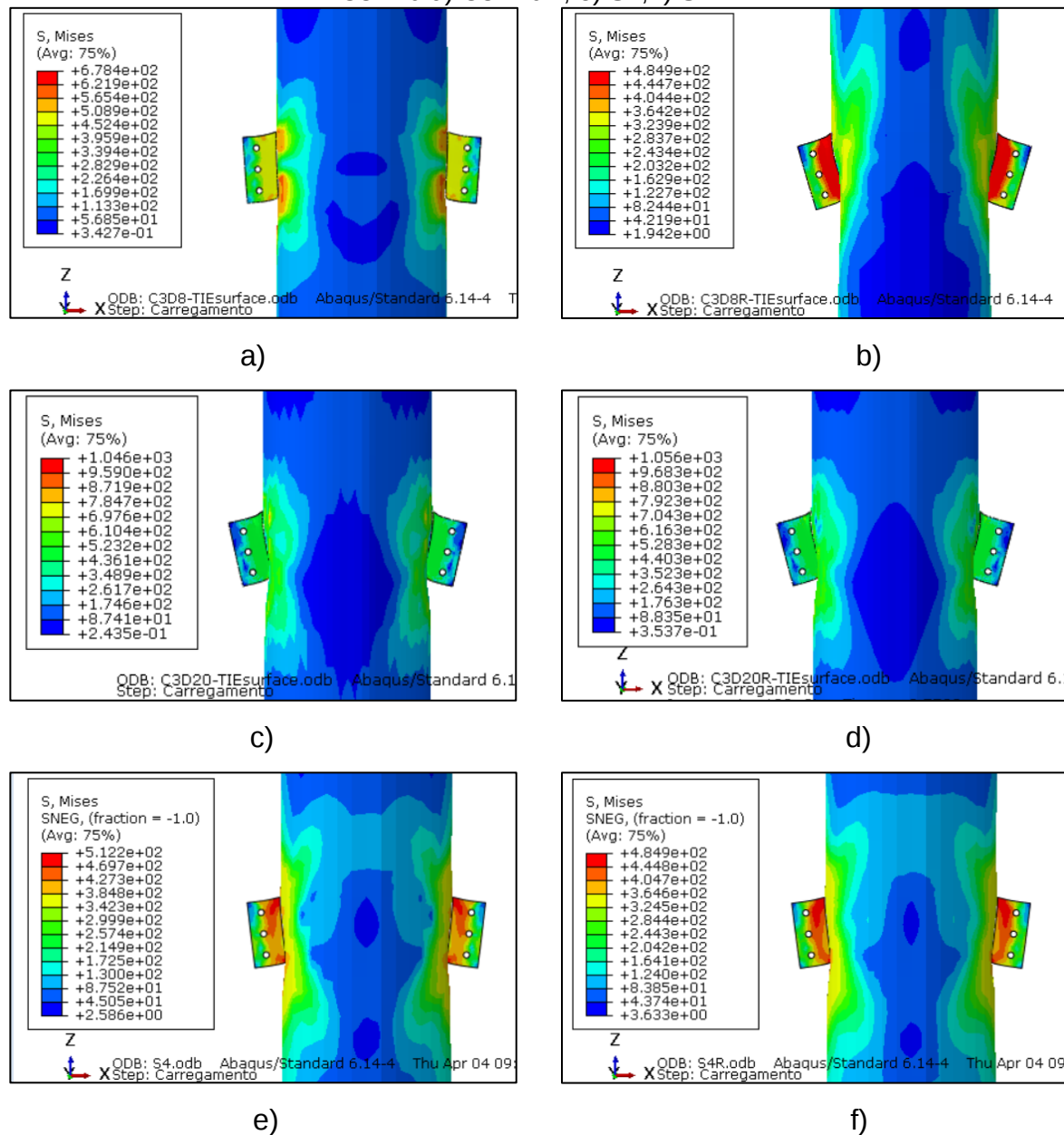


Fonte: Autoria própria.

Legenda: estrutura azul, em vista 2D (como se estivesse de lado), as chapas se localizam uma em cada lado do tubo na região média. Os pontos de apoio aparecem destacados em vermelho nas extremidades e os pontos de carregamento são mostrados como setas vermelhas saindo do centro dos furos e apontando para o lado direito. No canto inferior direito, apresenta-se o sistema de coordenadas (X, Z).

5) Apresentação dos resultados e conclusão

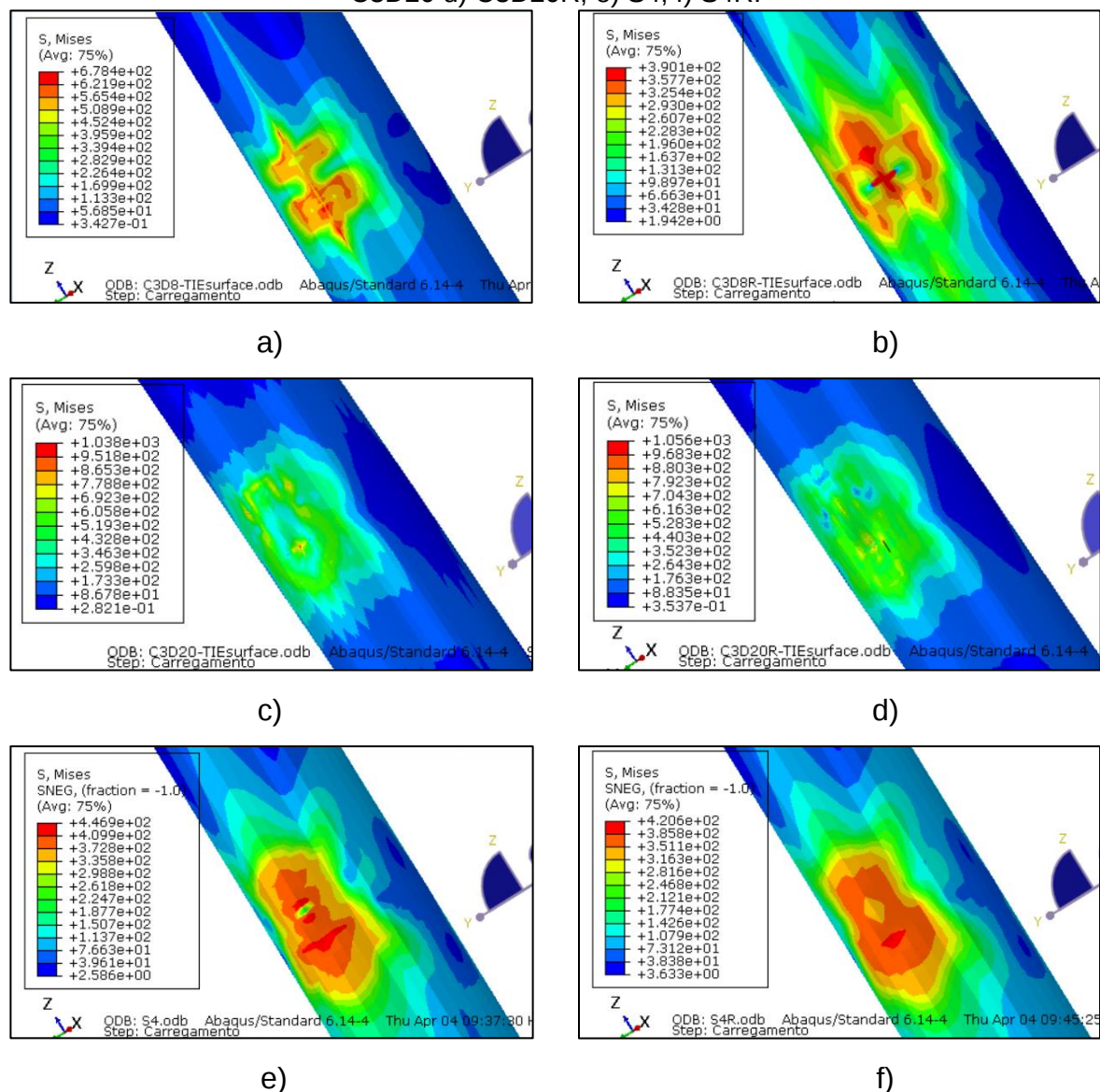
Figura 40: Tensões equivalentes de von Mises para os elementos: a) C3D8, b) C3D8R, c) C3D20 d) C3D20R, e) S4, f) S4R.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: A imagem mostra seis modelos estruturais digitais representados com espectro de cores arco. Os modelos são compostos por um cilindro, representando o tubo e 2 retângulos nele presos, simulando as chapas. No canto superior esquerdo de todos os modelos digitais há um quadro com título S, Mises e os valores de acordo com as cores. No canto inferior esquerdo de todos os modelos digitais, há um sistema de coordenadas (X, Y, Z).

