

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

FERNANDA GABRIELLA BATISTA SANTOS OLIVEIRA

**Análise experimental e numérica do comportamento à flexão de vigas  
formadas por perfis de aço parcialmente revestidas com concreto de  
resíduos reciclados de concreto**

SÃO CARLOS  
2022



FERNANDA GABRIELLA BATISTA SANTOS OLIVEIRA

**Análise experimental e numérica do comportamento à flexão de vigas formadas por perfis de aço parcialmente revestidas com concreto de resíduos reciclados de concreto**

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Estruturas

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs

SÃO CARLOS  
2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes  
da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Oliveira, Fernanda Gabriella Batista Santos  
048a Análise experimental e numérica do comportamento  
à flexão de vigas formadas por perfis de aço  
parcialmente revestidas com concreto de resíduos  
reciclados de concreto / Fernanda Gabriella Batista  
Santos Oliveira; orientadora Ana Lúcia Homce de Cresce  
El Debs. São Carlos, 2022.

Dissertação (Mestrado) - Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de  
Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2022.

1. Vigas mistas parcialmente revestidas. 2.  
concreto de resíduos reciclados de concreto.3.  
comportamento à flexão.4. análise experimental.5.  
análise numérica. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela **FERNANDA GABRIELLA BATISTA SANTOS OLIVEIRA.**

Título da dissertação: "Análise experimental e numérica do comportamento à flexão de vigas formadas por perfis de aço parcialmente revestidas com concreto de resíduos reciclados de concreto".

Data da defesa: 11/05/2022.

### **Comissão Julgadora**

### **Resultado**

Prof. Associada **Ana Lucia Homce de Cresce El Debs**  
**(Orientadora)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

APROVADA

Prof. Dr. **Daniel de Lima Araújo**  
(Universidade Federal de Goiás/UFG)

APROVADA

Prof. Dr. **Alex Sander Clemente de Souza**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
(Engenharia de Estruturas):

Prof. Associado **Vladimir Guilherme Haach**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha família. Em especial aos meus pais Amilton Santos Oliveira e Antônia Vânia Batista e ao meu irmão Gustavo Oliveira por todo amor, incentivo e confiança ao longo da vida, por me permitirem seguir meus maiores anseios contando com seu apoio.

À minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs, pela oportunidade de trabalhar com o tema e pela disponibilidade em me orientar durante o mestrado. Sou muito grata pela confiança, paciência e compreensão.

Aos professores Vladimir Haach e Silvana De Nardin por todas sugestões dadas no exame de qualificação.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) da EESC-USP, pela atenção e todas as orientações, em especial aos técnicos do Laboratório de Estruturas (LE): Amaury, Mauri, Romeu, Luiz Vareda e Fabiano, essenciais para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus amigos de mestrado, por serem imprescindíveis na minha formação. Em especial gostaria de agradecer ao Bruno Bianchi Marques pela parceria no desenvolvimento da pesquisa e pela amizade construída. Agradeço também ao Felipe Duarte, Slivanna, Lilliane, Filipe Malaquias, José Renan, Adrielle, Jezreel, Larissa e João Vitor pelo companheirismo.

Aos amigos que São Carlos e o SET me presentearam, Marcela, Yagho, Felipi Damasceno, Jéssica, Vitor, Alex, Lucas e Matheus. Muito obrigada por todo acolhimento, atenção e carinho.

Aos meus amigos, Juliana Castelo, Nayara, Myrella, Daniele, Marília, Juliana Tanabe e Lucas. Agradeço por me inspirarem sempre a ser alguém melhor e acreditar nos meus sonhos. Obrigada por serem parte de tudo isso comigo.

À Synara Tavares por todo suporte durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA) pela formação em Engenharia Civil, em especial ao Prof. Luís Fernando Sampaio Soares, pela orientação durante e após a graduação.

À Itaquareia pela doação dos agregados reciclados utilizados durante investigação experimental.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação e desenvolvimento, estejam certos que são muito importantes em todo meu processo de amadurecimento pessoal e profissional.





*For most of History, anonymous was a woman.*

*Pela maior parte da História, anônimo foi uma mulher.*

Virginia Woolf



## RESUMO

OLIVEIRA, F.G.B.S. **Análise experimental e numérica do comportamento à flexão de vigas formadas por perfis de aço parcialmente revestidas com concreto de resíduos reciclados de concreto.** 2022. 173 p. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

O avanço da engenharia civil pode ser observado através da expressiva geração de resíduos de construção e demolição. Uma forma de melhorar a destinação desses materiais é através de sua incorporação na produção de concretos. A evolução do setor da construção civil também perpassa pela otimização de processos e consequente adoção de diferentes elementos estruturais, como a utilização de vigas mistas de aço e concreto, que tem ganhado popularidade nas últimas décadas. Uma de suas tipologias são as vigas mistas parcialmente revestidas, onde o embutimento do concreto no perfil metálico garante aumento de rigidez comparada à seção de aço isolada, além de melhorias no comportamento sísmico e ao fogo. No entanto, um dos grandes desafios inerentes às estruturas mistas se encontra no estabelecimento de uma eficiente interação entre os materiais. Esse desafio é mais evidenciado ao tratar-se de concreto de resíduos reciclados de concreto, onde vertentes da literatura apresentam conclusões controversas a respeito de sua influência no comportamento misto da estrutura. Além disso, devido à origem dos agregados reciclados, estudos têm apresentado pontuações conflitantes no que tange à redução das propriedades mecânicas do concreto ao comparar com os produzidos com agregado natural. Ao aliar o concreto reciclado ao perfil metálico garante-se um melhor desempenho dos dois materiais. Assim, esse trabalho teve como objetivo principal desenvolver um estudo experimental e numérico de vigas mistas parcialmente revestidas com concreto de resíduos reciclados de concreto com conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça (*stud bolts*) posicionados horizontalmente na alma do perfil. O estudo englobou um programa experimental composto por duas etapas principais. A primeira configurou uma análise preliminar de caracterização das principais propriedades de concretos com quatro teores de substituição (0%, 30%, 50% e 100%) de agregados naturais por agregados graúdos reciclados, para escolha do teor a ser aplicado na viga mista. A segunda etapa contemplou um ensaio de flexão a quatro pontos, com o intuito de analisar o comportamento estrutural e capacidade resistente do elemento estudado. Uma análise numérica também foi realizada por meio do pacote computacional de elementos finitos, ABAQUS. Os resultados apontaram que, em comparação ao concreto convencional, o reciclado apresentou propriedades mecânicas ligeiramente inferiores, porém pouca influência na capacidade resistente da viga e no estabelecimento de um eficiente comportamento misto. A fim de ampliar as análises, um estudo paramétrico foi desenvolvido. Avaliou-se a influência de propriedades geométricas do perfil metálico, do tipo de concreto e da tensão de escoamento do aço na capacidade resistente da viga mista. Dentre esses parâmetros, a altura do perfil metálico e a espessura da mesa foram os mais significantes no que diz respeito à força máxima. Assim, esse estudo possuiu um cunho exploratório em relação às vigas mistas parcialmente revestidas com concreto reciclado, apresentando resultados satisfatórios no que se refere ao comportamento à flexão do elemento estrutural.

**Palavras-chave:** Vigas mistas parcialmente revestidas; concreto de resíduos reciclados de concreto; comportamento à flexão; análise experimental; análise numérica.



## ABSTRACT

OLIVEIRA, F.G.B.S. **Experimental and numerical analysis of the flexural behavior of steel beams partially encased with recycled aggregate concrete.** 2022. 173 p. Dissertation (M. Sc. in Civil Engineering (Structural Engineering)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2022.

The advance in civil engineering can be noticed through the significant generation of construction and demolition waste. One approach to providing a better destination for these materials is through their incorporation into the production of concrete. The evolution of the civil construction sector also involves the optimization of construction processes and the consequent adoption of different structural elements, such as the use of steel-concrete composite beams, which has gained popularity in recent decades. One of its typologies is the partially encased composite beam, which guarantees an increase in rigidity compared to the isolated steel section, in addition to improvements in seismic and fire behavior. However, one of the great challenges inherent to composite structures is the establishment of efficient interaction between steel and concrete. This challenge is more evident concerning concrete produced with recycled aggregates, where strands of the literature present controversial conclusions regarding the influence of this concrete on the structure's composite behavior. In addition, due to the origin of recycled aggregates, studies have presented conflicting conclusions regarding the reduction of concrete's mechanical properties, in comparison to those produced with natural aggregate. By associating recycled concrete with the steel profile by its partial encasement, better performance of both materials is granted. Thus, this work aimed to investigate, through experimental and numerical analysis, the behavior of composite beams partially encased with recycled aggregate concrete, with shear connectors (stud bolts) horizontally welded on the faces of the web of the steel beam. The study encompassed an experimental program composed of two main stages. The first one contemplated a preliminary analysis to characterize the main properties of concretes with four replacement ratios (0%, 30%, 50%, and 100%) of natural aggregates by recycled coarse aggregates, focused on choosing the replacement ratio to be applied in the partially encased composite beam. Consequently, the second stage was a four-point bending test, to analyze the structural behavior and capacity of the studied element. Numerical analysis was also performed using the finite element computational package, ABAQUS. The results showed that, compared to conventional concrete, the one produced with recycled aggregates presented slightly lower mechanical properties, but little influence on the structural capacity and on the establishment of an efficient composite behavior of the beam. In order to expand the analyses, a parametric study was developed. The influence of geometric properties of the steel profile, the type of concrete, and the yield strength of the steel were evaluated in terms of the structural capacity of the composite beam. Among those parameters, the height of the steel profile and the thickness of its flange were the most significant in the matter of ultimate capacity. Therefore, this study has an exploratory nature about partially encased composite beams with recycled concrete, presenting satisfactory results regarding the flexural behavior of the structural element.

**Keywords:** Partially encased composite beams; recycled aggregate concrete; flexural behavior; experimental analysis; numerical analysis.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplos de vigas mistas (a) Convencional (b) Totalmente rev. (c) Parcialmente rev. ....	31
Figura 2.1 – (a) Diagrama esquemático do concreto de ARC (b) Microscopia das fases presentes no concreto reciclado .....	38
Figura 2.2 – Microscopia eletrônica de varredura do concreto convencional e reciclado (a) Concreto convencional (b) Concreto reciclado com teor de subst. de 25% (c) Concreto reciclado com teor de subst. de 50 % .....	39
Figura 2.3 – Esquema do processo de mistura proposto por Leite (2001) .....	40
Figura 2.4 – Esquema do processo de mistura proposto por Tam, Gao e Tam (2005) .....	41
Figura 2.5 – Dimensões (mm) e esquema de carregamento das vigas ensaiadas.....	47
Figura 2.6 – Padrões de fissuração e capacidade resistente de vigas (a) Com agregados naturais (b) Com agregados graúdos reciclados e miúdos naturais (c) Com agregados graúdos e miúdos reciclados .....	47
Figura 2.7 – Curvas Força aplicada x Deslocamento para os diferentes tipos de concreto e taxa de armadura longitudinal .....	49
Figura 2.8 – Plano de fissuração no terço médio do vão, para vigas com taxa de armadura igual a 1,46% (a) Com agregados naturais (b) Cm agregados graúdos reciclados - Teor de substituição: 50% (c) Com agregados graúdos reciclados - Teor de substituição: 100%).....	50
Figura 2.9 - Curvas Força x Deslocamento para vigas ensaiadas em Hamad <i>et al.</i> (2018) ....	52
Figura 2.10 – Modos de falha do concreto no meio vão das vigas estudadas em Yang e Han (2006) .....	54
Figura 2.11 – Curvas Momento x Deslocamento vertical no meio do vão das vigas estudadas em Yang e Han (2006).....	55
Figura 2.12 – Plano de fissuração de viga ensaiada em Jia <i>et al.</i> (2013) .....	56
Figura 2.13 – Exemplos de seções transversais de VMPR (a) Com conector de cisalhamento (b) Com armadura.....	61
Figura 2.14 – Ensaio de cisalhamento direto segundo o EUROCODE 4 (Dimensões em mm) .....	63
Figura 2.15 – Classificação dos conectores (Diagrama Força aplicada x Deslizamento).....	64
Figura 2.16 – Exemplos de tipos de conectores de cisalhamento (a) Pinos com cabeça (b) Perfis U (c) <i>Perfobond</i> contínuo (d) <i>Crestbond</i> contínuo .....	65

Figura 2.17 – Modelos ensaiados (a) sem conectores (b) conectores horizontais (c) conectores verticais (Dimensões em mm).....	66
Figura 2.18 – Pisos mistos (a) Piso misto convencional (b) Piso misto de pequena altura .....	69
Figura 2.19 – Esquema teórico para cálculo de $M_r$ conforme Kindmann e Bergmann (1993)	75
Figura 2.20 – Esquema teórico para cálculo de $M_r$ conforme Assi, Abed e Hunaiti (2002) ...	76
Figura 2.21 – Esquema teórico para cálculo de $M_r$ conforme De Nardin e El Debs (2009) ...	78
Figura 2.22 – Seção transversal analisada por Limazie e Chen (2015) .....	78
Figura 2.23 – Profundidade de linhas neutra conforme grau de interação entre materiais (a) Interação completa (b) Interação parcial.....	79
Figura 2.24 – Comportamento dos elementos componentes da seção (a) Comportamento no elemento de concreto (b) Comportamento no perfil de aço .....	80
Figura 3.1 – Fluxograma descritivo da investigação experimental .....	83
Figura 3.2 – Seção transversal do modelo de VMPR (Dimensões em mm).....	84
Figura 3.3 – Seção longitudinal do modelo de VMPR (Dimensões em mm).....	85
Figura 3.4 – Separação granulométrica do agregado graúdo natural.....	86
Figura 3.5 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural e limites normativos.....	87
Figura 3.6 – Separação granulométrica do agregado miúdo natural.....	88
Figura 3.7 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural e limites normativos.....	89
Figura 3.8 – Amostra de agregado reciclado .....	90
Figura 3.9 – Grupos analisados a partir de amostra de agregado reciclado .....	91
Figura 3.10 – Separação granulométrica do agregado graúdo reciclado .....	92
Figura 3.11 – Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado e limites normativos .....	93
Figura 3.12 – Comparação entre propriedades do agregado graúdo natural e reciclado .....	94
Figura 3.13 – Dimensões dos corpos de prova metálicos (mm) .....	95
Figura 3.14 – Ensaio de caracterização do aço e ruptura dos corpos de prova.....	95
Figura 3.15 – Corpos de prova moldados na etapa de análise preliminar .....	98
Figura 3.16 – (a) Aparatos utilizados para ensaio (b) Exemplo do procedimento de ensaio de abatimento de tronco de cone.....	98
Figura 3.17 – Resultados de abatimento dos traços estudados durante análise preliminar .....	99
Figura 3.18 – Corpos de prova retificados que foram ensaiados para obtenção de resistência à compressão.....	100
Figura 3.19 – (a) Ensaio de tração por compressão diametral (b) Fissura no corpo de prova após ensaio .....	101



Figura 3.20 – Representação gráfica dos resultados de resistência à compressão e à tração aos 28 dias.....	102
Figura 3.21 – Ensaio não destrutivo para determinação de módulo de elasticidade dinâmico .....	102
Figura 3.22 – Representação gráfica dos resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias .	104
Figura 3.23 – Resumo das propriedades analisadas para os concretos desenvolvidos na análise preliminar .....	104
Figura 3.24 - Esquema de ensaio de flexão a quatro pontos (Dimensões em mm).....	106
Figura 3.25 – Preparação e concretagem do modelo de VMPR.....	106
Figura 3.26 – Adensamento da VMPR e concretagem de corpos de prova .....	107
Figura 3.27 – Instrumentação da viga a ser ensaiada (Dimensões em mm).....	108
Figura 3.28 – Instrumentação da VMPR e esquema de ensaio de flexão (a) Extensômetros no aço e no concreto (b) Esquema do ensaio de flexão em quatro pontos.....	109
Figura 3.29 – Ensaio de abatimento de tronco de cone no CARC-50.....	110
Figura 3.30 – Ensaio de compressão e curvas dos corpos de prova analisados (a) Ensaio de compressão (b) Curvas Tensão x Deformação .....	111
Figura 3.31 – Ensaio de flexão em três pontos em corpo de prova prismático (Dimensões em mm).....	111
Figura 3.32 – Panorama final da VMPR ensaiada (Dimensões em mm).....	115
Figura 3.33 – Curva Força x Deslocamento no meio do vão de acordo com o revestimento da VMPR.....	116
Figura 3.34 – Deslocamentos verticais das VMPR em estudo (a) CARC-50 (b) Concreto convencional e CARC-50.....	117
Figura 3.35 – Comparação entre escorregamentos das vigas analisadas de acordo com o tipo de revestimento (a) Curvas de escorregamento médio inferior e superior (b) Escorregamentos máximos .....	118
Figura 3.36 – Curva Força x Escorregamento máximo da VMPR conforme tipo de revestimento .....	119
Figura 3.37 – Deformações do concreto no meio do vão conforme tipo de revestimento das VMPR.....	120
Figura 3.38 - Deformações no perfil de aço no meio do vão conforme tipo de revestimento das VMPR.....	121
Figura 3.39 - Deformações no meio do vão para VMPR com CARC-50.....	122

Figura 3.40 - Configuração da linha neutra no meio do vão para VMPR com CARC-50 (a) e comparação com elemento revestido com concreto convencional (b) .....	123
Figura 3.41 - LN referente à região de momento fletor constante da VMPR:CARC-50 .....	123
Figura 3.42 - Configuração da linha neutra na região de esforço cortante constante para VMPR com CARC-50 (a) e comparação com elemento revestido com concreto convencional (b).....	124
Figura 4.1 - Fluxograma simplificado das fases da simulação no ABAQUS.....	127
Figura 4.2 - Geometria do modelo de VMPR (a) Viga completa (b) ¼ do modelo de VMPR .....	128
Figura 4.3 - (a) Condições de simetria (b) Condição de acoplamento adotada .....	129
Figura 4.4 - Condições de contorno e deslocamento aplicado (a) Indicação das condições (b) Comprimento e ponto de aplicação de carga .....	130
Figura 4.5 - Elemento C3D8R .....	131
Figura 4.6 – Curva Força aplicada x Deslocamento no meio do vão : Teste de sensibilidade da malha.....	131
Figura 4.7 - Malha adotada no modelo numérico .....	132
Figura 4.8 - Interações de contato entre os componentes do modelo numérico .....	133
Figura 4.9 - Curva Força aplicada x Deslocamento no meio do vão : Teste de Contato.....	134
Figura 4.10 - Representação dos parâmetros do CDP (a) Excentricidade e ângulo de dilatação (b) Parâmetro Kc (c) Tensões de ruptura de compressão e tração biaxiais .....	137
Figura 4.11 - Resposta de ensaios uniaxiais do concreto (a) Compressão (b) Tração .....	138
Figura 4.12 - Comportamento do concreto à compressão .....	139
Figura 4.13 – Curvas Tensão x Deformação à compressão (a) CARC-50 (b) Adotadas numericamente para concreto convencional e CARC-50.....	140
Figura 4.14 - Gráfico Tensão x Deformação à tração adotadas para o concreto convencional e CARC-50 .....	141
Figura 4.15 - Diagrama Tensão x Deformação dos perfis de aço.....	142
Figura 4.16 - Curva Força aplicada x Deslocamento vertical no meio do vão para VMPR com concreto convencional.....	144
Figura 4.17 - Panorama principal de fissuração do modelo numérico e experimental de VMPR com concreto convencional (a) Modelo numérico (b) Modelo experimental.....	145
Figura 4.18 - Distribuição de tensões do modelo numérico para VMPR com concreto convencional (a) VMPR com concreto convencional (b) Concreto (c) Perfil de aço.....	146