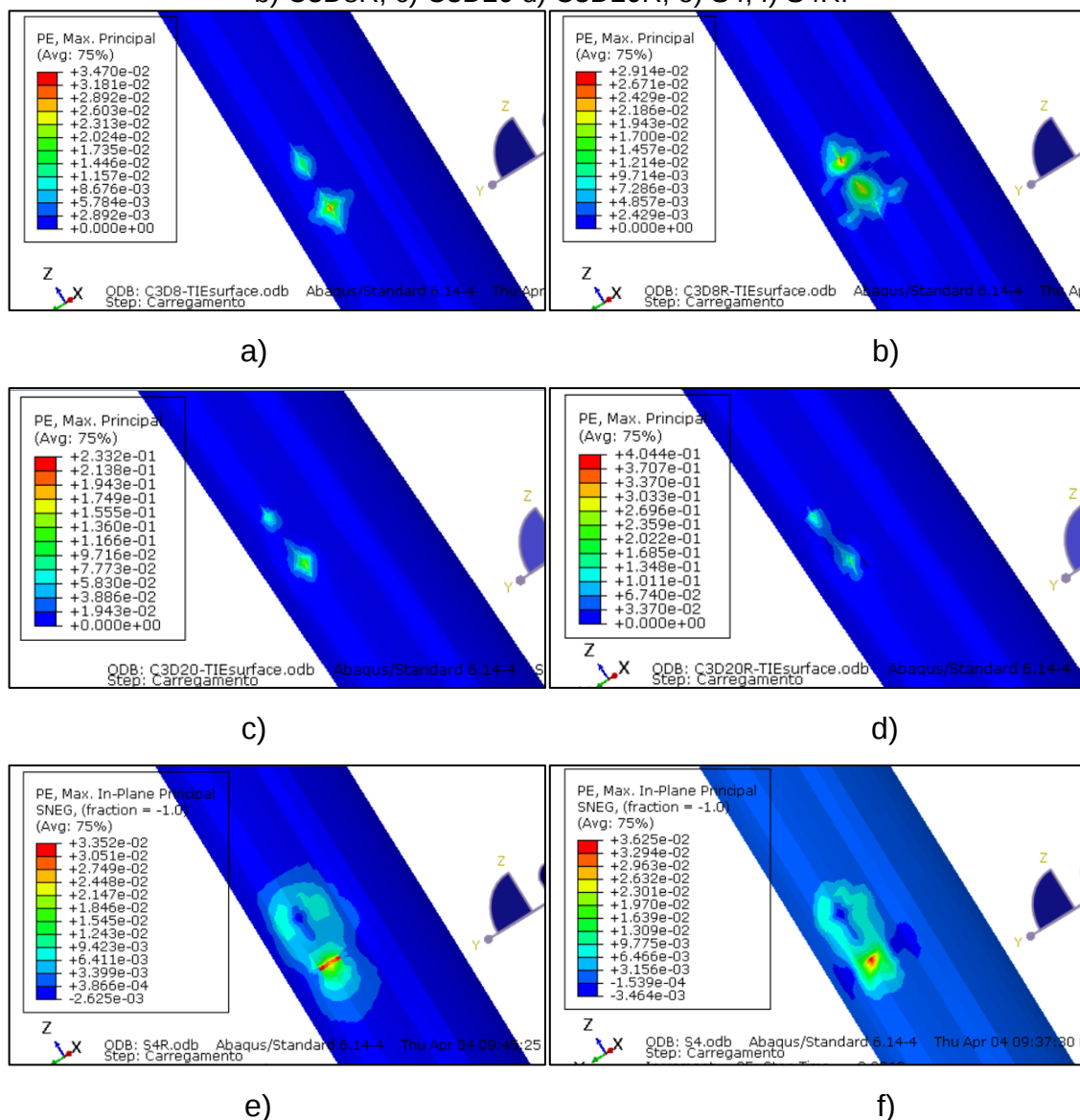
Figura 41: Tensões equivalentes de von Mises para os elementos: a) C3D8, b) C3D8R, c) C3D20 d) C3D20R, e) S4, f) S4R.



Fonte: Autoria própria.

Legenda: A imagem mostra seis modelos estruturais digitais representados com espectro de cores arco. Os modelos são compostos por um cilindro, representando o tubo, mas neste caso sem as chapas. No canto superior esquerdo de todos os modelos digitais há um quadro com título S, Mises e os valores de acordo com as cores. No canto inferior esquerdo de todos os modelos digitais, há um sistema de coordenadas (X, Y, Z).

Figura 42: Deformação plástica máxima no plano principal para os elementos: a) C3D8, b) C3D8R, c) C3D20 d) C3D20R, e) S4, f) S4R.



Fonte: Autoria própria,

Legenda: A imagem mostra seis modelos estruturais digitais representados com espectro de cores arco. Os modelos são compostos por um cilindro, representando o tubo, mas neste caso também não há presença das chapas. No canto superior esquerdo de todos os modelos digitais há um quadro com título PE, Max. In-Plane Principal e os valores de acordo com as cores. No canto inferior esquerdo de todos os modelos digitais, há um sistema de coordenadas (X, Y, Z).

Analisando-se as Figuras 40, 41 e 42, percebe-se que os elementos C3D8, C3D20, C3D20R e S4 apresentam tensões bastante elevada, superando a tensão de ruptura dada pelo modelo do material (Figura 37) de 485 Mpa. Para os elementos de primeira ordem, C3D8 e S4, esse aumento nas tensões são causados pelo fenômeno *shear locking*, e para os elementos de segunda ordem, C3D20 e C3D20R, esse aumento é causado pelo fenômeno *volumetric locking*, que também influenciou

diretamente nas deformações plásticas, gerando inconsistência nos valores em comparação com a curva do material.