Figura 4.19 - Curva Força aplicada x Deslocamento vertical no meio do vão para VMPR com CARC-50.....	147
Figura 4.20 - Panorama principal de fissuração do modelo numérico e experimental de VMPR com CARC-50 (a) Modelo numérico (b) Modelo experimental .....	148
Figura 4.21 - Distribuição de tensões do modelo numérico para VMPR com CARC-50 (a) VMPR com concreto CARC-50 (b) Concreto (c) Perfil de aço .....	149
Figura 4.22 - (a) Curvas de acordo com espessura da alma ( $t_w$ ) do perfil de aço (b) Posição do PNA conforme variação de $t_w$ .....	151
Figura 4.23 – Instabilidade local observada na análise para $t_w = 4,75$ mm.....	151
Figura 4.24 - (a) Curvas de acordo com espessura da alma ( $t_f$ ) do perfil de aço (b) Posição do PNA conforme variação de $t_f$ .....	153
Figura 4.25 - Curvas de acordo com a altura do perfil de aço (h).....	154
Figura 4.26 - Curvas de acordo com o tipo de concreto.....	155
Figura 4.27 - Curvas de acordo com a tensão de escoamento do perfil de aço.....	156



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Síntese dos documentos científicos pontuados no que tange às propriedades mecânicas do concreto de ARC com substituição total do agregado graúdo.....	45
Tabela 3.1 – Dados referentes à composição granulométrica do agregado graúdo natural .....	87
Tabela 3.2 – Resultado dos ensaios de caracterização do agregado graúdo natural .....	88
Tabela 3.3 – Dados referentes à composição granulométrica do agregado miúdo natural .....	89
Tabela 3.4 – Resultado dos ensaios de caracterização do agregado miúdo natural .....	90
Tabela 3.5 – Dados referentes à composição granulométrica do agregado graúdo reciclado..	92
Tabela 3.6 – Resultado dos ensaios de caracterização do agregado graúdo reciclado .....	94
Tabela 3.7 – Propriedades mecânicas do aço .....	96
Tabela 3.8 – Traços em massa propostos por Gerin (2020) .....	96
Tabela 3.9 – Traços em massa adotados.....	97
Tabela 3.10 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias.....	100
Tabela 3.11 – Resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.....	101
Tabela 3.12 – Resultado dos módulos de elasticidade dos concretos aos 28 dias.....	103
Tabela 3.13 – Resumo das propriedades mecânicas do CARC-50 .....	112
Tabela 3.14 – Principais propriedades mecânicas e capacidade resistente das vigas analisadas .....	113
Tabela 3.15 – Resultados teóricos para previsão da capacidade resistente da VMPR.....	114
Tabela 4.1 - Testes de malha para calibração de modelo numérico .....	132
Tabela 4.2 - Resultados de força máxima e deslocamento no meio do vão dos modelos numéricos .....	135
Tabela 4.3 - Propriedade dos materiais analisados numericamente .....	135
Tabela 4.4 - Parâmetros de entrada do CDP.....	137
Tabela 4.5 - Capacidade resistente das VMPR estudadas .....	144
Tabela 4.6 - Comparação de força máxima ( $F_{máx}$ ) conforme variação de $t_w$ .....	150
Tabela 4.7 - Comparação de força máxima ( $F_{máx}$ ) conforme variação de $t_f$ .....	152
Tabela 4.8 - Comparação de força máxima ( $F_{máx}$ ) conforme variação de $h$ .....	153
Tabela 4.9 - Propriedades dos concretos estudados na análise paramétrica.....	154
Tabela 4.10 - Comparação de força máxima ( $F_{máx}$ ) conforme variação do tipo de concreto.155	
Tabela 4.11 - Comparação de força máxima ( $F_{máx}$ ) conforme variação da resistência do perfil de aço ( $f_{yd}$ ).....	156



## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

$A_c$	Área do concreto submetido à compressão
$A_{lig}$	Área de ligamento, referente à região acima do entalhe do ensaio de prisma
$A_{mi}$	Área referente à mesa inferior do perfil metálico
$A_{ms}$	Área referente à mesa superior do perfil metálico
$A_s$	Área do perfil de aço
$B_{eff}$	Largura efetiva da seção de viga referente ao piso misto de pequena altura
$B_1$	Comprimento da mesa superior do perfil metálico
$B_2$	Comprimento da mesa inferior do perfil metálico
$C_c$	Componente de força referente à parcela de concreto comprimido
$C_{fls}$	Componente de força referente à mesa superior perfil metálico
$C_{ws}$	Componente de força referente à alma perfil metálico sujeita a compressão
$E_c$	Módulo de elasticidade do concreto
$E_{cd}$	Módulo de elasticidade dinâmico do concreto
$E_{cd,méd}$	Módulo de elasticidade médio dinâmico do concreto
$E_{ci}$	Módulo de elasticidade inicial do concreto
$E_y$	Módulo de elasticidade do perfil de aço
$F_{máx}$	Força máxima resistente da viga no modelo analisado
$F_u$	Força última resistente da viga no modelo analisado
$F_{ref}$	Força resistente da viga no modelo de referência
$G_f$	Energia de Fratura
$H$	Altura total da seção da viga
$K$	Razão entre as distâncias entre o eixo hidrostático e a idealização da hipótese de ruptura de Drucker-Prager
$M_{ARC}$	Massa do ARC
$M_{NAT}$	Massa do agregado graúdo natural
$M_r$	Momento fletor resistente da seção da viga em estudo

$P_b$	Força resistente da ligação entre o perfil de aço e o concreto
$T_{f2s}$	Componente de força referente à mesa inferior do perfil de aço
$T_{ws}$	Componente de força referente à alma perfil metálico sujeita a tração
$Z_c$	Módulo de resistência plástica do concreto, igual a $Z_4$
$Z_s$	Módulo de resistência plástica do perfil de aço
$Z_1$	Módulo de resistência plástica referente à mesa superior do perfil de aço
$Z_2$	Módulo de resistência plástica referente à mesa inferior do perfil de aço
$Z_{3c}$	Módulo de resistência plástica referente à parcela da alma comprimida do perfil de aço
$Z_{3t}$	Módulo de resistência plástica referente à parcela da alma tracionada do perfil de aço
$b_c$	Largura referente ao concreto comprimido ( $b_c = B_2 - t_w$ )
$d_c$	Distância do centro geométrico da parcela de concreto comprimido ao PNA
$d_{t/c}$	Danos à tração e à compressão
$d_{ARC}$	Densidade do ARC
$d_{NAT}$	Densidade do agregado graúdo natural
$e$	Excentricidade
$f_{b0}$	Tensões de escoamento biaxial do concreto
$f_{c0}$	Tensões de escoamento uniaxial do concreto
$f_{cd}$	Resistência de cálculo à compressão do concreto
$f_{cm}$	Resistência média à compressão do concreto
$f_{tm}$	Resistência média à tração do concreto
$f_{yd}$	Resistência de cálculo ao escoamento do aço do perfil
$f_{ym}$	Resistência média ao escoamento dos corpos de prova de aço do perfil ensaiados
$g$	Aceleração da gravidade
$h_c$	Profundidade do bloco de concreto comprimido
$h_w$	Altura da alma do perfil de aço



$h_i$	Altura da alma do perfil de aço sujeita a tração ( $h_w - h_c$ )
$m_1$	Massa do corpo de prova entre os apoios referente ao ensaio de flexão em prismas
$m_2$	Massa do equipamento não acoplada ao atuador que acompanha a deformação do corpo de prova durante a realização do ensaio de prisma
$l_d$	Largura de banda
$t_w$	Espessura da alma do perfil metálico
$t_f$	Espessura das mesas do perfil metálico
$t_{f1}$	Espessura da mesa superior do perfil metálico
$t_{f2}$	Espessura da mesa inferior do perfil metálico
$w_0$	Área contida abaixo do gráfico Força x Deslocamento proveniente do ensaio de prisma
$w_1$	Parâmetro para cálculo de relação Tensão x Deformação à tração
$w$	Abertura de fissura
$y_b$	Distância do topo da mesa do perfil metálico ao ponto de aplicação da força $P_b$
$y_c$	Altura da linha neutra plástica referente ao concreto comprimido
$Y_P$	Posição da linha neutra de acordo com uma distribuição plástica de tensão a partir do centro geométrico da seção
$y_{pn}$	Altura da linha neutra plástica
$y_s$	Altura da linha neutra plástica referente ao perfil de aço
$\alpha_i$	Parâmetro para cálculo do módulo de elasticidade inicial
$\delta_0$	Flecha última referente ao ensaio de prisma
$\epsilon_{el}$	Deformação elástica
$\sigma_{c/t}$	Tensão de compressão/tração
$\epsilon_{c/t}^{in}$	Deformação inelástica à compressão/tração
$\epsilon_{c1}$	Deformação de pico referente à curva Tensão x Deformação submetida a compressão uniaxial
$\mu$	Coefficiente de atrito

$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\beta$	Parâmetro do material para cálculo analítico de curva Tensão x Deformação à compressão
$\gamma$	Coeficiente da linha neutra da seção de concreto
$\rho$	Taxa de armadura longitudinal
$\sigma_{c0}$	Tensão igual a $0,4f_{cm}$
$\sigma_{cu}/\sigma_{tu}$	Tensão de compressão/tração última
$\varphi_c$	Curvatura da parcela de concreto comprimido
$\varphi_s$	Curvatura da seção correspondente ao perfil metálico
$\varepsilon$	Deformação
$\mu\varepsilon$	$\varepsilon \times 10^{-6}$ ( <i>microstrain</i> )
$\psi$	Ângulo de dilatância
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ARC	Agregados de Resíduos de Concreto
ARCE	Agregados Reciclados Cerâmicos
ARCI	Agregados Reciclados Cimentícios
ARCO	Agregados Reciclados de Concreto
ARM	Agregados Reciclados Mistos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CARC	Concreto produzido com substituição da parcela gráudo do agregado natural por agregado de resíduos de concreto
CDP	<i>Concrete Damaged Plasticity</i>
CEB	<i>Comité Euro-International du Béton</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de prova
CREF	Concreto de referência, produzido com agregados naturais

EESC	Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo
G1	Grupo 1 : Apresenta pasta de cimento endurecida em mais de 50% do seu volume
G2	Grupo 2 : Constituídos por rocha em mais de 50 % do seu volume
G3	Grupo 3 : Fragmentos de cerâmica vermelha, com superfície não esmaltada, em mais de 50 % do seu volume
G4	Grupo 4: Fragmentos de materiais indesejáveis, de natureza orgânica, como madeiras, plásticos, betumes e materiais carbonizados, e de natureza inorgânica, como metais, vidros, cerâmica branca esmaltada e gesso
LN	Linha neutra da seção em análise
PNA	Eixo neutro plástico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCD	Resíduos de construção e demolição
RP	Ponto de referência
TSMA	<i>Two-stage mixing approach</i>
USP	Universidade de São Paulo
VMPR	Vigas mistas parcialmente revestidas
ZT	Zona de transição



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>29</b>
1.1 OBJETIVOS.....	31
1.2 JUSTIFICATIVA.....	32
1.3 METODOLOGIA.....	32
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	33
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>35</b>
2.1 CONCRETO DE RESÍDUOS DE CONCRETO.....	35
<b>2.1.1 Propriedades do concreto reciclado .....</b>	<b>38</b>
<b>2.1.2 Aplicação do concreto reciclado em vigas de concreto armado .....</b>	<b>46</b>
<b>2.1.3 Aplicação do concreto reciclado em vigas mistas de aço e concreto .....</b>	<b>53</b>
2.2 VIGAS MISTAS PARCIALMENTE REVESTIDAS .....	59
<b>2.2.1 Comportamento misto.....</b>	<b>62</b>
<b>2.2.2 Análises numéricas de vigas mistas.....</b>	<b>67</b>
<b>2.2.3 Modelos analíticos para previsão de momento fletor resistente .....</b>	<b>74</b>
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	80
<b>3 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>83</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MODELO FÍSICO .....	84
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	85
<b>3.2.1 Agregado natural graúdo.....</b>	<b>86</b>
<b>3.2.2 Agregado natural miúdo .....</b>	<b>88</b>
<b>3.2.3 Agregado graúdo reciclado.....</b>	<b>90</b>
<b>3.2.4 Cimento .....</b>	<b>94</b>
<b>3.2.5 Perfil de aço .....</b>	<b>95</b>
<b>3.2.6 Concreto .....</b>	<b>96</b>
3.3 ENSAIO DE FLEXÃO.....	105
<b>3.3.1 Confecção e instrumentação do modelo de VMPR .....</b>	<b>106</b>

<b>3.3.2 Caracterização do concreto</b> .....	110
<b>3.3.3 Resultados e discussões</b> .....	113
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	125
<b>4 ANÁLISE NUMÉRICA</b> .....	<b>127</b>
4.1 GEOMETRIA E CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	128
4.2 MALHA .....	130
4.3 CONTATO ENTRE OS COMPONENTES .....	133
4.4 MODELOS CONSTITUTIVOS .....	135
<b>4.4.1 Concretos</b> .....	136
<b>4.4.2 Perfil de aço</b> .....	142
4.5 MÉTODO DE SOLUÇÃO .....	143
4.6 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	143
<b>4.6.1 VMPR com concreto convencional</b> .....	144
<b>4.6.2 VMPR com CARC-50</b> .....	147
4.7 ANÁLISE PARAMÉTRICA .....	149
<b>4.7.1 Espessura da alma do perfil de aço</b> .....	150
<b>4.7.2 Espessura das mesas do perfil de aço</b> .....	152
<b>4.7.3 Altura do perfil de aço</b> .....	153
<b>4.7.4 Tipo de concreto</b> .....	154
<b>4.7.5 Tensão de escoamento do aço</b> .....	156
4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	157
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>159</b>
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	161
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>163</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A incorporação de produtos reciclados no processo de produção de grandes indústrias se apresenta como uma iniciativa de suma importância para prover uma cadeia produtiva mais consciente. No campo da construção civil, o impacto ambiental está presente em diversos âmbitos, a exemplo das grandes quantidades de CO<sub>2</sub> liberadas durante a produção do cimento, do processo de extração dos agregados miúdos e graúdos e também da geração de quantidades expressivas de resíduos que em sua maioria não recebem o manejo adequado.

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são definidos, conforme ABNT NBR 15116 (2021), como resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos. A resolução nº 307 do CONAMA (2002) apresenta uma divisão dos resíduos de construção civil em quatro classes. Os resíduos da classe A, são compostos por materiais reutilizáveis ou recicláveis como agregados e ainda podem ser subdivididos a partir de sua composição predominante em três subgrupos, segundo apresentado na ABNT NBR 15116 (2021).

Um dos subgrupos contempla os agregados reciclados de concreto (ARCO), composto predominantemente por resíduos de concreto. Outro subgrupo é composto pelos agregados reciclados cimentícios (ARCI), constituídos em sua maioria por diferentes materiais cimentícios, como concretos e argamassas, podendo incluir pequenos teores de materiais cerâmicos vermelhos. Por fim, são definidos os agregados reciclados mistos (ARM), constituídos por uma mistura de materiais cimentícios e cerâmicos.

Para unificar a nomenclatura utilizada durante o trabalho e facilitar a categorização dos dados, utilizando a mesma estratégia de Alberte e Handro (2021), no que tange à composição dos agregados, aqui serão considerados agregados de resíduos de concreto (ARC) todos aqueles cuja composição de concreto prevaleça em relação à composição cerâmica. Caso a quantidade de material cerâmico prevaleça, classificam-se como agregados reciclados cerâmicos (ARCE). Quando essas duas porcentagens são próximas entre si definem-se como agregados reciclados mistos (ARM).

Segundo relatório da ABRELPE (2021), os serviços de limpeza dos municípios do Brasil no ano de 2020 coletaram 47 milhões de toneladas de RCD. Essa quantidade reflete uma realidade preocupante acerca de seu manejo e destinação. Perante esse panorama, a iniciativa de incorporar RCD no desenvolvimento produtivo do concreto garante benefícios ecológicos e econômicos. A falta de um parâmetro amplamente aceito como índice de qualidade dos resíduos de construção instiga o desenvolvimento de diversos estudos com

abordagens distintas sobre sua utilização na produção de concretos. Uma dessas abordagens é o uso apenas como substituto de parte do agregado gráúdo natural, de forma a não implicar em influências muito significativas nas propriedades do concreto resultante.

As características dos concretos com agregados reciclados variam mais que as dos concretos convencionais devido à modificações como relação água/cimento (a/c), consumo de aglomerantes, teores utilizados, dentre outras características pertinentes a tipologia característica desses materiais. Gerin (2020) pontua que ao restringir a utilização dos RCD aos ARC tenta-se aproximar as propriedades do material através de características similares de granulometria, densidade, quantidade de argamassa aderida e absorção de água, minimizando assim os prejuízos referentes à heterogeneidade característica dos RCD.

A aplicação de agregados de RCD com finalidade estrutural foi recentemente incorporada nas recomendações normativas nacionais. Conforme ABNT NBR 15116 (2021), quando o agregado reciclado for utilizado com essa finalidade, indica-se a aplicação apenas dos ARCO e a substituição de agregado natural por reciclados deve ser limitada a 20% da massa total de agregados, a soma entre gráúdos e miúdos, e a concretos das classes de agressividade I e II, como indicado na ABNT NBR 6118 (2014). Em sua versão anterior, a ABNT NBR 15116 (2004) restringia a aplicação dos agregados reciclados à pavimentação e produção de concretos sem finalidade estrutural, portanto, sua aplicação para fins estruturais apresenta-se como um recente avanço no tocante às prescrições normativas nacionais.

Rao, Jha e Misra (2007) comentam que algumas das barreiras acerca da produção do concreto com agregados reciclados são: falta de instalações apropriadas para o desenvolvimento das atividades de reciclagem; ausência de tecnologias que fomentem a produção dos agregados e eficiência desse concreto e também a falta de apoio governamental e documentos normativos mais abrangentes, que incentivem a incorporação dos resíduos de construção ao concreto. Diante disso, esse estudo visa investigar a aplicação do concreto reciclado com finalidade estrutural através de sua incorporação em vigas mistas de aço e concreto, parcialmente revestidas.

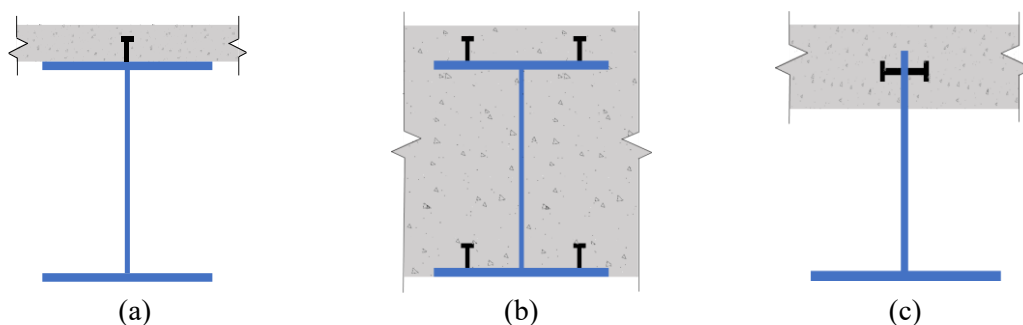
Um elemento estrutural misto de aço e concreto é definido como aquele formado por componentes de concreto, armado ou não, e aço trabalhando de forma conjunta (ABNT NBR 8800, 2008). As vigas mistas de aço e concreto têm ganhado popularidade nas últimas décadas e sua configuração convencional (Figura 1.1a) é constituída por um perfil de aço I conectado a uma laje de concreto por meio de conectores de cisalhamento. De Nardin e El Debs (2009) apontam que esse arranjo está consolidado no meio técnico, porém, pode conduzir à construção de pavimentos com pisos de grandes alturas. Como uma alternativa



para reduzir essas alturas surgem as vigas mistas totalmente ou parcialmente revestidas, exemplificadas na e Figura 1.1b e Figura 1.1c, respectivamente, onde a viga de aço é embutida totalmente ou parcialmente no elemento de concreto. O comportamento misto é alcançado através do estabelecimento satisfatório da interação entre os dois materiais, que normalmente é garantido por meio da presença de conectores de cisalhamento.

Além da vantagem de redução da altura dos pisos, o embutimento do perfil metálico no concreto garante ganhos como aumento da rigidez, maior capacidade resistente em altas temperaturas, aumento da resistência às instabilidades locais da seção de aço, dentre outros. Assim, este trabalho pretende estudar o comportamento das vigas mistas parcialmente revestidas (VMPR) com concreto de ARC localizado entre as mesas do perfil, com substituição do agregado graúdo natural, desenvolvendo análises acerca da possibilidade de associar esse material de cunho sustentável na composição do elemento misto.

**Figura 1.1 – Exemplos de vigas mistas (a) Convencional (b) Totalmente rev. (c) Parcialmente rev.**



Fonte: Adaptado de De Nardin e El Debs (2009)

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho é avaliar a influência da utilização do concreto de ARC no comportamento à flexão das vigas mistas de aço e concreto, parcialmente revestidas. A partir desse objetivo geral, como objetivos específicos pretende-se:

- Avaliar se a substituição dos agregados graúdos naturais por ARC modifica a capacidade resistente e o comportamento à flexão da VMPR;
- Avaliar a influência de propriedades geométricas do perfil de aço na capacidade resistente da VMPR com concreto de ARC por meio de análise paramétrica;
- Avaliar a influência do teor de substituição de agregado graúdo natural por ARC na capacidade resistente da VMPR por meio de análise paramétrica;
- Avaliar a influência da resistência ao escoamento do perfil metálico na capacidade resistente da VMPR com concreto de ARC por meio de análise paramétrica.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Estudos sobre a incorporação de materiais mais sustentáveis no âmbito da construção civil têm fomentado importantes desenvolvimentos científicos. A indústria do concreto é considerada uma das mais poluentes no cenário atual e medidas que visem direcionar um uso mais consciente dos materiais envolvidos em sua produção apresentam importante relevância para viabilizar seu emprego e potencializar suas vantagens.

A destinação dos resíduos de construção em sua grande maioria é feita de forma inadequada, o que acarreta problemas econômicos, sociais e ambientais. A utilização de RCD como agregados na produção de concretos se apresenta como uma medida importante para fomentar o desenvolvimento sustentável e também reduzir a exploração de jazidas naturais. Porém, apesar desses importantes benefícios, existe uma certa resistência à utilização desses materiais, embasada principalmente na falta de informações técnicas e controle adequado a respeito de suas propriedades. Assim, estudos que embasem sua utilização contribuem e incentivam o desenvolvimento e aplicação de concretos desenvolvidos com materiais reciclados.

Além da geração de resíduos, o avanço construtivo também está relacionado à adoção de diferentes arranjos estruturais. As vigas mistas de aço e concreto têm ganhado popularidade e a configuração com revestimento parcial constitui uma solução estrutural até o momento pouco estudada, porém com um notório potencial. A investigação dos efeitos da aplicação do concreto reciclado nos elementos de VMPR contribui para o desenvolvimento desse tema, aliando a inovação inerente ao material e ao elemento estrutural.

Portanto, esse trabalho busca explorar o comportamento das VMPR com a utilização do concreto de ARC para avaliar a viabilidade e confiabilidade da sua utilização e seus impactos no comportamento e capacidade resistente do elemento estrutural.

## 1.3 METODOLOGIA

Com o intuito de alcançar os objetivos estabelecidos, apresenta-se a divisão da metodologia empregada em quatro etapas principais: (i) Revisão bibliográfica; (ii) Investigação experimental; (iii) Simulação numérica; (iv) Estudo comparativo e análise de resultados.

A primeira etapa consistiu no levantamento bibliográfico sobre o comportamento do concreto de ARC, das VMPR e a aplicação desse tipo de concreto em estruturas convencionais de concreto armado e mistas de aço e concreto. Com o objetivo de melhor compreender a influência da aplicação dos resíduos de concreto em elementos estruturais,

vários documentos científicos foram avaliados e agrupados para basear e nortear os rumos da pesquisa, buscando compor um banco de dados atualizado durante todo o processo de desenvolvimento.

A investigação experimental configurou a segunda etapa da metodologia proposta, composta por duas fases. Para escolha do teor de substituição a ser aplicado no elemento estrutural uma análise preliminar foi realizada, com teores de substituição iguais a 0%, 30%, 50% e 100% da parcela gráuda do agregado natural por ARC. Os concretos foram analisados de acordo com suas principais propriedades mecânicas e trabalhabilidade. A partir dos desempenhos obtidos foi escolhido o teor de substituição igual a 50%. Com essa dosagem de concreto foi confeccionado o modelo físico de VMPR, que foi submetida ao ensaio de flexão a quatro pontos e seu comportamento e capacidade resistente foram avaliados e comparados ao comportamento do elemento com concreto convencional.

Na terceira etapa buscou-se analisar numericamente o desempenho estrutural da viga mista de aço e concreto em estudo, utilizando o programa de elementos finitos, ABAQUS, com consideração da não linearidade física dos materiais e também não linearidade geométrica da estrutura. Os resultados oriundos da investigação experimental foram utilizados para validar o modelo numérico. Nesta fase uma análise paramétrica foi realizada com o intuito de extrapolar os resultados do modelo e investigar outras configurações, além da que foi ensaiada experimentalmente. Foram avaliadas a influência de alguns parâmetros do modelo experimental como propriedades geométricas do perfil metálico, o teor de substituição de ARC e a tensão de escoamento do perfil de aço.

A partir da análise e discussão dos resultados obtidos nas outras etapas, foi elaborado um estudo comparativo das configurações das VMPR analisadas, compondo a quarta etapa metodológica, com o intuito de sintetizar as considerações e contribuições pertinentes do trabalho desenvolvido.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O corpo da dissertação está organizado em 5 seções. Na **seção 1** faz-se uma breve descrição e apresentação das VMPR, assim como do concreto reciclado, perpassando pelos objetivos do estudo, justificativa para seu desenvolvimento e metodologia aplicada durante a elaboração do trabalho.

Para dar início à revisão bibliográfica, a **seção 2** apresenta uma descrição das principais propriedades do concreto de ARC, juntamente a um histórico do desenvolvimento dos estudos que o permeiam, a partir de investigações experimentais e análises apresentadas

na literatura. Nessa seção também contempla as características das VMPR, através da apresentação e discussão de importantes desenvolvimentos científicos que as circundam. Ademais, são abordadas as recomendações presentes nos principais documentos científicos, a respeito de modelos analíticos para estimar a capacidade resistente desses elementos estruturais. Na **seção 3** é apresentada a metodologia aplicada durante o desenvolvimento do programa experimental, assim como as propriedades dos materiais utilizados e os resultados obtidos.

Na **seção 4** contempla as estratégias de simulação e simplificações adotadas para o desenvolvimento da análise numérica dos modelos de viga. Nessa seção são abordados importantes fatores como geometria, elementos finitos utilizados, características de malha, assim como definição das interações entre os componentes do modelo numérico, condições de contorno, condições de carregamento, modelos constitutivos adotados para os materiais em estudo, descrições a respeito das não linearidades aplicadas e método de solução adotado. Nessa seção são também abordados os resultados das simulações numéricas, assim como discussões e considerações baseadas na análise paramétrica.

Na **seção 5** são apresentadas as considerações observadas durante a elaboração do trabalho, a partir das análises de cunho teórico, experimental e numérico, bem como as sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta uma abordagem geral a respeito do concreto de ARC e das VMPR, partindo de análises sobre o material até o elemento estrutural em foco. Inicialmente são discutidos aspectos particulares do concreto reciclado, perpassando por suas principais propriedades, histórico de aplicação e desenvolvimentos científicos. Posteriormente são elencados importantes estudos acerca da viabilidade desse material para aplicações estruturais, com enfoque principal em elementos de vigas tradicionais e mistas de aço e concreto. Por fim, são apresentados importantes desenvolvimentos científicos de cunho experimental e provenientes de simulações numéricas, referentes ao comportamento, representação e características das VMPR.

### 2.1 CONCRETO DE RESÍDUOS DE CONCRETO

Os primeiros registros significativos da utilização de RCD em edificações datam final da segunda guerra mundial. Materiais reciclados foram utilizados na reconstrução de cidades europeias que tiveram suas construções totalmente demolidas e o escombros ou entulho resultante, britado para produção de agregados com o objetivo de atender à demanda. A partir de 1988, vários países do continente europeu executaram um grande número de obras em concreto obtido a partir de agregados reciclados, de concreto, alvenaria, assim como da mistura de ambos (LEVY; HELENE, 2002). A nível nacional, conforme apresentado por Miranda, Angulo e Careli (2009), as primeiras pesquisas científicas envolvendo o uso de agregados reciclados foram realizadas por Pinto (1986) e Levy (1997) em argamassas, Bodi (1997) em pavimentos e Zordan (1997) em concretos.

No que se refere ao histórico de desenvolvimento de códigos normativos que orientam quanto à aplicação dos agregados provenientes de RCD, o Japão em meados de 1970 já apresentava as primeiras normas para sua utilização. A partir da década de 1980, diretrizes de reciclagem e reuso desse tipo de resíduo entraram em vigor em muitos países, a exemplo da Alemanha, Holanda e Bulgária. No Brasil, inicialmente em 2002 foi homologada a resolução CONAMA nº 307, definindo que grandes geradores públicos e privados são obrigados a desenvolver e a implantar um plano de gestão de RCD. Em meados de 2010 foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), conforme Lei nº 12.305, apresentando direcionamentos sobre como o país deve dispor e gerenciar estes resíduos.

A respeito das recomendações normativas, em meados dos anos 2000 foram publicadas as normas ABNT NBR 15115 (2004) e ABNT NBR 15116 (2021) para a

utilização de agregados reciclados com enfoque em obras de pavimentação viária, desenvolvimento de argamassas e concretos. Com base em Alberte e Handro (2021), o Quadro 2.1 apresenta especificações técnicas ao redor do mundo e sua classificação dos RCD para aplicações estruturais. Cada especificação possui seus critérios de proporção mas, em sua maioria, as subdivisões se definem pela quantidade de cerâmicos, concreto e materiais naturais.

**Quadro 2.1 – Breve resumo a respeito de prescrições normativas que contemplem concretos de ARC com aplicação estrutural**

País	Presc. Normativa	Classificação	Composição Principal (%)				Absorção de água (%)	Teor de Substituição (%)	
			Class. Unificada	Cerâmica	Concreto e agreg. Naturais	Material indesejável		Agregado Graúdo	Agregado miúdo
Brasil	ABNT NBR 15116 (2021)	ARCI	ARC	-	-	< 1	< 7	-	-
		ARCO		< 10	-	< 1	< 12	0-20	0-20
		ARM	ARM	< 40	-	< 1	< 12	-	-
Alemanha	DIN 4226-100 (DEUTSCHES...,2002)	Tipo 1	ARC	≤ 10	≥ 90	≤ 1	≤ 10	≤ 45	0
		Tipo 2		≤ 30	≥ 70	≤ 1	≤ 15	≤ 35	0
		Tipo 3	ARCE	≥ 80	≥ 20	≤ 1	≤ 20	-	-
		Tipo 4	ARM	≥ 80	≥ 80	-	-	-	-
Austrália	HB 155 (COMMONWEALTH..., 2002)	Classe 1A	ARC	≤ 0,5	< 100	≤ 1	≤ 6	≤ 30	0
		Classe 1B	ARM	≤ 30	< 70	≤ 2	≤ 8	≤ 100	0
Bélgica	NBN B15-001 (BELGIUM...,2006) / PTV 406 (ORGANISME...,2016)	ARC	ARC	≤ 10	≥ 90	≤ 1	≤ 9	≤ 20	0
		ARM	ARM	≤ 50	≥ 50	≤ 1	≤ 18	-	-
Espanha	EHE-08 (MINISTERIO..., 2008)	ARC	ARC	< 5	-	≤ 1	≤ 7	≤ 20	0
	GEAR – RT – 05 (GREMIO..., 2012)	ARH	ARC	-	≥ 90	≤ 1	-	-	-
		ARMh		≤ 30	< 90	≤ 1	≤ 9	-	-
		ARMc	ARM	> 30	-	≤ 1	-	-	-
Holanda	NEN 5905 (ROYAL..., 2005)	ARC	ARC	≤ 5	-	≤ 1	-	≤ 100	-
		ARM	ARM	≤ 65	-	≤ 1	-	-	-

Continua

País	Presc. Normativa	Classificação	Composição Principal (%)				Absorção de água (%)	Teor de Substituição (%)	
			Class. Unificada	Cerâmica	Concreto e agreg. Naturais	Material indesejável		Agregado Graúdo	Agregado miúdo
Hong Kong	WBTC N° 12 (DEVELOPMENT ..., 2002)	ARC	ARC	-	< 100	≤ 1	≤ 10	≤ 20	0
Inglaterra	BS 8500-2 (BRITISH..., 2002)	ARC	ARC	≤ 5	-	≤ 1	-	≤ 100	0
		AR	ARCE	≤ 100	-	≤ 1	-	0	0
Japão	JIS A 5021 (2005)	ARH	ARC	-	-	-	≤ 7	-	-
	JIS A 5022 (JAPANESE..., 2006)	ARM	ARC	-	-	-	≤ 7	-	-
Suíça	OT 70085 (JAPANESE..., 2006)	ARC	ARC	-	≥ 95	-	-	≤ 100	≤ 100
		ARM	ARM	≥ 97	≥ 97	-	-	≤ 100	≤ 100

#### Legenda

*Alemanha*: Tipo 1 – Resíduos de concreto; Tipo 2 – Resíduos de construção e demolição; Tipo 3 – Resíduos de alvenaria; Tipo 4 – Mistura de resíduos.

*Austrália*: Classe 1A – Resíduos de concreto; Classe 1B – Resíduos de concreto e cerâmicos (até 30%).

*Espanha*: ARH – Agregados reciclados de concreto; ARMh – Agregados reciclados mistos de concreto; ARMa – Agregados reciclados mistos de alvenaria.

*Inglaterra*: AR – Agregados reciclados que podem ter em sua composição até 100% de cerâmicos

*Japão*: ARH – Agregados graúdos que podem ser utilizados para produção de estruturas com resistência nominal menor ou igual a 45 MPa.

ARC – Agregado de resíduos de concreto; ARM – Agregado de resíduos misto; ARCE – Agregado de resíduos cerâmico; ARCI – Agregados reciclados cimentícios; ARCO – Agregado reciclados de concreto.

Fonte: Adaptado de Alberte e Handro (2021)

Algumas das prescrições normativas apresentadas também limitam o teor de substituição do agregado natural por reciclado, onde majoritariamente preconizam teores de substituição válidos para elaboração de concreto estrutural com ARC e não com ARM, o que pode ser justificado pela natureza do agregado e desempenho mecânico requerido. Os códigos normativos apresentado, com exceção da Suíça, permitem apenas substituição da parcela graúda dos agregados para produção de concreto estrutural.

Países como Austrália, Holanda, Inglaterra e Suíça permitem substituição total dos agregados graúdos por ARC possibilitando a produção de um concreto com elevado cunho sustentável. As impurezas são majoritariamente limitadas à 1%. Em relação ao índice de absorção de água dos agregados, a maioria abrange valores menores que 10%. As diferentes

abordagens para classificação e normatização desse material aplicado ao concreto reflete sua heterogeneidade, o que reitera a necessidade de mais estudos que fundamentem sua aplicação e uso, além de especificações normativas mais detalhadas e abrangentes.

### 2.1.1 Propriedades do concreto reciclado

O concreto é um material popularmente caracterizado como heterogêneo. Esta heterogeneidade reflete em diversos fatores, desde os materiais que os compõe até o processo de dosagem, lançamento e cura. Os agregados apresentam suma importância no desenvolvimento do concreto, compondo grande parte de seu volume.

Ao comparar os agregados reciclados aos naturais, é perceptível que os reciclados são mais desuniformes e mais porosos (POON; SHUI; LAM, 2004; ANGULO; FIGUEIREDO, 2011). Os agregados reciclados possuem granulometria mais contínua, forma mais irregular, angular e textura áspera (LEITE, 2001). Estas características também contribuem para a necessidade de mais pasta de cimento para viabilizar sua mobilidade, prejudicando a trabalhabilidade.

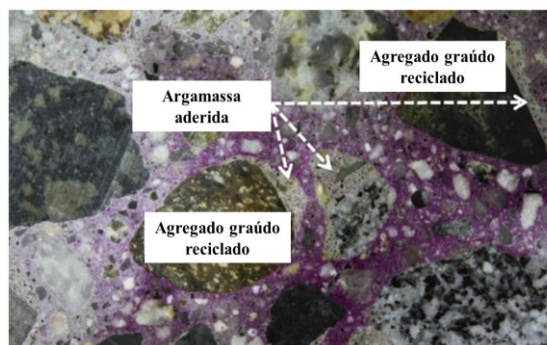
Estudos como os realizados por Butler, West e Tighe (2012), ao caracterizar várias fontes de agregado graúdo de concreto reciclado apresentam que a microestrutura do concreto de ARC difere do concreto com agregado graúdo natural, pois contém duas zonas de transição (ZT), uma entre o agregado original e a argamassa aderida e outra entre a nova argamassa e a argamassa aderida. Uma representação simplificada dessas fases está ilustrada na Figura 2.1a. González-Taboada *et al.* (2016) pontuam que a argamassa aderida é um dos parâmetros mais controladores da trabalhabilidade desse tipo de concreto, pois à medida que essa aumenta, a absorção de água também aumenta. Uma análise microscópica desta argamassa em concreto composto por agregados graúdos reciclados está ilustrada na Figura 2.1b.