Em relação aos elementos C3D8R e S4R, verifica-se uma concordância satisfatória com a curva do material em termos de tensões e deformações, com valores próximos nos dois modelos. No entanto, suas configurações deformadas apresentam diferenças, como ilustrado na Figura 40. A deformação no elemento de casca (S4R) é bastante localizada, concentrando-se em uma região específica e não se propagando para o restante do tubo. Já no elemento C3D8R, a deformação se propaga de forma mais abrangente, tal acontecimento pode ser influenciado pela capacidade do elemento sólido de se deformar ao longo de sua espessura, apresentando maior similaridade com o comportamento real do material.

Desse modo, a conclusão do teste é que os elementos C3D8, C3D20, C3D20R e S4 não apresentam um bom comportamento diante do problema proposto, logo, devem ser evitados. Já os elementos C3D8R e S4R provaram ser eficientes em reproduzir a curva do material e no comportamento frente a rotação das chapas, mas divergem em sua capacidade de deformação, sendo o elemento C3D8R se mostrado mais compatível com a situação estudada.

APÊNDICE B – VALORES E CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO PARA OS MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS

Aço estrutural:

Tabela 4: Característica mecânicas do aço estrutural do tubo (Johansson, 2003).

Características Mecânicas do Aço		
f_y	f_u	E
MPa	MPa	MPa
318.00	488.00	208000

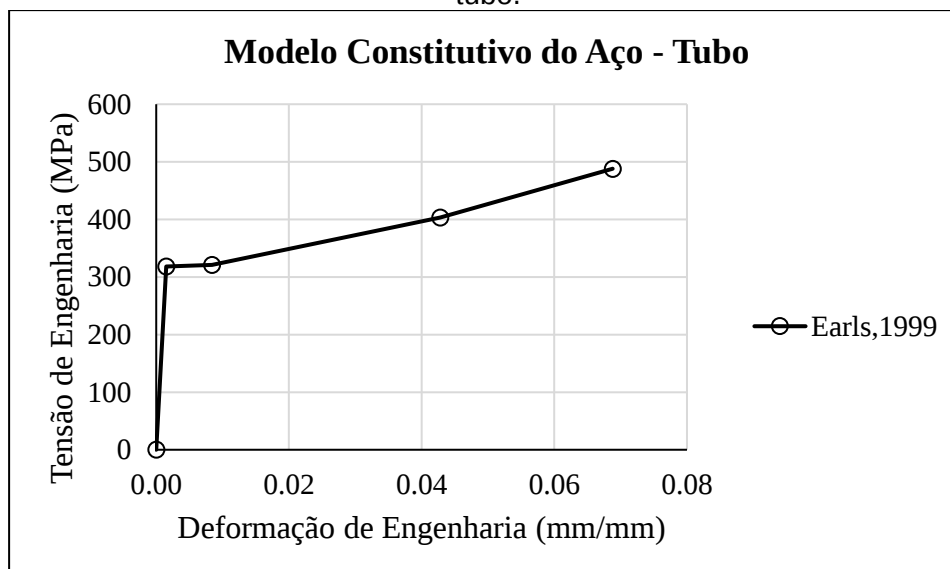
Fonte: Autoria própria.

Tabela 5: Tensões e deformações para aço estrutural do tubo (Earls, 1999).

Tensões e Deformações					
σ_{Eng} MPa	ϵ_{Eng}	σ_{True} MPa	ϵ_{True}	$\epsilon_{Elastica}$	$\epsilon_{Plástica}$
0.00	0.000000	0.00	0.000000		
318.00	0.001529	318.49	0.001528	0.001531	0.000000
321.18	0.008409	323.88	0.008373	0.001557	0.006816
403.00	0.042808	420.25	0.041917	0.002020	0.039896
488.00	0.068798	521.57	0.066535	0.002508	0.064027

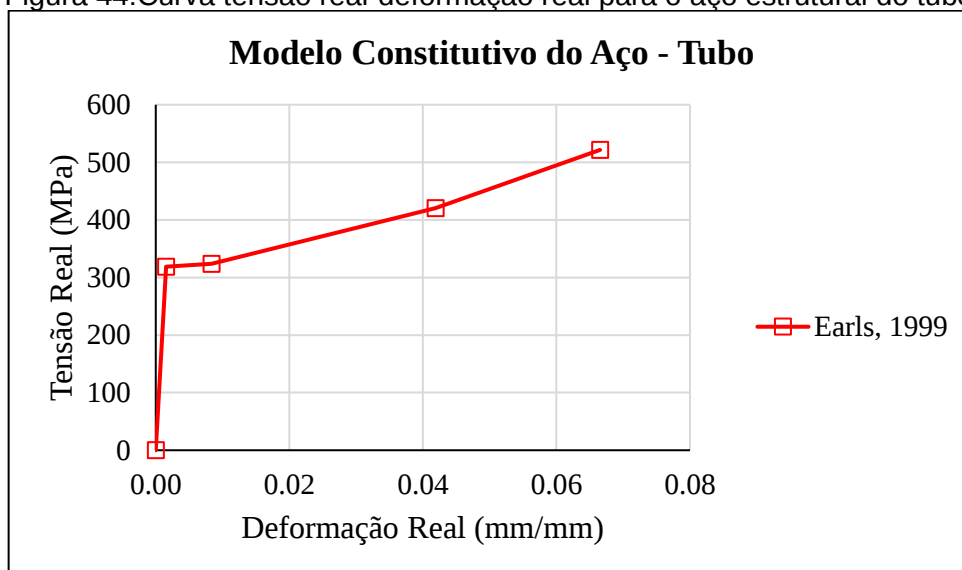
Fonte: Autoria própria.

Figura 43: Curva tensão de engenharia-deformação de engenharia para o aço estrutural do tubo.



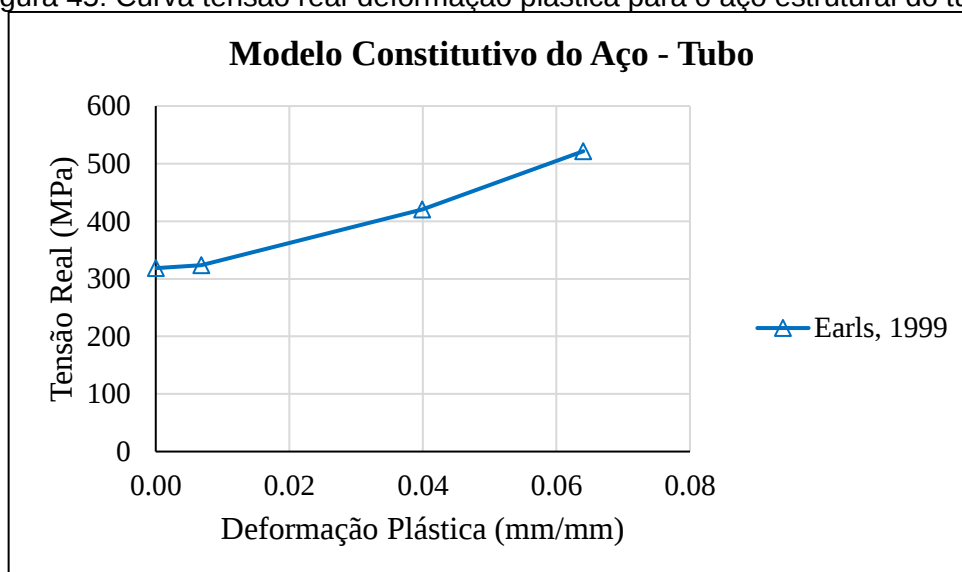
Fonte: Autoria própria.