**Figura 2.1 – (a) Diagrama esquemático do concreto de ARC (b) Microscopia das fases presentes no concreto reciclado**



(a)

Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2012)



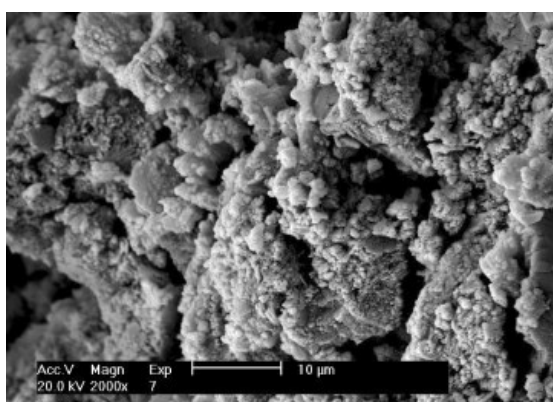
(b)

Fonte: Adaptado de Seo e Choi (2014)

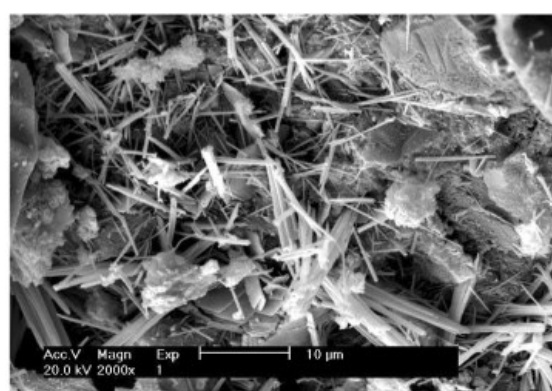


A fim de investigar a influência do teor de substituição de ARC na microestrutura do concreto reciclado, Yang e Han (2006) analisaram por meio de microscopia eletrônica de varredura um concreto convencional e concretos reciclados, com teores de substituição da parcela graúda do agregado natural por ARC, de 25% e 50%, conforme ilustrado na Figura 2.2. Os autores comentam que o concreto tradicional apresenta uma microestrutura mais densa que os reciclados, que por sua vez, apresentam texturas mais reticulares e aspecto mais poroso, visivelmente acentuado quanto maior o teor de substituição.

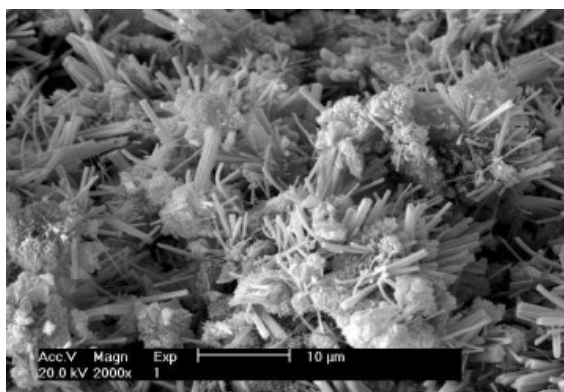
**Figura 2.2 – Microscopia eletrônica de varredura do concreto convencional e reciclado (a) Concreto convencional (b) Concreto reciclado com teor de subst. de 25% (c) Concreto reciclado com teor de subst. de 50 %**



(a)



(b)



(c)

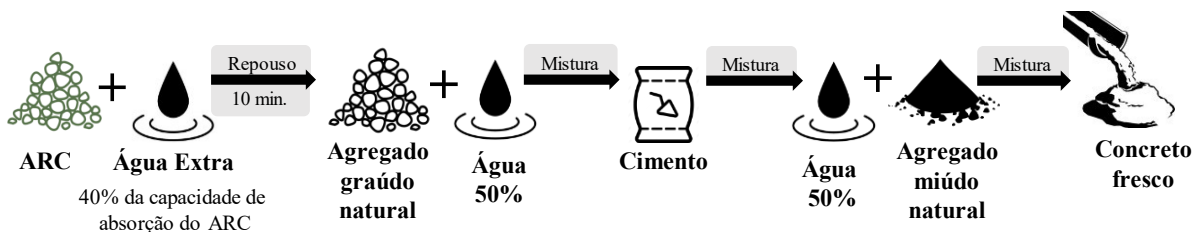
Fonte: Yang e Han (2006)

A microestrutura do concreto reciclado pode ser fortemente influenciada pela absorção de água e pela forma como essa é compensada. Sánchez (2004) comenta que a absorção de água do agregado natural se situa entre 0% e 4%, enquanto para a argamassa aderida fica entre 16% e 17%, o que conseqüentemente influi nos ensaios de absorção de água do concreto de ARC, apresentando valores entre 0,8% e 13%, com uma média de 5,6%. Esses resultados

de absorção podem influenciar na relação a/c efetiva da mistura. Assim, diferentes recomendações são encontradas na literatura a respeito da preparação e incorporação do ARC no concreto. Dentre as diferentes abordagens, pode-se citar a compensação de água durante a mistura e a pré-molhagem do agregado reciclado. A ABNT NBR 15116 (2021) recomenda a utilização de uma das duas abordagens para preparo do material.

O método de compensação durante a mistura pode ser definido a partir da adição de maior quantidade de água no processo de dosagem, onde a água adicional é referente à parcela que será absorvida pelo agregado reciclado. Já a abordagem de pré-molhagem consiste na incorporação dos agregados reciclados parcialmente ou totalmente saturados à mistura, de forma a minimizar ou anular a absorção de água de amassamento do concreto por parte do ARC. Leite (2001) propôs um método complementar de mistura que consiste em realizar a pré-molhagem do agregado reciclado com 40% da sua taxa de absorção média, 10 minutos antes do processo de produção do concreto. A água empregada nesse processo é excedente àquela estipulada para dosagem. A Figura 2.3 apresenta um esquema desse processo de mistura proposto.

Figura 2.3 – Esquema do processo de mistura proposto por Leite (2001)



Fonte: Própria autora

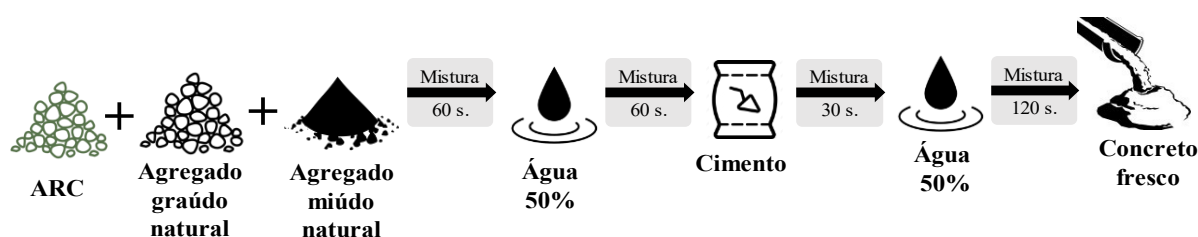
Ferreira, De Brito e Barra (2011) conduziram estudos a respeito da influência da pré-molhagem do ARC, com base no proposto por Leite (2001), nas propriedades do concreto resultante em comparação ao concreto convencional e ao reciclado com a abordagem de compensação da quantidade de água utilizada na dosagem. Para realização desta análise, Ferreira, De Brito e Barra (2011) produziram um concreto convencional de referência e seis misturas com teores de substituição de 20%, 50% e 100% da parcela graúda do agregado natural por ARC, sendo três delas preparadas com a abordagem de compensação de água e três com a realização da pré-molhagem dos agregados reciclados. Em termos de trabalhabilidade, todos os concretos atingiram os resultados esperados. Já tratando-se da resistência à compressão e módulo de elasticidade, os concretos provenientes do método de pré-molhagem apresentaram os resultados mais desfavoráveis. Os autores comentam que uma

possível justificativa para esse desempenho inferior se deve à configuração de uma zona de transição mais frágil.

Jia *et al.* (2013) apresentam um estudo sobre três possibilidades de preparação do agregado graúdo reciclado e do concreto. Os métodos de preparação analisados foram: manter o agregado reciclado intacto; envolver o agregado reciclado em pasta de cimento por 30 minutos com relação a/c em torno de 0,55 e posteriormente deixá-lo em temperatura ambiente por 7 dias; imergir o agregado reciclado em água por 24 horas. Dentre os métodos citados, o concreto reciclado produzido a partir da imersão do agregado reciclado em água por 24 horas apresentou maior resistência e abatimento.

Tam, Gao e Tam (2005) propuseram um método de mistura ligeiramente diferente dos discutidos até o momento, onde a produção do concreto é realizada com a divisão da mistura em dois estágios, definido como TSMA (*two-stage mixing approach*), com esquema ilustrado na Figura 2.4. Assim, diferentemente da abordagem tradicional, onde todos os componentes são misturados em apenas um estágio, o TSMA propõe uma divisão proporcional da quantidade de água adicionada à mistura em duas etapas. Esse procedimento busca a construção de uma zona de transição mais forte, por meio do recobrimento do agregado com pasta de cimento, preenchendo de forma mais efetiva fissuras e poros. Os resultados obtidos pelos autores apresentaram acréscimo em torno de 10 a 20% na resistência à compressão e 8% no módulo de elasticidade, para o teor de substituição de 30% da parcela graúda do agregado natural por ARC.

**Figura 2.4 – Esquema do processo de mistura proposto por Tam, Gao e Tam (2005)**



Fonte: Própria autora

Além da influência na absorção de água, a argamassa “antiga” também pode apresentar interferência na aderência entre o agregado reciclado e a nova argamassa, afetando negativamente propriedades relacionadas à deformação (módulo de elasticidade, retração por secagem e fluência), durabilidade (absorção de água e permeabilidade) e resistência mecânica. Esses efeitos são potencializados quando o concreto antigo é utilizado tanto como agregado graúdo quanto como miúdo. A origem do material que constitui os agregados reciclados

também se apresenta como um fator importante na definição das propriedades do concreto resultante.

Em estudos realizados por Poon, Shui e Lam (2004), ao analisar a influência de diferentes tipos de ARC na microestrutura do concreto e suas consequências na resistência mecânica alcançada, foi observado que os resíduos provenientes de um concreto de alto desempenho, com adições minerais como sílica ativa e cinza volante, atingiu o mesmo nível de resistência do concreto com agregados naturais. Os autores pontuam, a exemplo do observado para o agregado reciclado do concreto de alto desempenho, que o estabelecimento de uma aderência eficaz entre a pasta de cimento e o agregado graúdo reciclado pode compensar em algum nível o efeito negativo proveniente de seu uso. Como forma de contornar as desvantagens inerentes à aplicação dos agregados reciclados, Angulo e Figueiredo (2011) apontam que estudos de diferentes teores de substituição podem compatibilizar sua porosidade com a porosidade da pasta de cimento (controlada pela relação água efetiva/cimento) e diminuir os prejuízos.

Em busca de analisar a influência do teor de substituição de agregados graúdos naturais por ARC nas propriedades mecânicas do concreto, Xiao, Li e Zhang (2005) desenvolveram estudos com teores de 0%, 30%, 50%, 70% e 100%. A partir dos resultados de ensaios experimentais, os autores apresentam que foi observado uma decréscimo de 45% no módulo de elasticidade e acréscimo de 20% na deformação de pico, considerando substituição total da parcela graúda. Em termos de resistência à compressão aos 28 dias, reduções aproximadamente entre 5-26% foram encontradas, para teores de 30% e 100%, respectivamente. Esses resultados apresentam conformidade com o observado em documentos científicos publicados anteriormente, a exemplo dos apresentados em Topcu e Sengel (2004) que realizaram ensaios com os mesmos teores e foi observado um decréscimo máximo de 33% na resistência à compressão aos 28 dias, considerando teor de substituição igual a 100% .

Etxeberria *et al.* (2007) ao investigar as propriedades do concreto de ARC, com teores de 0%, 25%, 50% e 100% de substituição do agregado graúdo, também observaram redução em suas propriedades mecânicas. No que tange à resistência à compressão aos 28 dias, os resultados experimentais apontaram decréscimo máximo de 25%, considerando substituição total do agregado natural por ARC. Para o módulo de elasticidade, a máxima redução observada ficou em torno de 11%. Com o objetivo de agrupar os estudos desenvolvidos na China quanto a utilização do concreto de ARC, Li (2008) apresenta um compilado sobre o comportamento mecânico desse concreto. Em termos de resistência à compressão, dentre os trabalhos analisados, foi observado redução entre 12% e 25%, para um teor de substituição da

parcela gráuda de 100%. Para resistência à tração foi observado um decréscimo entre 12- 31% e para o módulo de elasticidade uma redução também foi da em torno de 45%. A deformação de pico sofreu um acréscimo de aproximadamente 20% e esse aumento pode ser justificado pela redução do módulo de elasticidade.

Os estudos referentes à obtenção de concretos de ARC podem apresentar abordagens distintas, desde o objetivo principal em analisar a influência de teores de substituição nas propriedades do material, à obtenção de concretos com resistências e trabalhabilidades equivalentes aos convencionais. Butler, West e Tighe (2011) desenvolveram estudos contemplando essas duas abordagens, considerando substituição total dos agregados gráudos naturais. Assim, foi realizada a substituição direta e também aplicação de diferentes métodos de dosagem para viabilizar a obtenção de resistências à compressão equivalentes (30 MPa e 50 MPa). Na análise do comportamento com concretos convencionais e reciclados de mesma resistência, comportamentos satisfatórios foram observados.

Na contramão das tendências presentes na literatura, os resultados obtidos em Butler, West e Tighe (2011) com a substituição direta do ARC alcançaram resistências à compressão aos 28 dias até 28% maiores que os concretos com agregados gráudos naturais. Em análises apresentadas em Butler, West e Tighe (2012), o aumento da resistência do concreto reciclado também foi observado. Os autores acreditam que esse comportamento é resultado do eficiente estabelecimento da aderência entre a nova argamassa e o ARC. Butler, West e Tighe (2013) em busca de desenvolver concretos com mesma resistência à compressão que o convencional (40MPa e 60MPa) observaram uma redução no módulo de elasticidade em torno de 19% e aumento na resistência à tração e energia de fratura de aproximadamente 9% e 12-32%, respectivamente.

Tenório *et al.* (2012) estudou e avaliou as propriedades mecânicas do concreto produzido com agregados reciclados de RCD utilizando um teor de substituição igual a 100%, sendo que esses agregados não eram compostos exclusivamente de resíduos de concreto. Foram produzidos traços com variações na relação a/c (0,67, 0,50 e 0,40) e na massa específica do agregado reciclado gráudo (2,08 e 2,27 kg/dm<sup>3</sup>), além de análises com os dois agregados reciclados (miúdo e gráudo) e também com substituição apenas da parcela gráuda. Os resultados apontaram resistências à compressão aos 28 dias similares às provenientes do concreto de referência, apresentando resultados ligeiramente próximos, todos atingindo as exigências normativas para finalidade estrutural, variando entre 20, 30 e 40 MPa para relação a/c de 0,67, 0,50 e 0,40, respectivamente. Independentemente do tipo de agregado miúdo, concretos reciclados mais resistentes e duráveis foram obtidos ao se utilizar os agregados

grãos de maior densidade. Essa propriedade tem relação com a resistência e porosidade do agregado que influencia nas propriedades do concreto resultante e se apresentou como um parâmetro importante para a análise da viabilidade estrutural.

Com o intuito de analisar as diferenças nas propriedades mecânicas de concretos de ARC provenientes de concretos de elevada resistência, Andreu e Mirren (2014) realizaram investigações experimentais em três tipos diferentes de ARC, produzidos a partir de concretos com resistência à compressão de 40 MPa, 60 MPa e 100 MPa, considerando teores de substituição da parcela graúda do agregado iguais a 0%, 20%, 50% e 100%. No que diz respeito à resistência à compressão aos 28 dias, decréscimos em torno de 11% e 5% foram observados para os teores de 100% e 50%, respectivamente, considerando o concreto de origem com resistência de 40 MPa. Para os demais ARC, provenientes dos concretos de 60 MPa e 100 MPa, acréscimos de resistência foram alcançados, com o aumento máximo de aproximadamente 6% em comparação ao concreto convencional, proveniente do concreto de 100 MPa e considerando teor de 100%.

Já para o módulo de elasticidade, reduções foram observadas para todos os concretos de ARC produzidos, sendo o decréscimo máximo de aproximadamente 26% observado para substituição total do agregado graúdo proveniente do concreto de 40 MPa. Para a resistência à tração, resultados próximos entre si foram obtidos, tanto de acréscimos quanto decréscimos, sendo o máximo acréscimo obtido em torno de 26%, para o teor de 20% e concreto original de 60MPa e a máxima redução igual a 18%, para substituição total e concreto original de 40MPa.

Ghorbel, Wardeh e Fares (2019) apresentam um apanhado de documentos científicos que contemplam expressões analíticas para previsão das propriedades mecânicas do concreto com ARC, porém, as equações estudadas não conseguem representar satisfatoriamente e de forma abrangente as propriedades mecânicas dos concretos reciclados analisados, visto a vasta heterogeneidade desse tipo de material.

Com o objetivo de também avaliar o comportamento mecânico do concreto de ARC, Gerin, Sales e De Nardin (2020) apresentam análises para quatro teores de substituição de agregado graúdo (0%, 30%, 50% e 100%). No tocante a resistência à compressão aos 28 dias, foram observados acréscimos de até 12,5%, referente ao teor de substituição igual a 100%. O módulo de elasticidade apresentou decréscimos para todos os teores, sendo o maior, igual a aproximadamente 9%, referente à substituição total. De acordo com a investigação experimental realizada, a resistência à tração do concreto não apresentou relação aparente

com os teores de substituição, refletindo resultados próximos entre todos os teores de substituição estudados.

Wang *et al.* (2021) apresentam uma amplo compilado de diferentes documentos científicos a respeito do concreto de ARC e suas propriedades mecânicas. Foram observados, seguindo as tendências da literatura, decréscimos nos valores de resistência à compressão, à tração e também no módulo de elasticidade, com o aumento do teor de substituição. Os autores apontam que considerando o teor igual a 100%, a redução nos valores médios de resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade, se situam em torno de 40%. A Tabela 2.1 configura um resumo dos documentos científicos apresentados nesse seção, com foco na substituição da parcela graúda do agregado natural, estratégia adotada pela ampla maioria dos estudos abordados.

**Tabela 2.1 – Síntese dos documentos científicos pontuados no que tange às propriedades mecânicas do concreto de ARC com substituição total do agregado graúdo.**

Documento Científico	Teor de subst. do agregado graúdo	Propriedades mecânicas para teor de 100% aos 28 dias em comparação ao concreto convencional	
Topcu e Sengel (2004)	0, 30,50,70 e 100%	Resistência à compressão	- 33%
Xiao, Li e Zhang (2005)	0, 30,50,70 e 100%	Resistência à compressão	- 26%
		Módulo de elasticidade	- 45%
		Deformação de pico	+ 20%
Etxeberria <i>et al.</i> (2007)	0, 30,50,70 e 100%	Resistência à compressão	- 25%
		Módulo de elasticidade	- 11%
Li (2008)	0,100%	Resistência à compressão	- 12-25%
		Resistência à tração	- 12-31%
		Módulo de elasticidade	- 45%
		Deformação de pico	+ 20%
Butler, West e Tighe (2011)	0, 100%	Resistência à compressão	+ 28%
Butler, West e Tighe (2012)	0, 100%	Resistência à compressão	+ 12%
Tenório <i>et al.</i> (2012)	0, 100%	Resistência à compressão	Equivalente
Butler, West e Tighe (2013)	0, 100%	Resistência à compressão	Equivalente
		Resistência à tração	+ 9%
		Módulo de elasticidade	- 19%
		Energia de fratura	+ 12-32%

Continua

Documento Científico	Teor de subst. do agregado graúdo	Propriedades mecânicas para teor de 100% em comparação ao concreto convencional	
Andreu e Mirren (2014)	0, 20,50, 100%	Resistência à compressão	- 11%
		Resistência à tração	- 18%
		Módulo de elasticidade	- 26%
Gerin, Sales e De Nardin (2020)	0,30,50, 100%	Resistência à compressão	+ 12,5%
		Resistência à tração	+ 1,25%
		Módulo de elasticidade	- 9%
Wang <i>et al.</i> (2021)	0, 25,50, 100%	Resistência à compressão	- 40%
		Resistência à tração	- 40%
		Módulo de elasticidade	- 40%

Fonte: Própria autora

### 2.1.2 Aplicação do concreto reciclado em vigas de concreto armado

A utilização de concretos para finalidades estruturais requer que suas propriedades estejam bem definidas e atendam às exigências de projeto para seu eficiente desempenho, desde parâmetros relacionados à resistência mecânica, até àqueles que influenciam a durabilidade do elemento. Nessa seção estão apresentados alguns importantes estudos que contemplam a aplicação do concreto de ARC para finalidade estrutural em elementos de vigas tradicionais de concreto armado, elencando como sua capacidade resistente e comportamento mecânico foram influenciados pela utilização do concreto reciclado e quais considerações foram realizadas acerca da viabilidade de sua aplicação.

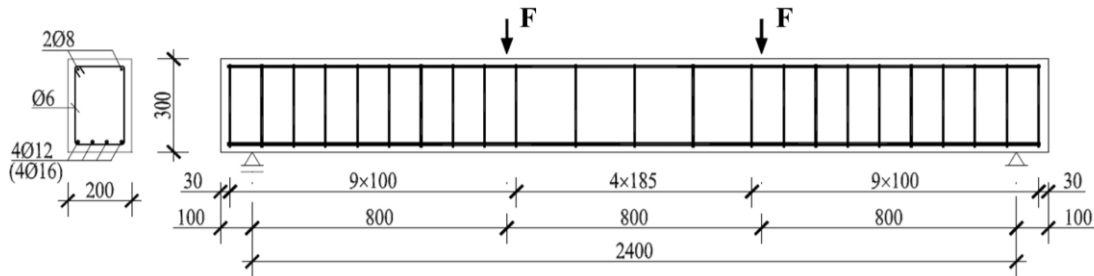
Neste escopo de desenvolvimentos científicos, Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2007) realizaram um estudo experimental comparativo entre elementos de vigas de concreto armado convencional e reciclado. Foram realizados ensaios de flexão a quatro pontos em 48 vigas, com a configuração apresentada na Figura 2.5. Os teores de substituição adotados para produção do concreto reciclado foram substituição total dos agregados naturais e substituição total apenas da parcela graúda desses agregados por ARC.

Os agregados reciclados foram obtidos a partir da britagem de elementos de concreto pré-moldado juntamente com concretos produzidos no período de 1995 a 1998 no Japão. Além da substituição do agregado reciclado, outros parâmetros analisados neste estudo foram



três diferentes tipos de agregado graúdo natural (granito, basalto e quartzito), três diferentes classes do concreto de onde se produziu o ARC ( C20/25, C35/45 e C80/95), além de duas diferentes configurações de armadura longitudinal (4Ø12 mm e 4Ø16 mm), variadas com o intuito de obter dois tipos de modos de falha, por flexão e cisalhamento. As resistências à compressão obtidas para os concretos produzidos variaram entre 29,2 MPa a 107,8 MPa.

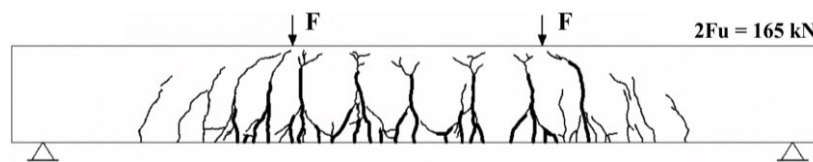
**Figura 2.5 – Dimensões (mm) e esquema de carregamento das vigas ensaiadas**



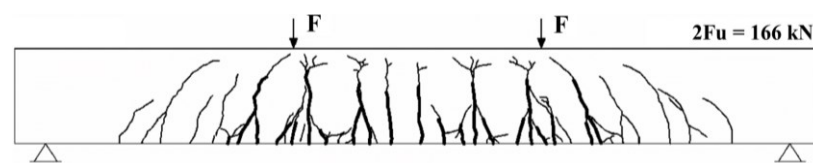
Fonte: Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2007)

Nas vigas que romperam por flexão observou-se o escoamento da armadura e apenas pequenas fissuras na área do concreto comprimido, na fase final do carregamento aplicado. Em uma análise geral, mudanças significativas no comportamento estrutural das vigas tradicionais e armadas com concreto reciclado não foram observadas, porém é perceptível que as vigas com concreto de ARC apresentaram menor rigidez à flexão e maiores deformações. O plano de fissuração observado entre os elementos foi similar, porém a viga com concreto reciclado apresentou maior quantidade de fissuras, a exemplo da série de vigas apresentada na Figura 2.6, ao se comparar o plano de fissuração dos elementos ensaiadas com agregados naturais, substituição apenas da parcela graúda e substituição total dos agregados naturais.

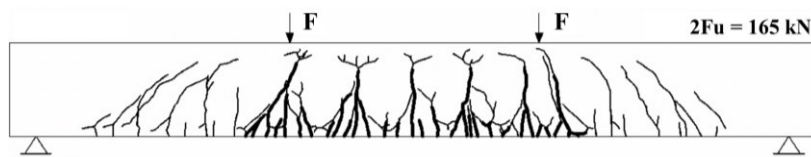
**Figura 2.6 – Padrões de fissuração e capacidade resistente de vigas (a) Com agregados naturais (b) Com agregados graúdos reciclados e miúdos naturais (c) Com agregados graúdos e miúdos reciclados**



(a)



(b)



(c)

Fonte: Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2007)

Assim, tratando-se dos teores de substituição, pode-se notar que diferenças pouco significativas foram observadas em termos de comportamento estrutural e plano de fissuração com a substituição do agregado natural por ARC, porém ao analisar deformações, as diferenças entre os concretos são mais significativas. No que tange à capacidade resistente, as vigas armadas com concreto reciclado que romperam por flexão apresentaram em média redução de 3,5% em relação às com concreto convencional. O deslocamento vertical imediato apresentou diferenças acentuadas, com aumentos máximos entre 18% e 100% em comparação ao concreto convencional.

Também em busca de analisar a viabilidade do concreto reciclado para fins estruturais, Sato *et al.* (2007) desenvolveram ensaios de flexão a quatro pontos em 37 vigas de concreto armado. Todas as vigas tinham seção transversal retangular de 15 cm de largura e 20 cm de altura, com comprimento total de 2,8 m. O agregado reciclado utilizado foi proveniente da britagem de corpos de prova e também de vigas, pilares e lajes que compunham edificações construídas em 1961 e 1967, em Hiroshima. Os teores de substituição analisados foram 100% da parcela graúda e consideração do agregado miúdo natural, 100% da parcela miúda e consideração do agregado graúdo natural e substituição total dos agregados naturais.

Além dos teores de substituição, os parâmetros analisados foram relação a/c dos concretos originais usados para produção do ARC (0,45, 0,55, 0,60 e 0,63), relação a/c do concreto de ARC (0,25, 0,3, 0,45 e 0,60), condições de cura do concreto e taxa de armadura longitudinal ( $\rho$ ) iguais a 0,59%, 1,06% e 1,65%. As resistências à compressão dos concretos desenvolvidos variaram entre 23,5 MPa e 106,4 MPa. Em relação ao comportamento estrutural, maiores deformações foram provenientes dos elementos revestidos com concreto reciclado. Em relação à largura das fissuras e capacidade resistente, resultados próximos entre si foram alcançados.

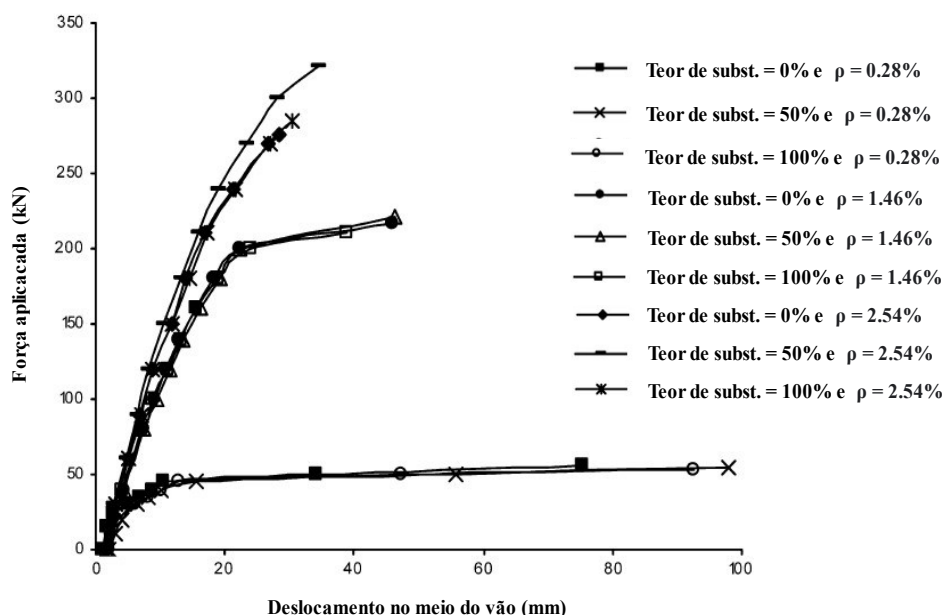
Li (2009) ao agrupar e analisar os resultados de pesquisas realizadas na China, a respeito do comportamento à flexão de vigas de concreto armado produzidas com ARC, verificou que de modo geral o teor de substituição não influenciou na capacidade resistente dos elementos, porém quanto maior o teor de agregado reciclado, maiores foram as

deformações imediatas, alcançando acréscimos de 10% a 24% de deformação em casos com 100% de substituição. Os resultados experimentais apontaram padrões de fissuras bem semelhantes aos observados tradicionalmente.

Ignjatović *et al.* (2013) apresentam uma análise comparativa do desempenho à flexão de vigas de concreto armado compostas por concreto de agregados naturais e ARC. Nesse estudo foram utilizadas como variáveis governantes três teores de substituição de agregados graúdos (0%, 50% e 100%) e três valores de taxa de armadura longitudinal (0,28%, 1,46% e 2,54%). Os dois tipos de concreto foram dosados para alcançar uma resistência à compressão de aproximadamente 42 MPa. Testes em escala real até a carga de ruptura em 9 vigas simplesmente apoiadas foram conduzidos a fim de investigar seu comportamento por meio de ensaios de flexão a quatro pontos. Todas as vigas tinham seção transversal retangular de 20 cm de largura e 30 cm de altura, com comprimento total de 3,5 m.

Os resultados das análises indicaram que o comportamento a flexão das vigas com concreto de ARC foi satisfatório em comparação ao comportamento das vigas convencionais. As curvas Força aplicada x Deslocamento no meio do vão, como pode-se observar na Figura 2.7, não foram significativamente afetadas pelo tipo de concreto.

**Figura 2.7 – Curvas Força aplicada x Deslocamento para os diferentes tipos de concreto e taxa de armadura longitudinal**

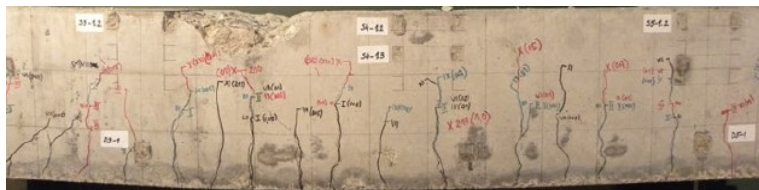


Fonte: Ignjatović *et al.* (2013)

O plano de fissuração desenvolvido nos elementos ensaiados apresentaram similaridades entre si. Porém, uma importante diferença observada encontra-se na magnitude da fissuração do concreto, de acordo com o teor de substituição. Com o aumento da parcela

reciclada do agregado graúdo, a fissuração do concreto foi mais acentuada, conforme ilustrado na Figura 2.8, onde as vigas com concreto de ARC quando fissuradas apresentaram o concreto fragmentado em pequenas partículas, quase reduzidas ao tamanho do agregado.

**Figura 2.8 – Plano de fissuração no terço médio do vão, para vigas com taxa de armadura igual a 1,46% (a) Com agregados naturais (b) Cm agregados graúdos reciclados - Teor de substituição: 50% (c) Com agregados graúdos reciclados - Teor de substituição: 100%)**



(a)



(b)



(c)

Fonte: Ignjatović *et al.* (2013)

O comportamento a longo prazo das vigas de concreto armado também apresentam um objeto de estudo interessante ao se avaliar a viabilidade do concreto de ARC aplicado a esses elementos. Choi e Yun (2013) analisaram 3 vigas de concreto armado, convencional e reciclado, sob carregamento por aproximadamente 380 dias, através de ensaios de flexão a quatro pontos. Os elementos possuíam seção transversal retangular com largura igual a 17 cm, altura de 20 cm e comprimento total igual a 2,3 m.

O ARC utilizado foi obtido a partir da demolição de estruturas de concreto, na Coreia do Sul. Os teores de substituição estudados foram 100% de substituição da parcela natural graúda por ARC, com a utilização do agregado miúdo natural e também produção de concretos com agregado graúdo natural e substituição de 50% da parcela de agregado miúdo, adicionalmente à produção de um concreto de referência, produzido com agregados graúdos e miúdos naturais. A resistência à compressão de projeto usada foi de 30 MPa.

Todas as vigas foram projetadas para romper por flexão, com taxa de armadura longitudinal igual a 0,5%. Seguindo as tendências da literatura, maiores fissuras foram observadas nas vigas produzidas com concreto de ARC, porém o panorama geral apresentou resultados similares aos observados para a viga de referência. No que tange aos deslocamentos instantâneos e totais, melhores resultados foram obtidos considerando a substituição apenas da parcela gráuda do agregado natural. As razões entre deslocamento a longo prazo e instantâneo para as vigas de ARC foram menores em comparação às produzidas com concreto convencional. Os valores iniciais de rigidez à flexão e os valores máximos de resistência à flexão foram semelhantes independentemente do tipo de agregado, enquanto a resistência máxima da viga com agregado natural se apresentou 20% maior do que a das vigas com agregado reciclado.

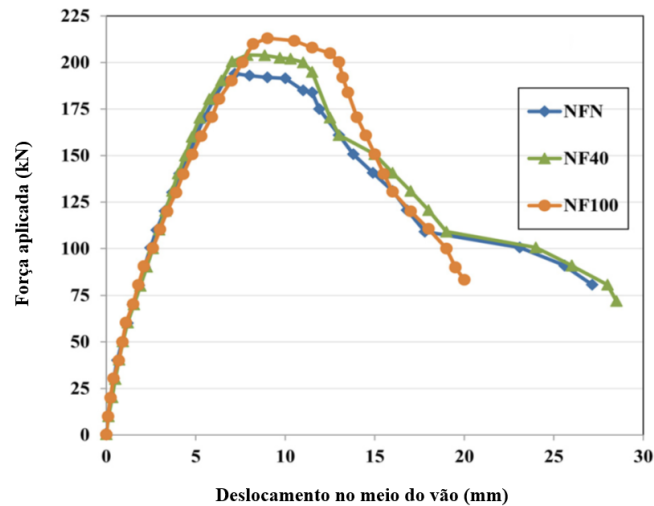
A análise de vigas com concreto reciclado também foi conduzida em Rangel *et al.* (2016), onde foram realizados ensaios de flexão em 4 vigas de concreto armado de seção transversal retangular com 15 cm de largura, 35 cm de altura e 1,7 m de comprimento, com substituição de 50% de agregado gráudo natural por ARC. Os dois tipos de concreto foram dosados para alcançar classes de resistência à compressão alvo (25 MPa e 65 MPa). A partir desse estudo, não foi possível determinar uma influência negativa da presença de agregado reciclado na capacidade resistente do elemento. Tratando-se da rigidez à flexão, as vigas com concreto convencional apresentaram resultados ligeiramente superiores, porém os autores relatam que essa diferença pode ser justificada pela variabilidade natural das propriedades do material.

Hamad *et al.* (2018) apresentaram uma investigação experimental a respeito do comportamento estrutural de vigas de concreto armado desenvolvidas com a substituição de diferentes teores da parcela gráuda do agregado natural por ARC (0%, 40% e 100%), derivado da britagem de corpos de prova. Adicionalmente os autores estudaram diferentes modos de falhas (flexão, cisalhamento e aderência entre as barras e aço e o concreto). Foram realizados ensaios de flexão a quatro pontos em 18 vigas, divididas em três grupos, de acordo com o teor de substituição analisado.

As vigas de seção retangular possuíam largura igual a 20 cm, altura igual a 30 cm e comprimento total de 2 m. Todos os elementos apresentavam as mesmas taxas de armadura longitudinal. A resistência à compressão de projeto para os concretos foi de 28 MPa. As vigas que romperam por flexão apresentaram planos de fissuração similares entre si, assim como curvas Força aplicada x Deslocamento no meio do vão, conforme apresentado na Figura 2.9 (NFN: teor de substituição igual a 0% ; NF40: teor de substituição igual a 40% e NF100: teor

de substituição igual a 100%). A resistência a flexão das vigas melhorou ligeiramente com o aumento do teor de substituição, em torno de 9% para substituição de 40% e 11,5% considerando substituição total.

**Figura 2.9 - Curvas Força x Deslocamento para vigas ensaiadas em Hamad *et al.* (2018)**



Fonte: Hamad *et al.* (2018)

Yang *et al.* (2020) por meio de um estudo experimental analisou 12 vigas de concreto reciclado e convencional. As vigas de seção retangular possuíam largura de 20 cm, altura igual a 30 cm e comprimento total de 3,3 m. Os parâmetros estudados foram quatro teores de substituição da parcela gráuda do agregado natural por ARC (0%, 30%, 50% e 100%) e três taxas de armadura longitudinal (0,50%, 0,79% e 1,14%). A resistência à compressão do concreto, considerando 100% de substituição do agregado natural pelo reciclado ficou aproximadamente 18% menor que à resistência do concreto de referência, para os teores de 50% e 30% as reduções ficaram em torno de 13% e 7%, respectivamente.