Figura 44: Curva tensão real-deformação real para o aço estrutural do tubo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 45: Curva tensão real-deformação plástica para o aço estrutural do tubo.



Fonte: Autoria própria

Concreto:

Tabela 6: Característica mecânicas do núcleo de concreto (EN2-1-1:2004).

Características Mecânicas do Concreto (EN2-1-1:2004)							
f_c (cilindro) (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	E_{cm} (MPa)	ϵ_{c1}	ϵ_{cu}	ϵ_i	β
40.1	48.1	3.51	35242.46	0.00233	0.00350	0.00010	4.82

Fonte: Autoria própria.

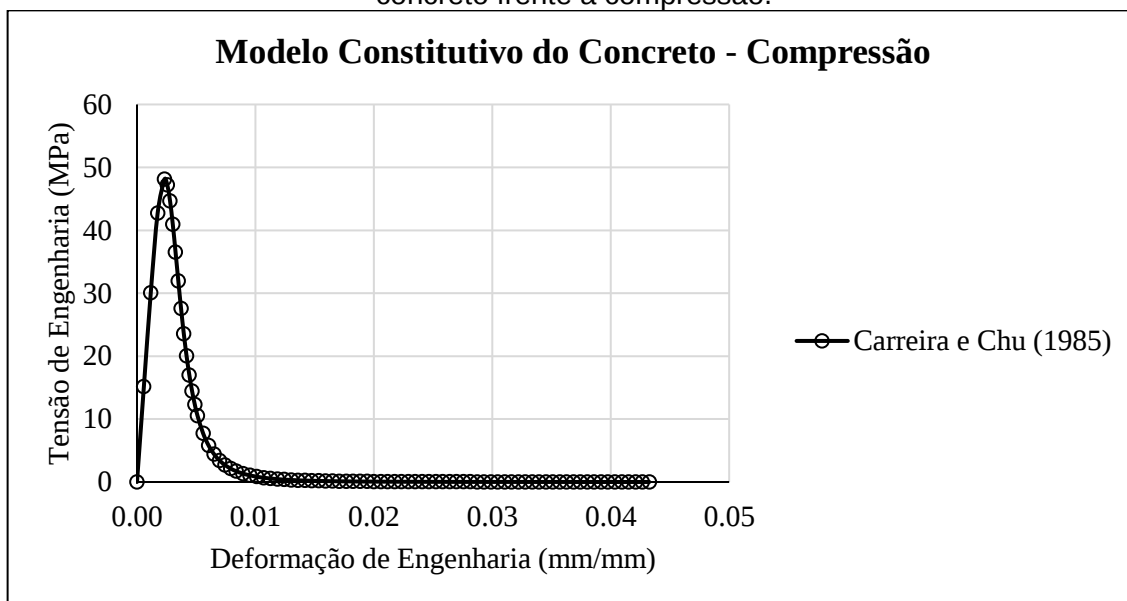
Tabela 7: Comportamento à compressão do concreto (Carreira e Chu, 1985) e dano (Yu et al, 2010).

Carreira e Chu, 1985 - Compressão								
$\varepsilon_{Eng}/\varepsilon_{c1}$	ε_{Eng}	$f_{c,Eng}$ (MPa)	$f_{c,True}$ (MPa)	ε_{True}	$\varepsilon_{Elastica}$	$\varepsilon_{Plástica}$	Dano	$\varepsilon_{Plástica}$
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.000000		
0.25000	0.00058	15.16638	15.17520	0.00058	0.00043	0.000000		
0.50000	0.00116	30.06456	30.09952	0.00116	0.00085	0.000308		
0.75000	0.00174	42.72193	42.79645	0.00174	0.00121	0.000528		
1.00000	0.00233	48.10000	48.21187	0.00232	0.00137	0.000955	0.00000	0.000000
1.10000	0.00256	47.19934	47.32009	0.00256	0.00134	0.001212	0.01850	0.001212
1.20000	0.00279	44.66902	44.79368	0.00279	0.00127	0.001516	0.07090	0.001516
1.30000	0.00302	40.93687	41.06064	0.00302	0.00117	0.001854	0.14833	0.001854
1.40000	0.00326	36.53599	36.65495	0.00325	0.00104	0.002211	0.23971	0.002211
1.50000	0.00349	31.95668	32.06817	0.00348	0.00091	0.002573	0.33485	0.002573
1.60000	0.00372	27.55851	27.66106	0.00371	0.00078	0.002929	0.42626	0.002929
1.70000	0.00395	23.55344	23.64656	0.00395	0.00067	0.003275	0.50953	0.003275
1.80000	0.00419	20.03310	20.11697	0.00418	0.00057	0.003607	0.58274	0.003607
1.90000	0.00442	17.00906	17.08422	0.00441	0.00048	0.003924	0.64564	0.003924
2.00000	0.00465	14.44814	14.51535	0.00464	0.00041	0.004229	0.69893	0.004229
2.10000	0.00488	12.29714	12.35720	0.00487	0.00035	0.004522	0.74369	0.004522
2.20000	0.00512	10.49765	10.55136	0.00510	0.00030	0.004804	0.78115	0.004804
2.40000	0.00558	7.73624	7.77942	0.00557	0.00022	0.005346	0.83864	0.005346
2.60000	0.00605	5.79592	5.83097	0.00603	0.00017	0.005863	0.87906	0.005863
2.80000	0.00651	4.41505	4.44380	0.00649	0.00013	0.006365	0.90783	0.006365
3.00000	0.00698	3.41684	3.44068	0.00695	0.00010	0.006855	0.92863	0.006855
3.20000	0.00744	2.68341	2.70338	0.00741	0.00008	0.007338	0.94393	0.007338
3.40000	0.00791	2.13592	2.15281	0.00788	0.00006	0.007815	0.95535	0.007815
3.60000	0.00837	1.72106	1.73547	0.00834	0.00005	0.008289	0.96400	0.008289
3.85000	0.00895	1.33445	1.34640	0.00891	0.00004	0.008876	0.97207	0.008876
4.10000	0.00954	1.05081	1.06083	0.00949	0.00003	0.009460	0.97800	0.009460
4.35000	0.01012	0.83895	0.84744	0.01007	0.00002	0.010042	0.98242	0.010042
4.60000	0.01070	0.67813	0.68538	0.01064	0.00002	0.010622	0.98578	0.010622
4.85000	0.01128	0.55425	0.56050	0.01122	0.00002	0.011201	0.98837	0.011201
5.10000	0.01186	0.45757	0.46300	0.01179	0.00001	0.011778	0.99040	0.011778
5.35000	0.01244	0.38120	0.38595	0.01237	0.00001	0.012355	0.99199	0.012355
5.60000	0.01302	0.32022	0.32439	0.01294	0.00001	0.012931	0.99327	0.012931
5.85000	0.01361	0.27104	0.27473	0.01351	0.00001	0.013506	0.99430	0.013506
6.10000	0.01419	0.23101	0.23429	0.01409	0.00001	0.014081	0.99514	0.014081
6.35000	0.01477	0.19816	0.20109	0.01466	0.00001	0.014655	0.99583	0.014655
6.60000	0.01535	0.17099	0.17361	0.01523	0.00000	0.015228	0.99640	0.015228
6.85000	0.01593	0.14835	0.15071	0.01581	0.00000	0.015802	0.99687	0.015802
7.10000	0.01651	0.12936	0.13150	0.01638	0.00000	0.016374	0.99727	0.016374
7.35000	0.01709	0.11334	0.11528	0.01695	0.00000	0.016947	0.99761	0.016947
7.60000	0.01768	0.09974	0.10151	0.01752	0.00000	0.017518	0.99789	0.017518

7.85000	0.01826	0.08814	0.08975	0.01809	0.00000	0.018090	0.99814	0.018090
8.10000	0.01884	0.07819	0.07966	0.01866	0.00000	0.018661	0.99835	0.018661
8.35000	0.01942	0.06962	0.07097	0.01923	0.00000	0.019232	0.99853	0.019232
8.60000	0.02000	0.06219	0.06344	0.01980	0.00000	0.019802	0.99868	0.019802
8.85000	0.02058	0.05574	0.05689	0.02037	0.00000	0.020372	0.99882	0.020372
9.10000	0.02116	0.05011	0.05118	0.02094	0.00000	0.020942	0.99894	0.020942
9.35000	0.02175	0.04518	0.04617	0.02151	0.00000	0.021511	0.99904	0.021511
9.60000	0.02233	0.04085	0.04176	0.02208	0.00000	0.022080	0.99913	0.022080
9.85000	0.02291	0.03703	0.03788	0.02265	0.00000	0.022649	0.99921	0.022649
10.10000	0.02349	0.03365	0.03444	0.02322	0.00000	0.023217	0.99929	0.023217
10.35000	0.02407	0.03064	0.03138	0.02379	0.00000	0.023785	0.99935	0.023785
10.60000	0.02465	0.02797	0.02866	0.02435	0.00000	0.024353	0.99941	0.024353
10.85000	0.02523	0.02559	0.02623	0.02492	0.00000	0.024921	0.99946	0.024921
11.10000	0.02582	0.02345	0.02406	0.02549	0.00000	0.025488	0.99950	0.025488
11.35000	0.02640	0.02154	0.02211	0.02605	0.00000	0.026054	0.99954	0.026054
11.60000	0.02698	0.01982	0.02035	0.02662	0.00000	0.026621	0.99958	0.026621
11.85000	0.02756	0.01827	0.01877	0.02719	0.00000	0.027187	0.99961	0.027187
12.10000	0.02814	0.01687	0.01734	0.02775	0.00000	0.027752	0.99964	0.027752
12.35000	0.02872	0.01560	0.01605	0.02832	0.00000	0.028318	0.99967	0.028318
12.60000	0.02930	0.01445	0.01487	0.02888	0.00000	0.028883	0.99969	0.028883
12.85000	0.02989	0.01340	0.01380	0.02945	0.00000	0.029448	0.99971	0.029448
13.10000	0.03047	0.01245	0.01283	0.03001	0.00000	0.030012	0.99973	0.030012
13.35000	0.03105	0.01158	0.01194	0.03058	0.00000	0.030576	0.99975	0.030576
13.60000	0.03163	0.01079	0.01113	0.03114	0.00000	0.031140	0.99977	0.031140
13.85000	0.03221	0.01007	0.01039	0.03170	0.00000	0.031703	0.99978	0.031703
14.10000	0.03279	0.00940	0.00971	0.03227	0.00000	0.032267	0.99980	0.032267
14.35000	0.03337	0.00879	0.00908	0.03283	0.00000	0.032829	0.99981	0.032829
14.60000	0.03396	0.00823	0.00851	0.03339	0.00000	0.033392	0.99982	0.033392
14.85000	0.03454	0.00771	0.00798	0.03395	0.00000	0.033954	0.99983	0.033954
15.10000	0.03512	0.00723	0.00749	0.03452	0.00000	0.034516	0.99984	0.034516
15.35000	0.03570	0.00679	0.00704	0.03508	0.00000	0.035078	0.99985	0.035078
15.60000	0.03628	0.00639	0.00662	0.03564	0.00000	0.035639	0.99986	0.035639
15.85000	0.03686	0.00601	0.00623	0.03620	0.00000	0.036200	0.99987	0.036200
16.10000	0.03744	0.00566	0.00587	0.03676	0.00000	0.036760	0.99988	0.036760
16.35000	0.03803	0.00534	0.00554	0.03732	0.00000	0.037321	0.99989	0.037321
16.60000	0.03861	0.00504	0.00523	0.03788	0.00000	0.037881	0.99989	0.037881
16.85000	0.03919	0.00476	0.00494	0.03844	0.00000	0.038440	0.99990	0.038440
17.10000	0.03977	0.00450	0.00468	0.03900	0.00000	0.039000	0.99990	0.039000
17.35000	0.04035	0.00425	0.00443	0.03956	0.00000	0.039559	0.99991	0.039559
17.60000	0.04093	0.00403	0.00419	0.04012	0.00000	0.040117	0.99991	0.040117
17.85000	0.04151	0.00382	0.00398	0.04068	0.00000	0.040676	0.99992	0.040676
18.10000	0.04210	0.00362	0.00377	0.04123	0.00000	0.041234	0.99992	0.041234
18.35000	0.04268	0.00343	0.00358	0.04179	0.00000	0.041792	0.99993	0.041792
18.60000	0.04326	0.00326	0.00340	0.04235	0.00000	0.042349	0.99993	0.042349

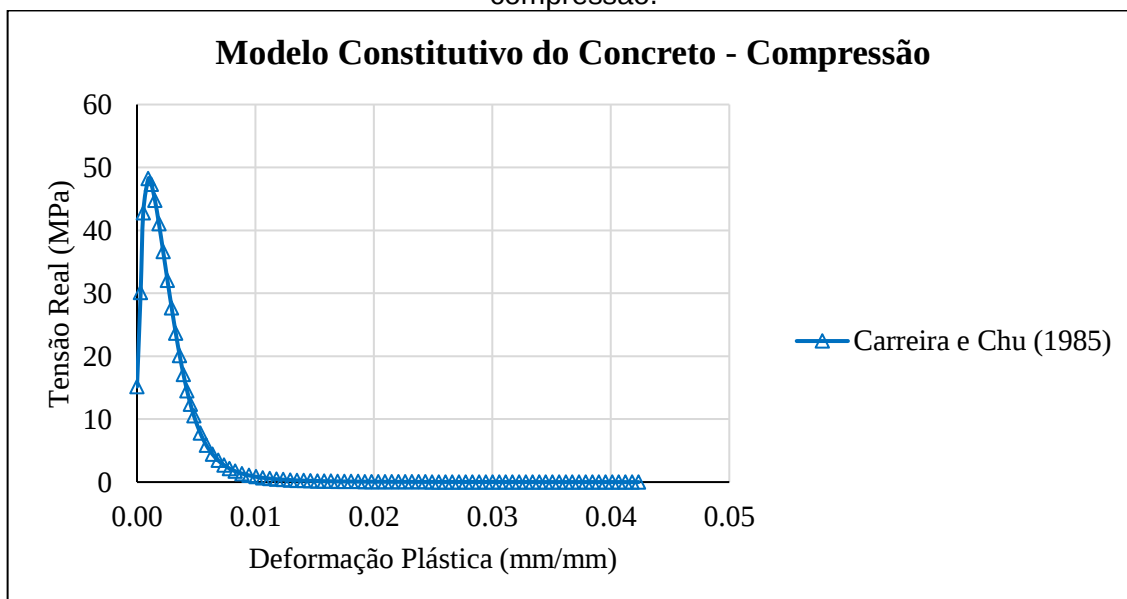
Fonte: Autoria própria.