O padrão observado na propagação de fissuras, assim como comentado por Li (2009) foi similar aos obtidos em elementos de concreto armado convencionais, porém as vigas com concreto reciclado apresentaram fissuras mais acentuadas quando comparadas às vigas de referência. Em geral, a resistência à flexão foi afetada pelo teor de substituição adotado. Para vigas com baixas taxas de armadura (0,50% e 0,79%) os valores de resistência diminuíram de forma significativa com o uso dos agregados reciclados. Em contrapartida, para vigas com uma alta taxa de armadura (1,14%), o efeito do teor de substituição na capacidade resistente não foi tão significativo.

Um estudo de revisão bibliográfica que contempla um apanhado de desenvolvimentos científicos a respeito do comportamento estrutural de vigas de concreto reciclado armado foi

apresentado em Deresa *et.al* (2020). Os autores declaram que diante do presente na literatura, o modo de falha e padrão de fissuração das vigas permaneceu similar, independente do teor de substituição aplicado. No tocante ao efeito da armadura longitudinal, os autores comentam que os modos de falha são significativamente influenciados por este parâmetro, visto que a taxa de armadura pode modificar o modo de ruptura, de dúctil a um modo de ruptura frágil. Vigas com altas taxas de armadura longitudinal tendem a apresentar uma área maior de concreto danificado na zona comprimida, acentuadas com a presença do ARC, com a ruptura normalmente atribuída ao concreto comprimido, sem o escoamento da armadura longitudinal. Diferentemente do observado para vigas com baixa taxa de armadura longitudinal, onde as fissuras desenvolvidas na zona tracionada tendem a ser mais densas e espessas, independente do teor de substituição de ARC, indicando um modo de ruptura mais dúctil.

Para a mesma taxa de armadura longitudinal, as vigas com concreto reciclado analisadas apresentaram maiores deslocamentos máximos, quando comparadas as produzidas com concreto convencional e os deslocamentos aumentaram com o aumento do teor de substituição. Para o mesmo teor de substituição, os deslocamentos diminuíram à medida que a taxa de armadura longitudinal aumentou. No que diz respeito ao momento de fissuração, este diminuiu com o aumento do teor de substituição, considerando a mesma taxa de armadura longitudinal. O efeito do teor de substituição sobre o momento final resistente não foi significativo.

Ao comparar os estudos apresentados, no que está relacionado a viabilidade de aplicação do concreto reciclado em vigas armadas, estes refletem um panorama positivo acerca de sua utilização. De forma geral, grande parte dos estudos apontam que as vigas produzidas com concreto de ARC tendem a apresentar maiores deformações, porém capacidade resistente e planos de fissuração similares as produzidas com concreto convencional. Assim, reitera-se a importância de analisar as diferentes configurações de vigas ao aplicar o concreto de ARC, com o objetivo de atender aos critérios de utilização e limitações de deslocamentos para os elementos projetados.

### **2.1.3 Aplicação do concreto reciclado em vigas mistas de aço e concreto**

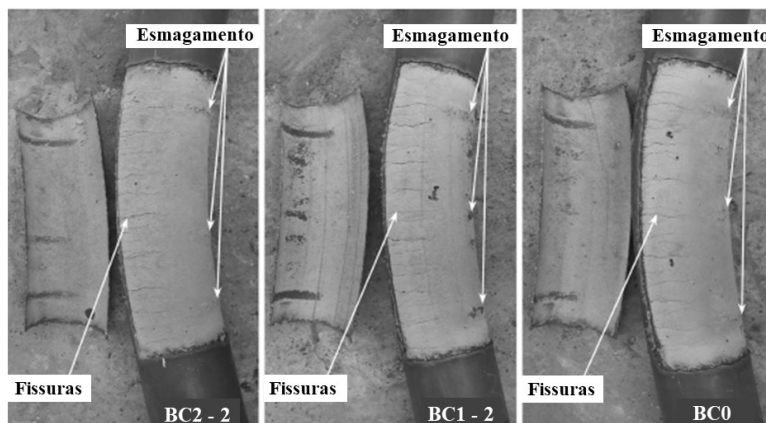
No que tange à aplicação do concreto reciclado em vigas mistas de aço e concreto, este apresenta-se como um campo de estudo ainda pouco explorado na literatura. Aliar os elementos mistos ao concreto reciclado, como apontado por Liu *et al.* (2020) não somente reduz o peso geral da estrutura como minimiza os problemas associados à baixa resistência comumente associada aos agregados reciclados.

Diante disso, Yang e Han (2006) analisaram o comportamento de vigas compostas por tubos metálicos com concreto convencional e reciclado. Os autores relatam que a utilização de tubos de aço para compor as vigas se apresenta como uma alternativa para minimizar os efeitos negativos provenientes dos resíduos de concreto, por meio do confinamento e proteção proporcionado pelos tubos. Foram submetidas 10 vigas à ensaios de flexão a 4 pontos. Os parâmetros principais estudados foram a geometria da seção transversal das vigas (circular e quadrada) e a influência dos teores de substituição da parcela graúda dos agregados por ARC (0%, 25% e 50%) no comportamento dos elementos.

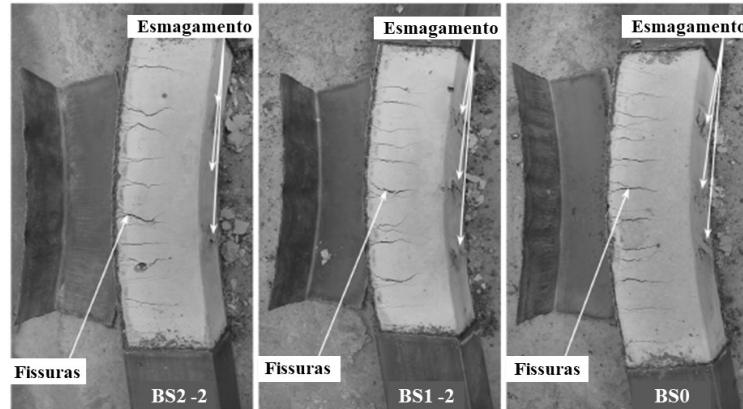
O concreto que originou os resíduos possuía resistência à compressão em torno de 50 MPa e o concreto resultante foi dosado com o objetivo de alcançar resistência à compressão por volta de 40 MPa. As seções transversais das vigas ensaiadas variaram entre diâmetros de 165 mm e espessura iguais a 2,57 mm, para seções circulares e lados iguais a 150 mm e espessura igual a 2,94 mm para seções quadradas. Todas as vigas possuíam 1,2 m de comprimento. Em relação aos tubos de aço, os utilizados nas seções circulares e quadradas possuíam resistência ao escoamento em torno de 345 MPa.

Os resultados do programa experimental presente em Yang e Han (2006) mostram que os modos de falha de todas as vigas foram similares entre si e o efeito do teor de substituição de ARC foi pouco significativo em seu comportamento. As vigas desenvolveram um modo de ruptura dúctil, com os tubos de aço apresentando instabilidade local na zona de compressão, enquanto o núcleo de concreto apresentou esmagamento no local onde ocorreu o fenômeno de instabilidade. Os modos de falha podem ser observados na Figura 2.10, onde as vigas seguem a nomenclatura B para representação dos elementos de vigas (*beams*); C ou S, caracterizando as seções transversais (circular-*circular* ou quadrado-*square*) e 0, 1 ou 2 caracterizando os teores de substituição iguais a 0%, 25% e 50%, respectivamente.

**Figura 2.10 – Modos de falha do concreto no meio vão das vigas estudadas em Yang e Han (2006)**



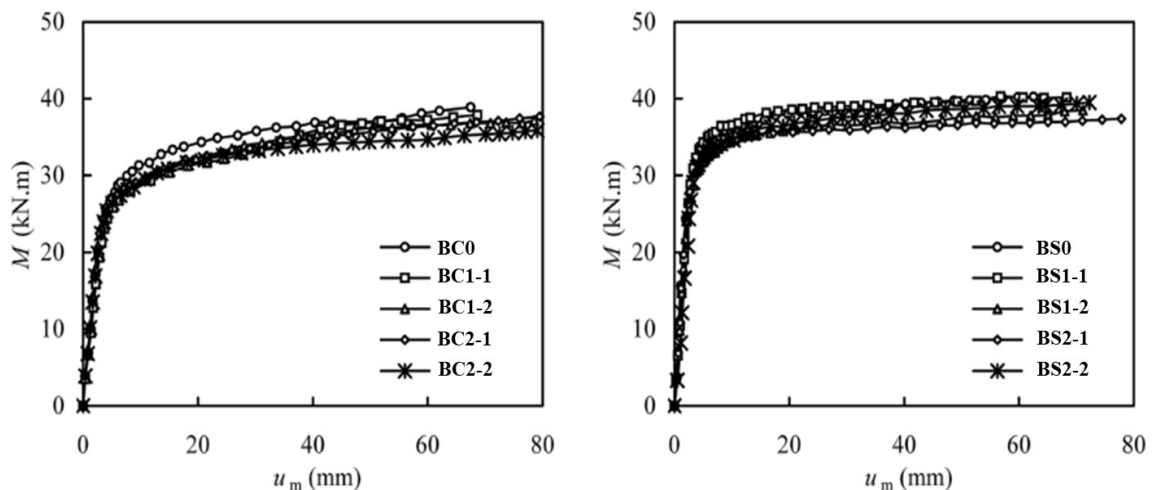




Fonte: Yang e Han (2006)

As curvas Momento fletor x Deslocamento vertical no meio do vão, resultantes dos ensaios experimentais de Yang e Han (2006) estão apresentados Figura 2.11. A rigidez à flexão da seção de todos os elementos com ARC encontram-se de 3,3% a 8,7% e 3,1% a 8,2% menores do que as vigas produzidas com concreto convencional. Os momentos fletores finais das vigas com concreto convencional foram de 3,5% a 8,1% maiores do que aqueles de vigas com ARC. De maneira geral, o comportamento das curvas foi bem próximo entre si, mesmo com as variações de momento fletor último, de forma concordante com as tendências da literatura para as estruturas tradicionais de concreto armado.

**Figura 2.11 – Curvas Momento x Deslocamento vertical no meio do vão das vigas estudadas em Yang e Han (2006)**



Fonte: Yang e Han (2006)

Dentro desse escopo de estudo, Qin, Cheng.Y e Cheng.Z (2012) realizaram ensaios de flexão a quatro pontos em 6 vigas de aço revestidas com concreto armado, sendo quatro delas com concreto de ARC e as outras duas de referência, com concreto convencional. O concreto reciclado considerado nesse estudo foi produzido com substituição parcial ou total do

agregado graúdo com a aplicação de diferentes teores (0%, 30%, 70% e 100%) e duas classes de resistência (30 MPa e 50 MPa). Os agregados reciclados foram obtidos a partir de amostras de concreto cuja resistência original era de 30 MPa. As vigas ensaiadas possuíam um comprimento igual a 2,3 m e seção transversal retangular de 180 mm de largura e 240 mm de altura. O perfil I de aço utilizado possuía resistência ao escoamento igual a 327 MPa.

Os resultados dos ensaios de flexão a quatro pontos apontaram um padrão de fissura e capacidade resistente similares aos encontrados em vigas mistas convencionais. Os maiores teores de substituição causaram acréscimos no deslocamento vertical último, visto que o módulo de elasticidade do concreto reciclado se apresentou inferior ao do concreto convencional. No entanto, a influência dos teores de substituição na resistência à flexão das vigas foi pouco significativa. Quanto maior os teores de substituição, resistências ligeiramente maiores foram obtidas.

Jia *et al.* (2013) apresentam um estudo acerca da aplicação do concreto de ARC em elementos de vigas mistas. O concreto que deu origem aos agregados foi proveniente da demolição de pavimentação, em meados de 2011. Três elementos de viga com comprimento total igual a 1,3 m e seção transversal retangular de 15x20 cm<sup>2</sup> foram submetidos ao ensaio de flexão a três pontos. O perfil de aço utilizado tinha resistência ao escoamento igual a 400 MPa. O teor de substituição de agregado graúdo natural por ARC aplicado foi de 40% e a resistência à compressão do concreto alcançada foi de 47,3 MPa. De acordo com os resultados experimentais, os autores explicitam que a capacidade resistente à flexão das vigas puderam atender às demandas estruturais e o plano de fissuração resultante foi similar ao observado para vigas convencionais, conforme ilustrado na Figura 2.12.

**Figura 2.12 – Plano de fissuração de viga ensaiada em Jia *et al.* (2013)**



Fonte: Jia *et al.* (2013)

Um dos aspectos de suma relevância no estudo e análise de estruturas mistas é o estabelecimento da efetiva interação entre o aço e o concreto. Nesse âmbito, importantes estudos vêm sendo desenvolvidos, a exemplo do apresentado em Zheng, Chen e Xu (2016) ao analisarem a aderência entre o perfil de aço laminado H e o concreto de ARC por meio de 22 ensaios de cisalhamento direto. Como alguns parâmetros principais foram estudados onze

teores de substituição (0, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 % e 100%), fonte e tamanho do agregado graúdo reciclado, espessura da capa protetora do concreto (40 mm, 50 mm, 60 mm e 70 mm) e armadura dos estribos. As seções transversais estudadas variavam de 180x180 mm<sup>2</sup>, 200x200 mm<sup>2</sup>, 220x220 mm<sup>2</sup> e 240x240 mm<sup>2</sup>. O perfil de aço utilizado tinha resistência ao escoamento entre 312,2 MPa e 328,4 MPa, para alma e mesas da viga I, respectivamente.

As diferentes fontes dos resíduos de concreto foram: lotes de estacas de concreto armado em serviço há mais de 50 anos com resistência à compressão projetada original em torno de 30 MPa e resíduos de corpos de prova de concreto de mesmo valor de resistência. Além disso, a influência do tamanho do agregado também foi investigada, com frações de tamanho de 5-20 mm e 5-31,5 mm, ambas com distribuições contínuas. Foi observado que em geral, a resistência de aderência entre o perfil de aço e o concreto reciclado cresceu significativamente com o aumento do teor de substituição do agregado graúdo, embora apresentasse inconstâncias em alguns pontos referentes aos teores de substituição.

Em termos de dimensão do agregado, em igualdade das demais propriedades, Zheng, Chen e Xu (2016) observaram que maiores agregados podem conduzir aos melhores resultados, o que pode ser justificado por o agregado graúdo em tamanho menor poder ser aderido com quantidades maiores de pasta de cimento, de modo que a quantidade de pasta de cimento na interface entre o aço e o concreto possa ser reduzida, como resultado, a ação de ligação química nesta situação poderia ser diminuída. Outra justificativa está relacionada ao processo de produção do agregado, que por passar por ciclos sucessivos de britagem para atingir tamanhos menores desenvolve um acúmulo de dano e conseqüentemente redução de resistência.

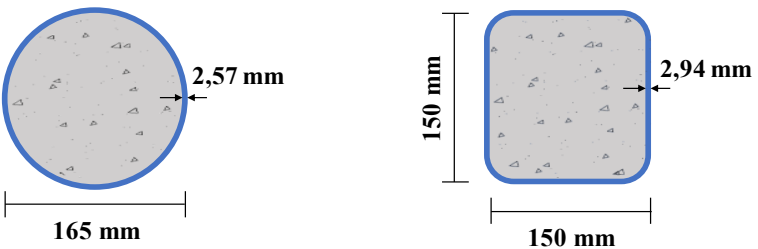
Zheng, Chen e Xu (2016) apresentam que a relação entre o desempenho dos agregados reciclados e as características do material de origem são bem perceptivas. Dentre as duas fontes estudadas, por conta das estacas ficarem expostas ao ambiente atmosférico por questões de manutenção, sua durabilidade pode ser negativamente afetada o que apresenta influência no resíduo de concreto utilizado como agregado, podendo reduzir a resistência da ligação entre o aço e o concreto. Esta constatação está em concordância com o apresentado em Li *et al.* (2015), que ao apresentar um compilado de pesquisas no âmbito da aplicação de concreto reciclado em elementos mistos de aço e concreto, pontua que a resistência da ligação aumenta com a utilização dos agregados reciclados também mais resistentes. Além disso, os padrões observados de fissuração das vigas de aço revestidas com concreto reciclado são semelhantes aos das vigas mistas convencionais.

Liu *et al.* (2018) também desenvolveram estudos para analisar o comportamento da interação entre o perfil de aço laminado H e o concreto reciclado, por meio de 27 ensaios de cisalhamento direto. O concreto armado reciclado em análise foi produzido com substituição parcial ou total do agregado graúdo por ARC com a aplicação de três diferentes teores (0%, 50% e 100%) e três classes de resistência (20 MPa, 30 MPa e 40 MPa). Além disso, os autores analisaram a espessura da camada protetora do perfil metálico (40 mm, 55 mm e 70 mm) e o comprimento da barra de aço embutida. As seções transversais estudadas variavam de 176x192 mm<sup>2</sup>, 206x222 mm<sup>2</sup>, 236x252 mm<sup>2</sup>. O perfil aço era composto de barras soldadas e possuía resistência ao escoamento de aproximadamente 350 MPa.

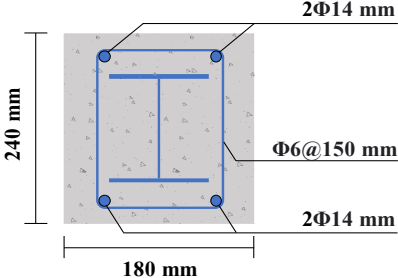
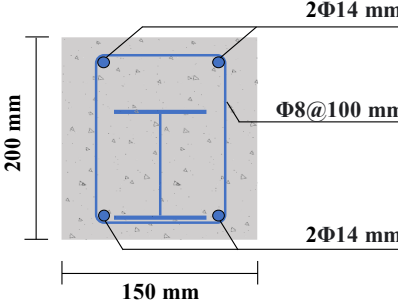
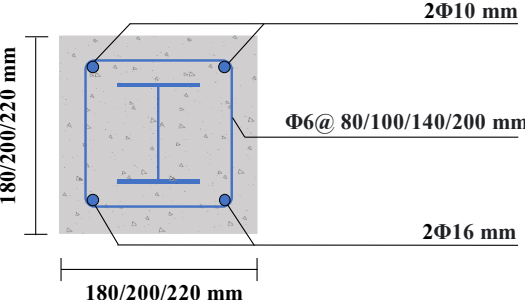
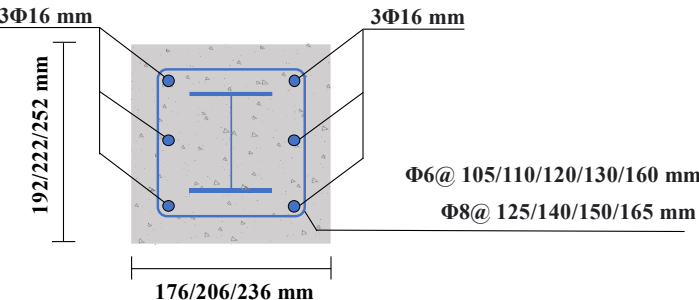
Como resultado, os autores observaram que o processo de ruptura da ligação e deslizamento foi semelhante àquele apresentado para o concreto convencional, porém a força última de aderência apresentou redução máxima próxima à 47% (100% de substituição) e 33% (50% de substituição) para resistência de 40 MPa. Portanto, os resultados sobre a influência da aplicação do concreto de ARC em estruturas mistas também apresentam divergências entre si, refletindo a heterogeneidade desse material. O Quadro 2.2 sintetiza as seções transversais dos elementos que foram apresentados, onde pode-se observar uma lacuna na análise desse material aliado à VMPR.