Figura 46: Curva tensão de engenharia-deformação de engenharia para o núcleo de concreto frente à compressão.



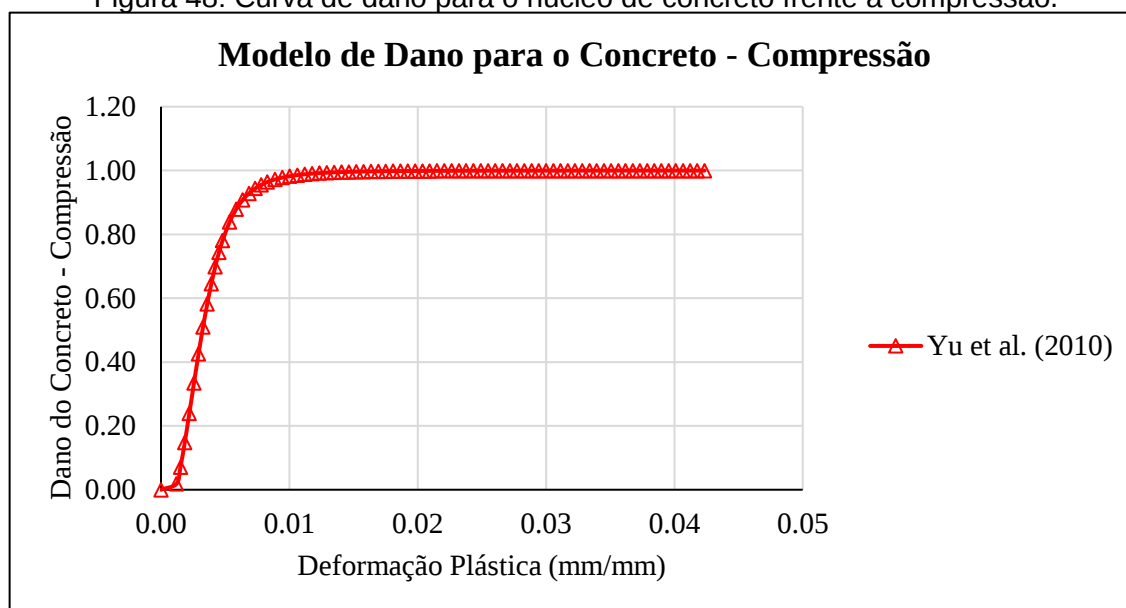
Fonte: Autoria própria.

Figura 47: curva tensão de real-deformação plástica para o núcleo de concreto frente à compressão.



Fonte: Autoria própria.

Figura 48: Curva de dano para o núcleo de concreto frente à compressão.



Fonte: Autoria própria

Tabela 8: Comportamento à tração do concreto (Carreira e Chu, 1985) e dano (Yu et. al, 2010).

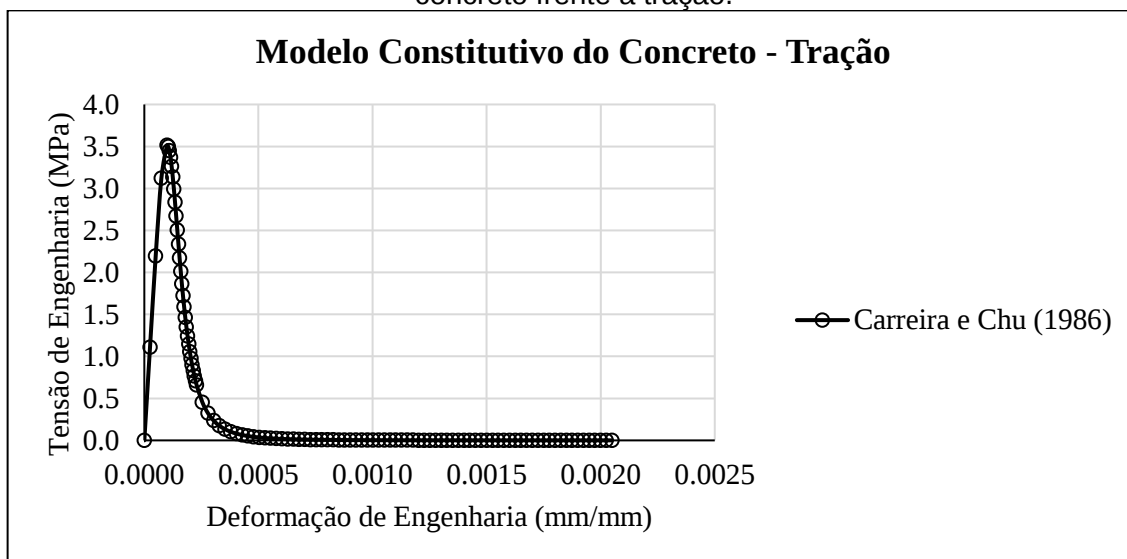
Carreira e Chu, 1986 - Tração								
$\epsilon_{Eng}/\epsilon_t$	ϵ_{Eng}	$f_{t,Eng}$ (MPa)	$f_{t,True}$ (MPa)	ϵ_{True}	$\epsilon_{Elastica}$	$\epsilon_{Plástica}$	<i>Dano</i>	$\epsilon_{Plástica}$
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.000000		
0.25000	0.00002	1.10821	1.10823	0.00002	0.00003	0.000000		
0.50000	0.00005	2.19682	2.19693	0.00005	0.00006	0.000000		
0.75000	0.00007	3.12169	3.12192	0.00007	0.00009	0.000000		
1.00000	0.00010	3.51467	3.51502	0.00010	0.00010	0.000000	0.00000	0.000000
1.05000	0.00010	3.49799	3.49835	0.00010	0.00010	0.000005	0.00474	0.000005
1.10000	0.00011	3.44886	3.44923	0.00011	0.00010	0.000012	0.01871	0.000012
1.15000	0.00011	3.36966	3.37005	0.00011	0.00010	0.000019	0.04124	0.000019
1.20000	0.00012	3.26396	3.26436	0.00012	0.00009	0.000027	0.07131	0.000027
1.25000	0.00012	3.13619	3.13658	0.00012	0.00009	0.000036	0.10766	0.000036
1.30000	0.00013	2.99126	2.99164	0.00013	0.00008	0.000045	0.14890	0.000045
1.35000	0.00013	2.83416	2.83454	0.00013	0.00008	0.000054	0.19359	0.000054
1.40000	0.00014	2.66968	2.67006	0.00014	0.00008	0.000064	0.24039	0.000064
1.45000	0.00014	2.50211	2.50247	0.00014	0.00007	0.000074	0.28806	0.000074
1.50000	0.00015	2.33507	2.33542	0.00015	0.00007	0.000083	0.33559	0.000083
1.55000	0.00015	2.17153	2.17186	0.00015	0.00006	0.000093	0.38212	0.000093
1.60000	0.00016	2.01370	2.01402	0.00016	0.00006	0.000102	0.42702	0.000102
1.65000	0.00016	1.86319	1.86350	0.00016	0.00005	0.000112	0.46985	0.000112
1.70000	0.00017	1.72105	1.72134	0.00017	0.00005	0.000121	0.51029	0.000121
1.75000	0.00017	1.58785	1.58813	0.00017	0.00005	0.000129	0.54819	0.000129
1.80000	0.00018	1.46382	1.46408	0.00018	0.00004	0.000138	0.58348	0.000138
1.85000	0.00018	1.34890	1.34915	0.00018	0.00004	0.000146	0.61618	0.000146

1.90000	0.00019	1.24285	1.24309	0.00019	0.00004	0.000154	0.64635	0.000154
1.95000	0.00019	1.14528	1.14551	0.00019	0.00003	0.000162	0.67411	0.000162
2.00000	0.00020	1.05573	1.05594	0.00020	0.00003	0.000169	0.69959	0.000169
2.05000	0.00020	0.97366	0.97386	0.00020	0.00003	0.000177	0.72294	0.000177
2.10000	0.00021	0.89855	0.89874	0.00021	0.00003	0.000184	0.74431	0.000184
2.15000	0.00021	0.82986	0.83004	0.00021	0.00002	0.000191	0.76386	0.000191
2.20000	0.00022	0.76706	0.76723	0.00022	0.00002	0.000198	0.78173	0.000198
2.25000	0.00022	0.70966	0.70982	0.00022	0.00002	0.000204	0.79806	0.000204
2.30000	0.00023	0.65718	0.65734	0.00023	0.00002	0.000211	0.81299	0.000211
2.55000	0.00025	0.45450	0.45461	0.00025	0.00001	0.000241	0.87067	0.000241
2.80000	0.00028	0.32261	0.32270	0.00028	0.00001	0.000270	0.90819	0.000270
3.05000	0.00030	0.23472	0.23479	0.00030	0.00001	0.000297	0.93320	0.000297
3.30000	0.00033	0.17465	0.17471	0.00033	0.00000	0.000324	0.95030	0.000324
3.55000	0.00035	0.13259	0.13264	0.00035	0.00000	0.000350	0.96227	0.000350
3.80000	0.00038	0.10247	0.10250	0.00038	0.00000	0.000376	0.97084	0.000376
4.05000	0.00040	0.08045	0.08048	0.00040	0.00000	0.000402	0.97710	0.000402
4.30000	0.00043	0.06406	0.06409	0.00043	0.00000	0.000427	0.98177	0.000427
4.55000	0.00045	0.05166	0.05168	0.00045	0.00000	0.000452	0.98530	0.000452
4.80000	0.00048	0.04213	0.04215	0.00048	0.00000	0.000477	0.98801	0.000477
5.05000	0.00050	0.03472	0.03473	0.00050	0.00000	0.000503	0.99012	0.000503
5.30000	0.00053	0.02887	0.02889	0.00053	0.00000	0.000528	0.99178	0.000528
5.55000	0.00055	0.02421	0.02423	0.00055	0.00000	0.000553	0.99311	0.000553
5.80000	0.00058	0.02046	0.02048	0.00058	0.00000	0.000578	0.99417	0.000578
6.05000	0.00060	0.01742	0.01743	0.00060	0.00000	0.000603	0.99504	0.000603
6.30000	0.00063	0.01492	0.01493	0.00063	0.00000	0.000628	0.99575	0.000628
6.55000	0.00065	0.01286	0.01287	0.00065	0.00000	0.000653	0.99634	0.000653
6.80000	0.00068	0.01115	0.01115	0.00068	0.00000	0.000678	0.99683	0.000678
7.05000	0.00070	0.00971	0.00972	0.00070	0.00000	0.000703	0.99724	0.000703
7.30000	0.00073	0.00850	0.00851	0.00073	0.00000	0.000728	0.99758	0.000728
7.55000	0.00075	0.00747	0.00748	0.00075	0.00000	0.000752	0.99787	0.000752
7.80000	0.00078	0.00660	0.00660	0.00078	0.00000	0.000777	0.99812	0.000777
8.05000	0.00080	0.00585	0.00585	0.00080	0.00000	0.000802	0.99833	0.000802
8.30000	0.00083	0.00520	0.00521	0.00083	0.00000	0.000827	0.99852	0.000827
8.55000	0.00085	0.00465	0.00465	0.00085	0.00000	0.000852	0.99868	0.000852
8.80000	0.00088	0.00416	0.00417	0.00088	0.00000	0.000877	0.99881	0.000877
9.05000	0.00090	0.00374	0.00374	0.00090	0.00000	0.000902	0.99894	0.000902
9.30000	0.00093	0.00337	0.00337	0.00093	0.00000	0.000927	0.99904	0.000927
9.55000	0.00095	0.00305	0.00305	0.00095	0.00000	0.000952	0.99913	0.000952
9.80000	0.00098	0.00276	0.00276	0.00098	0.00000	0.000977	0.99921	0.000977
10.05000	0.00100	0.00251	0.00251	0.00100	0.00000	0.001002	0.99929	0.001002
10.30000	0.00103	0.00228	0.00228	0.00103	0.00000	0.001027	0.99935	0.001027
10.55000	0.00105	0.00208	0.00208	0.00105	0.00000	0.001052	0.99941	0.001052
10.80000	0.00108	0.00190	0.00191	0.00108	0.00000	0.001076	0.99946	0.001076
11.05000	0.00110	0.00174	0.00175	0.00110	0.00000	0.001101	0.99950	0.001101
11.30000	0.00113	0.00160	0.00160	0.00113	0.00000	0.001126	0.99954	0.001126