De forma geral, a partir do apresentado é possível observar uma tendência promissora para aplicação do concreto de ARC em vigas mistas de aço e concreto. O comportamento à flexão e conseqüentemente plano de fissuração apresentados pelos elementos aqui estudados evidenciaram similaridades com o observado para vigas revestidas com concreto convencional. Tratando-se de capacidade resistente, decréscimos foram observados, mas nada suficientemente significativo para deslegitimar o uso estrutural do concreto de ARC com perfis metálicos em elementos de vigas.

**Quadro 2.2 – Síntese das seções transversais estudadas nos documentos científicos pontuados nessa seção**

Documento científico	Seção transversal em estudo revestidas com concreto reciclado
Yang e Han (2006)	

Continua

Documento científico	Seção transversal em estudo revestidas com concreto reciclado
Qin, Cheng.Y e Cheng.Z (2012)	
Jia <i>et al.</i> (2013)	
Zheng, Chen e Xu (2016)	
Liu <i>et al.</i> (2018)	

Fonte : Própria autora

## 2.2 VIGAS MISTAS PARCIALMENTE REVESTIDAS

A utilização de elementos mistos está em expansão nas últimas décadas. As vantagens provenientes desses sistemas em comparação aos convencionais permeiam aspectos econômicos, arquitetônicos e também de planejamento das edificações. Estruturas mistas de aço e concreto viabilizam um ganho de rigidez, aliado à capacidade de vencer maiores vãos. Além disso, dependendo da estrutura, podem dispensar fôrmas, promovendo agilidade ao

processo construtivo. Porém, a incorporação desses tipos de estruturas carecem eficiente domínio dos materiais que os compõe, assim como de seus sistemas construtivos, além do estabelecimento da correta conexão entre eles, para legitimar o comportamento misto.

A partir de Malite (1993), pode-se observar que o surgimento da utilização dos sistemas mistos deu-se em meados do século XIX no Reino Unido e início do século XX nos Estados Unidos. Em âmbito nacional, a construção com elementos mistos de aço e concreto foi introduzida por volta da década de 1960. Porém, devido à crise econômica no país na década de 1980 houve uma redução significativa do uso de aço. Com a estabilidade econômica do país reestabelecida por volta de 1990, elementos mistos tornaram-se comuns novamente provocando interesse no desenvolvimento de pesquisas com o intuito de compreender seu comportamento (DE NARDIN; EL DEBS, 2013).

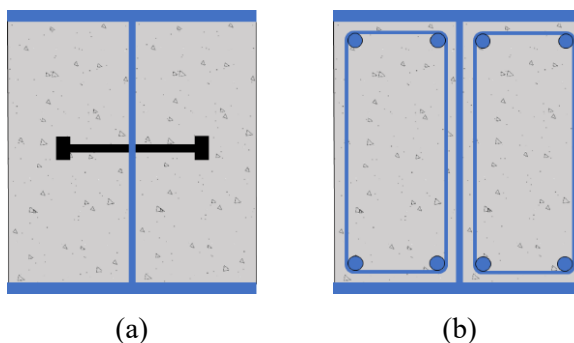
Tratando-se especificamente das vigas mistas de aço e concreto, Malite (1993) pontua que os primeiros estudos a respeito desses elementos foram desenvolvidos por volta de 1914, na Inglaterra por meio de ensaios de sistemas compostos para pisos. Existem registros de investigações experimentais também desenvolvidas no Canadá, em meados de 1922. Exemplos de seções desses elementos estão apresentados na Figura 2.13. No que tange às prescrições normativas, Cavalcanti (2010) comenta que a primeira normatização para estruturas mistas data 1930 e foi elaborada nos Estados Unidos e registrada pelo *New York City Building Code*. Nacionalmente, os elementos mistos foram introduzidos em diretrizes normativas no ano de 1986 e o código que rege o dimensionamento das vigas mistas é a ABNT NBR 8800 (2008).

A configuração das VMPR constituem vigas formadas por perfis de aço, parcialmente revestidas com concreto. Jiang, *et al.* (2016) apresentam que vigas com essa configuração de seção transversal foram originalmente projetadas para promover um aumento da resistência ao fogo, através da redução à exposição do perfil de aço, associado à introdução do concreto entre as mesas, como um material de baixa condutividade térmica. Porém, com o avanço dos desenvolvimentos científicos foi perceptível que o revestimento de concreto aliado ao perfil de aço também contribuía para melhor capacidade resistente dos elementos.

Além desses benefícios, pode-se citar que o embutimento do concreto garante aumento da rigidez em relação à seção de aço isolada, aumento da resistência às instabilidades locais da seção metálica, redução da altura total da viga mista e do piso como um todo, além de prover uma agilidade de execução, característica marcante do processo construtivo de estruturas mistas de aço e concreto (WENG; YEN; JIANG, 2002; DE NARDIN; EL DEBS, 2009). Essa solução também reflete melhoras no comportamento sísmico do elemento

estrutural, aumentando sua rigidez, a exemplo do indicado em Weng, Yen e Jiang (2002) sobre o crescimento da popularidade no continente asiático de estruturas mistas parcialmente/totalmente revestidas, após acontecimento de terremotos.

**Figura 2.13 – Exemplos de seções transversais de VMPR (a) Com conector de cisalhamento (b) Com armadura**



Fonte: Própria autora

Como desvantagens da utilização das vigas formadas por perfis de aço parcialmente revestidas com concreto, recorre-se a um fator que engloba as estruturas mistas em geral, a necessidade de garantir a eficiente interação entre os materiais, garantindo seu comportamento misto satisfatório. Além disso, as vigas parcialmente revestidas exigem um volume maior de concreto e conseqüentemente englobam maior peso à estrutura, em comparação as estruturas convencionais. Assim, a adoção desse sistema necessita estudos embasados acerca de onde pretende-se aplicar, com o objetivo de melhor atender as necessidades em estudo e seu impacto no projeto e processo construtivo.

Kindmann e Bergmann (1993) analisaram o comportamento das VMPR com concreto armado, através de ensaios de flexão a quatro pontos e também a três pontos, em um total de 12 elementos. Dentre as vigas ensaiadas, 2 apresentavam um sistema que continha a integração da laje. Os parâmetros principais analisados foram diferentes seções transversais e conexões de cisalhamento. De maneira geral, influências positivas foram observadas na capacidade resistente desses elementos em análise, considerando o revestimento de concreto.

Assi, Abed e Hunaiti (2002) também desenvolveram estudos experimentais em VMPR, com enfoque na influência do tipo de concreto na capacidade resistente. Para isso, foram ensaiadas vigas revestidas com concreto convencional e também com concreto leve, em comparação com as vigas metálicas. Foram realizados ensaios de flexão a quatro pontos em 12 elementos e o concreto entre as mesas do perfil, independentemente do tipo, ocasionou um aumento significativo na resistência das vigas de aço.

A implantação desses elementos parcialmente revestidos também foi analisada com foco em pontes. Nakamura e Narita (2003), através de investigação experimental realizada em 4 modelos de VMPR com concreto armado submetidas à flexão a quatro pontos, observaram um aumento da capacidade resistente ao comparar ao apresentado para as vigas metálicas. Os autores apontam que as VMPR são soluções úteis não apenas para novas pontes, mas também para reparo e reforço de pontes danificadas ou antigas.

Em busca de avaliar a influência do revestimento do perfil de aço na capacidade resistente à flexão, Hegger e Goralski (2006) realizaram ensaios de flexão a quatro pontos em 8 modelos de vigas e foi observado que o revestimento de concreto contribuiu significativamente para resistir aos esforços e prevenir instabilidade precoce do perfil. Os fatores principais de análise foram duas diferentes seções transversais e o esquema de carregamento, sendo quatro vigas submetidas à momento fletor positivo e o restante à momento fletor negativo. Elghazouli e Treadway (2008) estudaram o comportamento desses elementos revestidos com concreto armado, através de ensaios de flexão a três pontos em 8 vigas. Duas diferentes seções transversais foram avaliadas e como resultado os autores observaram um aumento em torno de 20% na capacidade resistente.

Também buscando analisar a influência do revestimento parcial de concreto armado, na capacidade resistente das vigas metálicas, Jiang, *et al.* (2016) promoveram ensaios de flexão a três pontos em 4 vigas, onde o parâmetro variante foi a taxa de armadura longitudinal. As vigas ensaiadas neste estudo foram integradas com a laje. Os autores pontuam que todos os elementos apresentaram maior capacidade resistente que o perfil de aço sem revestimento. Além disso, o revestimento da alma do perfil contribuiu para retardar o escoamento do aço da mesa inferior e, portanto, evitar um modo de falha local na viga de aço.

De maneira geral, diante do apresentado na literatura, é perceptível os benefícios em termos de capacidade resistente e comportamento estrutural das vigas mistas de aço e concreto parcialmente revestidas. Investigações científicas com foco principal no comportamento ao fogo desses elementos também têm fomentando importantes desenvolvimentos científicos. Dentre eles pode-se citar Hosser, Dorn e El-Nesr (1994), Kodaira *et al.* (2004), Piloto *et al.* (2013), Piloto *et al.* (2017) e Simões, Rocha e Munair (2018).

### **2.2.1 Comportamento misto**

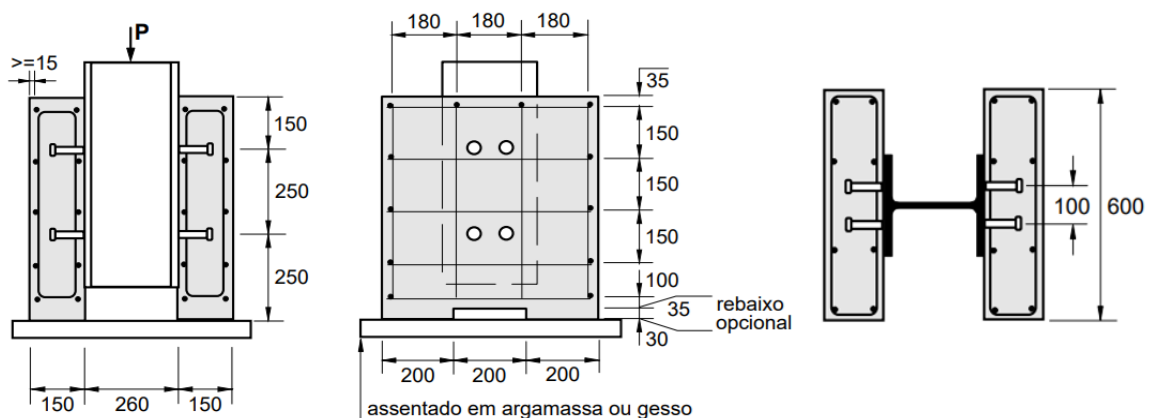
O comportamento misto de um elemento é essencialmente promovido pela garantia da atuação dos dois materiais combinados, de forma a potencializar seus benefícios, não apenas



transferindo os esforços longitudinais que surgem de um material para o outro, mas também evitando a separação transversal entre eles, fenômeno denominado de *uplift*. Desde as primeiras investigações sobre o comportamento das vigas mistas de aço e concreto, observou-se que a limitação do deslizamento relativo entre os dois materiais ocasionava um ganho de rigidez para o elemento estrutural. No ano de 1929, foi publicado um artigo sobre o dimensionamento de vigas de aço e lajes de concreto, enfatizando a necessidade de conectores de cisalhamento para estabelecer a ligação entre os dois materiais e garantir uma resistência ao cisalhamento longitudinal (PETRAUSKI, 2016).

A descrição analítica dos conectores de cisalhamento apresenta certo grau de complexidade e normalmente o comportamento relacionado ao cisalhamento longitudinal é descrito de forma experimental por meio da realização de ensaios de cisalhamento direto, também denominados de *push-out tests*. Uma configuração convencional desse ensaio pode ser observada na Figura 2.14, de acordo com o apresentado pelo EUROCODE 4 (2004).

**Figura 2.14 – Ensaio de cisalhamento direto segundo o EUROCODE 4 (Dimensões em mm)**

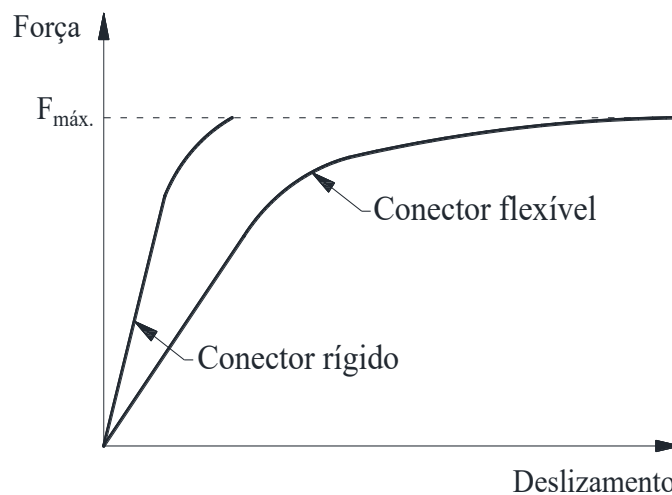


Fonte: EUROCODE 4 (2004)

O modelo a ser estudado é formado por um perfil de aço conectado à duas lajes de concreto armado por meio dos conectores de cisalhamento a serem avaliados. O ensaio consiste na aplicação de uma força vertical ao perfil de aço, onde mede-se o escorregamento relativo entre o concreto e o perfil para cada incremento de carga. A capacidade resistente e a ductibilidade dos conectores é, portanto, avaliada através da relação entre a força transmitida pelo conector e o escorregamento relativo medido na interface entre o aço e o concreto. A partir da capacidade de restrição ao escorregamento imposta pela ligação aço-concreto, os conectores de cisalhamento podem ser classificados como rígidos ou flexíveis. A Figura 2.15 ilustra essa classificação, de acordo com o comportamento da curva Força x Deslizamento.

Os conectores rígidos proporcionam uma conexão praticamente sem deslizamento relativo e apresentam baixa deformabilidade. O colapso de conexões com esse tipo de conector pode ser caracterizado por ruptura frágil, com esmagamento ou cisalhamento do concreto, o que é indesejável por questões de segurança estrutural. Já o conector flexível, sob carregamento crescente pode continuar a apresentar deformações, sem que haja ruptura, mesmo que já tenha alcançado sua máxima resistência, permitindo que os conectores próximos passem a receber mais força e também atinjam sua capacidade resistente. O conector flexível é mais propenso a fadiga que os conectores rígidos (VERÍSSIMO, 2007; CHAVES, 2009).

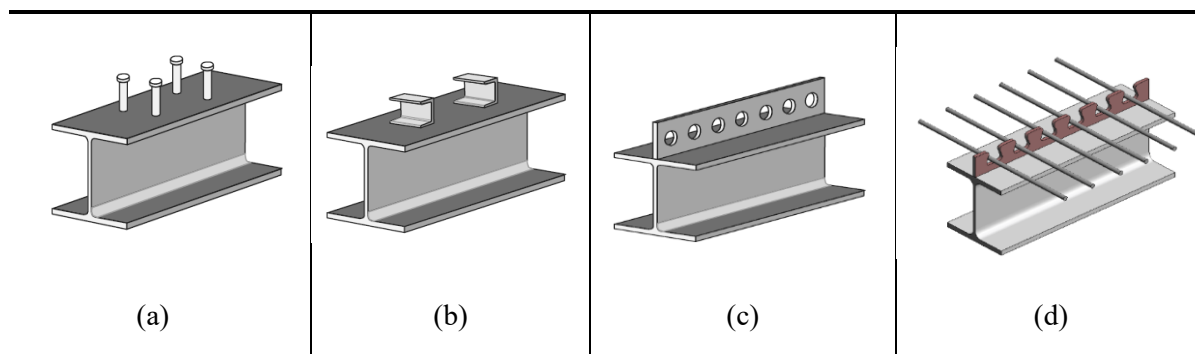
**Figura 2.15 – Classificação dos conectores (Diagrama Força aplicada x Deslizamento)**



Fonte: Adaptado de Chaves (2009)

Atualmente existe uma gama de tipologias de conectores de cisalhamento em utilização e também em desenvolvimento. Na Figura 2.16 é possível observar algumas delas. Os conectores do tipo pinos com cabeça (*stud bolt*) são os mais utilizados nacionalmente. Esses são conectores flexíveis e sua popularidade pode ser justificada pela facilidade de fabricação e conseqüente rapidez associada à sua produtividade. Veríssimo (2007) aponta que o conector isolado resiste a uma carga relativamente pequena, em algumas situações sendo necessário dispor de uma grande quantidade sobre a peça metálica, o que pode prejudicar os trabalhos a serem executados nessa região. Os conectores do tipo perfil U constituem perfis flexíveis, metálicos curtos em formato U com uma das mesas soldada ao perfil de aço e com o plano da alma perpendicular ao eixo longitudinal do perfil. A solução com o conector em perfil U tende a ser abandonada, pois a produtividade na instalação é pequena e seu emprego é mais indicado para sistemas com laje maciça.

Figura 2.16 – Exemplos de tipos de conectores de cisalhamento (a) Pinos com cabeça (b) Perfis U (c) *Perfobond* contínuo (d) *Crestbond* contínuo



Fonte: Veríssimo (2007)

Em busca de alternativas aos pinos com cabeça, para aumentar a resistência à fadiga, em 1987 foram desenvolvidos os conectores *perfobond*, inicialmente com objetivo de aplicação em pontes. Esse é constituído de uma chapa de aço retangular com vários furos, soldada ao perfil de aço, podendo ser contínuo ou descontínuo. Ao se realizar a concretagem, o concreto envolve o conector e preenche suas aberturas circulares, constituindo um mecanismo de conexão entre os materiais. A nível nacional, Veríssimo (2007) desenvolveu os conectores do tipo *crestbond*, que assim como o *perfobond* envolve uma chapa de aço, porém com reentrâncias trapezoidais, responsáveis pela solidarização do concreto ao conector, apresentando uma resistência superior ao *perfobond*, com uma maior facilidade de execução, também podendo apresentar-se como contínuo ou descontínuo.