11.55000	0.00115	0.00147	0.00147	0.00115	0.00000	0.001151	0.99958	0.001151
11.80000	0.00118	0.00136	0.00136	0.00118	0.00000	0.001176	0.99961	0.001176
12.05000	0.00120	0.00125	0.00125	0.00120	0.00000	0.001201	0.99964	0.001201
12.30000	0.00123	0.00116	0.00116	0.00123	0.00000	0.001226	0.99967	0.001226
12.55000	0.00125	0.00107	0.00107	0.00125	0.00000	0.001251	0.99969	0.001251
12.80000	0.00128	0.00099	0.00100	0.00128	0.00000	0.001276	0.99972	0.001276
13.05000	0.00130	0.00092	0.00092	0.00130	0.00000	0.001301	0.99974	0.001301
13.30000	0.00133	0.00086	0.00086	0.00133	0.00000	0.001325	0.99976	0.001325
13.55000	0.00135	0.00080	0.00080	0.00135	0.00000	0.001350	0.99977	0.001350
13.80000	0.00138	0.00075	0.00075	0.00138	0.00000	0.001375	0.99979	0.001375
14.05000	0.00140	0.00070	0.00070	0.00140	0.00000	0.001400	0.99980	0.001400
14.30000	0.00143	0.00065	0.00065	0.00143	0.00000	0.001425	0.99981	0.001425
14.55000	0.00145	0.00061	0.00061	0.00145	0.00000	0.001450	0.99983	0.001450
14.80000	0.00148	0.00057	0.00057	0.00147	0.00000	0.001475	0.99984	0.001475
15.05000	0.00150	0.00054	0.00054	0.00150	0.00000	0.001500	0.99985	0.001500
15.30000	0.00153	0.00050	0.00050	0.00152	0.00000	0.001525	0.99986	0.001525
15.55000	0.00155	0.00047	0.00047	0.00155	0.00000	0.001550	0.99987	0.001550
15.80000	0.00158	0.00044	0.00045	0.00157	0.00000	0.001574	0.99987	0.001574
16.05000	0.00160	0.00042	0.00042	0.00160	0.00000	0.001599	0.99988	0.001599
16.30000	0.00163	0.00039	0.00040	0.00162	0.00000	0.001624	0.99989	0.001624
16.55000	0.00165	0.00037	0.00037	0.00165	0.00000	0.001649	0.99989	0.001649
16.80000	0.00168	0.00035	0.00035	0.00167	0.00000	0.001674	0.99990	0.001674
17.05000	0.00170	0.00033	0.00033	0.00170	0.00000	0.001699	0.99991	0.001699
17.30000	0.00173	0.00031	0.00031	0.00172	0.00000	0.001724	0.99991	0.001724
17.55000	0.00175	0.00030	0.00030	0.00175	0.00000	0.001749	0.99992	0.001749
17.80000	0.00178	0.00028	0.00028	0.00177	0.00000	0.001774	0.99992	0.001774
18.05000	0.00180	0.00027	0.00027	0.00180	0.00000	0.001798	0.99992	0.001798
18.30000	0.00183	0.00025	0.00025	0.00182	0.00000	0.001823	0.99993	0.001823
18.55000	0.00185	0.00024	0.00024	0.00185	0.00000	0.001848	0.99993	0.001848
18.80000	0.00187	0.00023	0.00023	0.00187	0.00000	0.001873	0.99993	0.001873
19.05000	0.00190	0.00022	0.00022	0.00190	0.00000	0.001898	0.99994	0.001898
19.30000	0.00192	0.00021	0.00021	0.00192	0.00000	0.001923	0.99994	0.001923
19.55000	0.00195	0.00020	0.00020	0.00195	0.00000	0.001948	0.99994	0.001948
19.80000	0.00197	0.00019	0.00019	0.00197	0.00000	0.001973	0.99995	0.001973
20.05000	0.00200	0.00018	0.00018	0.00200	0.00000	0.001998	0.99995	0.001998
20.30000	0.00202	0.00017	0.00017	0.00202	0.00000	0.002022	0.99995	0.002022
20.55000	0.00205	0.00016	0.00016	0.00205	0.00000	0.002047	0.99995	0.002047

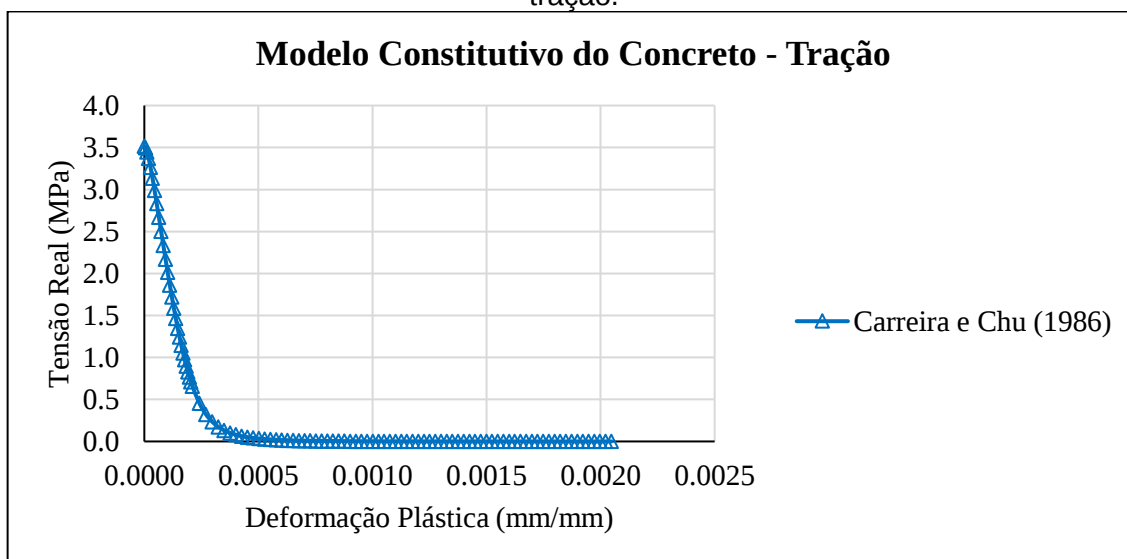
Fonte: Autoria própria.

Figura 49: Curva tensão de engenharia-deformação de engenharia para o núcleo de concreto frente à tração.



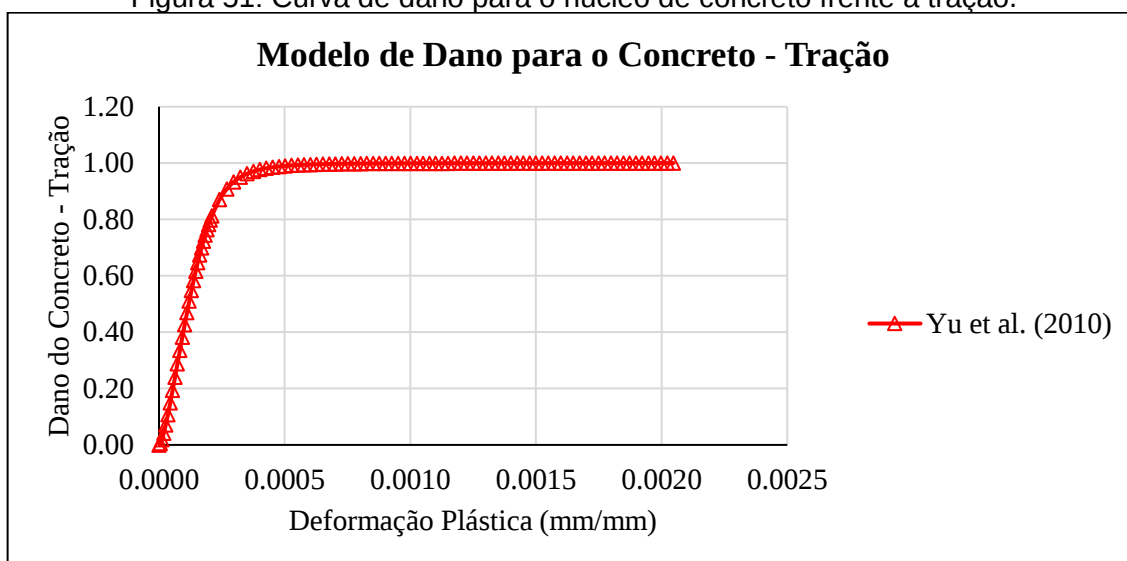
Fonte: Autoria própria.

Figura 50: Curva tensão de real-deformação plástica para o núcleo de concreto frente à tração.



Fonte: Autoria própria.

Figura 51: Curva de dano para o núcleo de concreto frente à tração.



Fonte: Autoria própria.