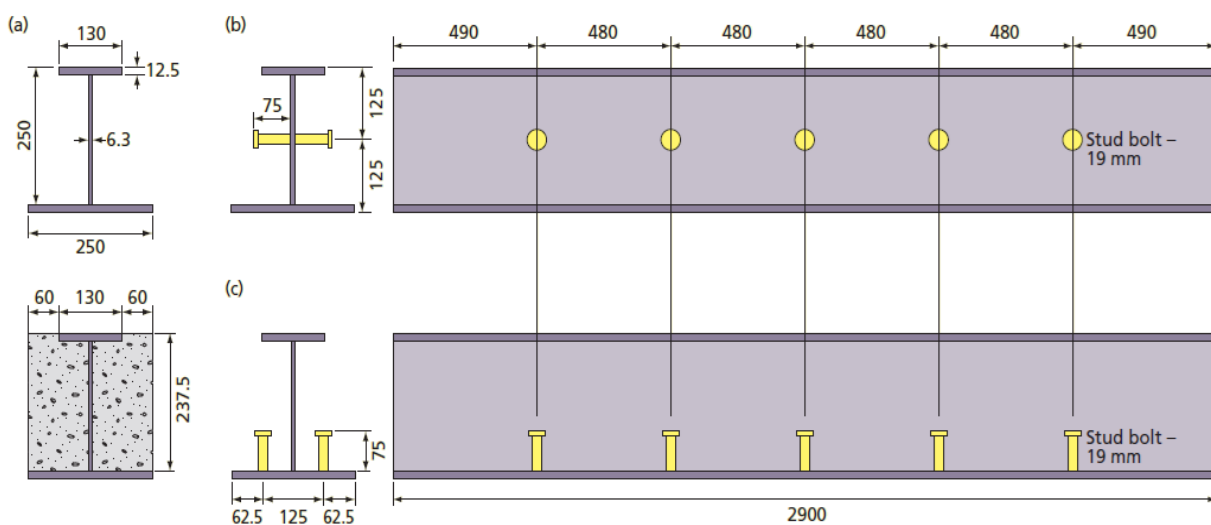
O tipo/grau de interação entre os elementos também é essencial para caracterizar o comportamento estrutural, a rigidez e ductibilidade da ligação, podendo ser classificada como completa, parcial ou nula. Na interação completa, considera-se que o escorregamento relativo entre aço e concreto pode ser desprezado nos cálculos. Quando é observado um expressivo escorregamento relativo ao nível da ligação, caracteriza-se a interação parcial. A interação nula é caracterizada quando os materiais se comportam de forma independente, sem que haja transferência de esforços entre eles. O efeito do escorregamento afeta a distribuição de tensões na seção, a distribuição do fluxo de cisalhamento longitudinal na conexão e, conseqüentemente, a deformabilidade das vigas. O acréscimo de deslocamentos, provocado pelo efeito de escorregamento na interação parcial, é considerado pelas normas em geral (ALVA; MALITE, 2005).

Além do grau de interação, é importante destacar o grau de conexão desenvolvido nos elementos mistos, podendo ser total, parcial ou nulo. A conexão total é caracterizada quando a viga chega à ruína por ruptura do concreto ou escoamento do perfil de aço, ou seja, mesmo

que conectores sejam acrescentados ou conectores mais resistentes sejam utilizados na ligação, influências significativas não serão refletidas no momento fletor resistente. O grau de conexão parcial acontece quando são utilizados conectores insuficientes, assim, a ruptura da viga é comandada pela capacidade resistente da interface entre o perfil de aço e o concreto. A conexão nula pode ser definida quando não são utilizados conectores de cisalhamento, onde o comportamento misto não é devidamente estabelecido. Assim, pode-se inferir que o grau de conexão está relacionado à resistência da interface entre o aço e o concreto, enquanto o grau de interação está associado ao deslizamento relativo desenvolvido entre os materiais.

Além da tipologia do conector a ser empregado na viga mista, outros fatores apresentam suma relevância para análise do seu comportamento. Parâmetros como resistência do concreto, espessura da laje, espaçamento, quantidade, diâmetro, comprimento e posicionamento dos conectores têm influência sobre sua capacidade resistente. No que tange ao posicionamento e disposição dos conectores, estudos presentes na literatura reiteram sua influência no comportamento estrutural, a exemplo da análise pontuada em De Nardin e El Debs (2009) onde foi avaliado, através de ensaios de flexão a quatro pontos desenvolvidos em VMPR, o melhor dentre dois arranjos de conectores. As configurações ensaiadas estão ilustradas na Figura 2.17 e foram conectores do tipo *stud bolt* soldados horizontalmente na alma do perfil, verticais soldados na mesa inferior do perfil e um modelo de referência sem conectores, onde a transferência de esforços de cisalhamento se dava apenas pela aderência natural entre o aço e o concreto.

**Figura 2.17 – Modelos ensaiados (a) sem conectores (b) conectores horizontais (c) conectores verticais (Dimensões em mm)**



Fonte: De Nardin e El Debs (2013)

A partir dos resultados, observou-se que o arranjo mais eficiente, em termos de capacidade resistente foi o composto por conectores soldados verticalmente na mesa inferior do perfil de aço. Entretanto, os resultados provenientes das outras duas configurações, mesmo com resultados inferiores, foram próximos ao proveniente desse arranjo.

Como estudo complementar ao apresentado em De Nardin e El Debs (2009), Cavalcanti e De Nardin (2011) realizaram ensaios de flexão a quatro pontos em quatro VMPR com a mesma configuração apresentada na Figura 2.17, porém adicionando armaduras longitudinais e transversais aos elementos estruturais. No que se refere os modos de falha observados, visualmente não ocorreram danos nos conectores de cisalhamento, sendo assim, a ruptura de conectores ou do concreto em seu entorno não foi observada, descaracterizando ruínas relacionadas à interface entre aço e concreto.

### **2.2.2 Análises numéricas de vigas mistas**

A compreensão de um problema de forma mais ampla requer muitas abordagens, além de análises detalhadas de diferentes propriedades. Essa elevada demanda muitas vezes não consegue ser atendida integralmente por programas experimentais, por diversos fatores, a exemplo de tempo disponível, infraestrutura, mão de obra e altos custos para sua realização. Diante disso, as simulações numéricas se apresentam como uma iniciativa mais acessível, permitindo a extrapolação de resultados experimentais através de estudos paramétricos e consequentemente possibilitando a ampliação das análises.

A representação de um modelo físico através da simulação numérica apresenta uma série de complexidades. Assim, estratégias e simplificações são adotadas como forma de representar o objeto da simulação, porém reduzindo custos computacionais. No que tange às estruturas mistas, vários estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de caracterizar e estudar seu comportamento. Dentre estes documentos científicos, alguns relevantes estudos são brevemente descritos a seguir, com enfoque principal nas estratégias adotadas para caracterização da interface entre o aço e o concreto.

O Quadro 2.3 apresenta um resumo dos documentos listados nessa seção, com detalhes sobre os tipos de elementos finitos adotados para representar os componentes do modelo, além dos modelos constitutivos aplicados para caracterizar os materiais e as interações características da interface entre o aço e o concreto. É importante ressaltar que todas as análises aqui apresentadas consideraram a não linearidade física dos materiais e apresentaram resultados satisfatórios em seu escopo de estudo.

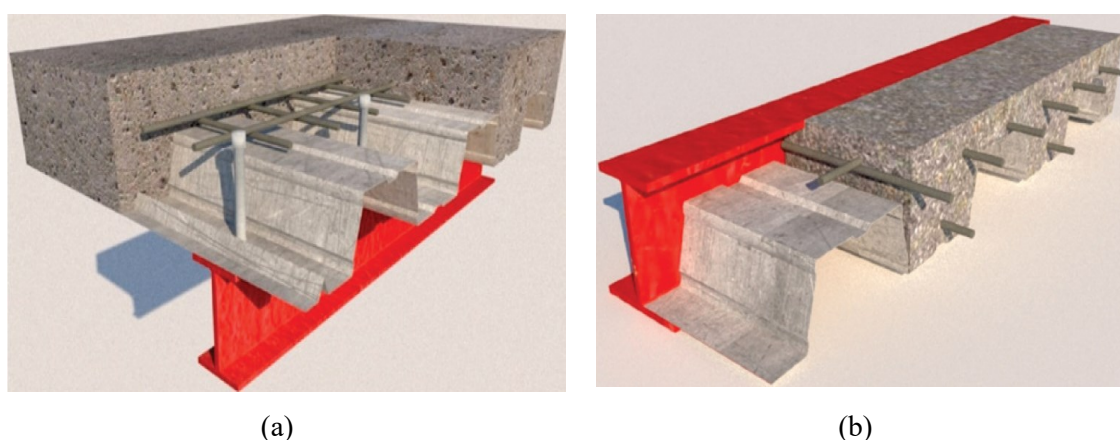
Kotinda (2006) realizou uma análise numérica de vigas mistas convencionais, simplesmente apoiadas, submetidas à flexão com carregamento concentrado no meio do vão e também uniformemente distribuído. O modelo desenvolvido possuía uma geometria tridimensional e a simetria foi aplicada, sendo simulado apenas  $\frac{1}{2}$  da estrutura. Seu enfoque principal era o estudo da interface entre o aço e o concreto. A estratégia adotada pelo autor para caracterizar o contato entre o perfil de aço e o concreto dispensa o conhecimento dos parâmetros representativos da interface oriundos dos ensaios do tipo *push-out*, sendo necessário apenas conhecer as características geométricas e constitutivas dos conectores. A interação foi caracterizada por um par de contato que permite a consideração de atrito e coesão entre as partes, sendo esses os parâmetros de entrada. Kotinda (2006) adotou para o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) entre aço e concreto o valor de 0,4 e para coesão foi estimado um valor de 0,18 kN/m<sup>2</sup>.

No que tange às VMPR, Cavalcanti (2010) simulou elementos armados sob flexão a quatro pontos. O autor considerou a simetria, simulando  $\frac{1}{2}$  da estrutura. O modelo numérico desenvolvido possuía uma geometria bidimensional e para a caracterização do contato entre o aço e o concreto a estratégia utilizada foi a aplicação do modelo de interface *bond-slip*. Esse modelo é caracterizado por uma relação inicial linear, regida por rigidezes normal e tangencial da interface, que consiste na relação entre tensão e deslocamento na direção estudada, enquanto o comportamento não linear é caracterizado por uma relação Tensão x Deslizamento. Cavalcanti (2010) adotou para as rigidezes normal e tangencial o valor de 100000 N/mm<sup>3</sup>. Para caracterizar o comportamento não linear, foi adotado o modelo Doerr's com resistência à tração de 10 MPa e escorregamento máximo igual a 0,01mm. O autor pontua que a escolha desses parâmetros foi realizada com o objetivo da interface não interferir no comportamento global do modelo, fato que não ocorreu nos modelos experimentais tomados como referência.

Um sistema que está associado às VMPR são os pisos mistos de pequena altura (*slim floor*), que constituem um sistema de piso onde a laje é embutida na altura da viga. A Figura 2.18 evidencia a configuração tradicional e a configuração de um piso misto de pequena altura. Nesse contexto, Ramos (2010) realizou uma análise numérica de uma configuração de *slim floor* submetido à flexão, considerando uma viga biapoiada com quatro cargas concentradas, buscando validação de suas estratégias a partir de resultados experimentais e também provenientes de outras simulações numéricas. O modelo desenvolvido consistia em uma geometria tridimensional, onde as condições de simetria não foram adotadas.

Diferentemente do apresentado em Cavalcanti (2010), Ramos (2010) optou pela utilização de apenas parâmetros lineares para caracterização da interface entre o aço e o concreto, desconsiderando o comportamento não linear, para isso caracterizou a rigidez normal com o valor de  $0,1 \text{ N/mm}^3$  e a tangencial igual a  $0,01 \text{ N/mm}^3$ . O autor comenta que o bom comportamento do modelo, mesmo com consideração de certa imprecisão para caracterização da interface entre os materiais pode ser justificado por apresentar um comportamento próximo ao observado para o modelo adotando interação completa entre os materiais.

**Figura 2.18 – Pisos mistos (a) Piso misto convencional (b) Piso misto de pequena altura**



Fonte: Kochem e De Nardin (2020)

Para investigar vigas mistas convencionais, Pathirana *et al.* (2016) desenvolveu análises numéricas para simular ensaios de flexão a quatro pontos. Os modelos possuíam geometria tridimensional e foram estudados com aplicação de condições de simetria, sendo simulado apenas  $\frac{1}{2}$  da estrutura. As propriedades adotadas para caracterizar as superfícies de contato (*Surface-to-surface contact*) foram destinadas à definição do comportamento normal e tangencial entre as superfícies. O comportamento normal foi definido como contato rígido (*hard contact*), representando uma penetração imperceptível entre as superfícies e o comportamento tangencial foi caracterizado pela adoção de um coeficiente de atrito igual a 0,4, na seleção do método de penalidade (*penalty*).

Com estratégias próximas às apresentadas por Ramos (2010), Souza (2016) também realizou análises numéricas de sistemas de pisos mistos de pequena altura. No modelo tridimensional simulado foram aplicadas condições de simetria, sendo representado apenas  $\frac{1}{2}$  da estrutura. O modelo foi analisado sob ensaio de flexão a quatro pontos. A autora optou pela caracterização apenas da interface, sem a modelagem dos conectores. Essa estratégia se mostrou eficiente em comparação com a investigação experimental. A interface foi

caracterizada pelo modelo *Coulomb-Friction*. Assim, além das rigidezes iniciais, a coesão e ângulo de atrito interno também são parâmetros de entrada. A coesão adotada para caracterizar o problema foi de 1,16 MPa, com rigidezes normal e tangencial igual a 1 MPa/mm e coeficiente de atrito interno igual a 0,1°.

Souza e Silva (2018) desenvolveram a modelagem de vigas mistas tradicionais de aço e concreto protendidas submetidas à flexão. O modelo tridimensional foi desenvolvido com aplicação das condições de simetria, sendo simulado apenas  $\frac{1}{2}$  da estrutura em estudo. Para a caracterização da interface entre o perfil de aço e o concreto, duas metodologias foram adotadas, considerando interação completa e a simulação dos conectores de cisalhamento, com definição de interações de contato entre o perfil de aço e a laje de concreto. Na direção tangencial, o comportamento foi caracterizado pelo método de penalidade, permitindo o movimento relativo das superfícies, com coeficientes de atrito que igual a 0,4. Na direção normal o comportamento foi definido como contato rígido. Souza e Silva (2018) obtiveram boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais, pontuando que os modelos sem conectores apresentaram um comportamento mais rígido, visto que foram impedidos os deslizamentos na interface.

No estudo numérico realizado por Borghi (2020), algumas tipologias de pisos mistos de pequena altura foram simulados para análise de seu comportamento à flexão. Os modelos possuíam geometria tridimensional e foram estudados sem aplicação de condições de simetria. Para caracterizar a interface entre o perfil de aço e o concreto, assim como Souza e Silva (2018), foi utilizado a ferramenta *Surface-to-surface contact* com a definição do comportamento na direção normal e tangencial. Na direção tangencial, o comportamento foi caracterizado pelo método de penalidade, permitindo o movimento relativo das superfícies, com coeficientes de atrito que variaram de acordo com a tipologia estudada, entre 0,3, 0,4 e 0,5. Na direção normal o comportamento foi definido como contato rígido.

Rossi *et al.* (2020) em análise numérica de vigas mistas convencionais caracterizou a interface entre o perfil de aço e o concreto seguindo as mesmas estratégias adotadas em Pathirana *et al.* (2016). Zhang e Yang (2020) realizaram um estudo numérico sobre uma configuração de vigas mistas parcialmente pré-moldadas e parcialmente revestidas, submetidas à ensaios de flexão. Os modelos possuíam geometria tridimensional e foram estudados com aplicação de dupla simetria, sendo modelado  $\frac{1}{4}$  da estrutura. Para caracterizar a interação entre o perfil de aço e o concreto moldado no local, os autores utilizaram o artifício de simular elementos de mola nos nós correspondentes à interface, onde suas



propriedades foram inseridas conforme curva Força aplicada x Deslizamento prevista analiticamente.

Quadro 2.3 – Síntese dos documentos científicos pontuados sobre análises numéricas

Documento Científico	Software	Geometria	Componente	Estrutura	Comportamento do material
Kotinda (2006)	ANSYS	Viga mista convencional	Concreto	Elementos sólidos com 8 nós	Modelo <i>Concrete</i> à tração e modelo multilinear com encruamento isotrópico à compressão
			Aço da armadura	Inseridas no concreto em forma de taxa	Elasto-plástico perfeito
			Perfil de aço	Elementos de casca com 4 nós	Elasto-plástico multilinear com encruamento isotrópico
			Conectores	Elemento de viga com 3 nós	Bi-linear com encruamento isotrópico
			Interface entre o perfil de aço e o concreto	Elementos de contato	Modelo de Mohr-Coulomb
Cavalcanti (2010)	DIANA	Viga mista parcialmente revestida	Concreto	Elementos sólidos com 8 nós	Modelo de fissuração distribuída baseado na deformação total
			Aço da armadura	Elemento de armadura	Elasto-plástico perfeito
			Perfil de aço	Elementos sólidos com 8 nós	Elasto-plástico perfeito
			Interface entre o perfil de aço e o concreto	Elementos de interface com 6 nós	Modelo <i>Bond-slip</i>
Ramos (2010)	DIANA	Piso misto de pequena altura	Concreto	Elementos sólidos com 20 nós	Modelo de fissuração distribuída baseado na deformação total
			Perfil de aço	Elementos sólidos com 20 nós	Elasto-plástico perfeito
			Interface entre o perfil de aço e o concreto	Elementos de interface com 16 nós	Modelo linear com rigidez normal e transversal

Continua

Documento Científico	Software	Geometria	Componente	Estrutura	Comportamento do material
Pathirana <i>et al.</i> (2016)	ABAQUS	Viga mista convencional	Concreto	Elementos sólidos com 8 nós	Modelo de dano associado à plasticidade
			Aço da armadura	Elementos de treliças com 2 nós	Bi-linear com encruamento isotrópico
			Perfil de aço	Elementos sólidos com 8 nós	Bi-linear com encruamento isotrópico
			Conectores	Elementos sólidos com 8 nós	Elasto-plástico multilinear
			Interface entre o perfil de aço e o concreto	Simulação de contato	Interação de contato penalizada explícita do tipo <i>Surface-to-surface</i>
Souza (2016)	DIANA	Piso misto de pequena altura	Concreto	Elementos sólidos com 8 nós	Modelo de fissuração distribuída baseado na deformação total
			Perfil de aço	Elementos sólidos com 8 nós	Elasto-plástico perfeito
			Interface entre o perfil de aço e o concreto	Elementos de interface com 8 nós	Modelo <i>Coulomb-friction</i>
Souza e Silva (2018)	ABAQUS	Viga mista protendida	Concreto	Elementos sólidos com 8 nós	Modelo de dano associado à plasticidade
			Aço da armadura	Elementos de treliças com 2 nós	Elasto-plástico perfeito
			Perfil de aço	Elementos de casca com 4 nós	Elasto-plástico multilinear
			Conectores	Elementos de vigas com 2 nós	Bi-linear com encruamento isotrópico
			Interface entre o perfil de aço e o concreto	Simulação de contato	Interação de contato penalizada explícita do tipo <i>Surface-to-surface</i>

Continua

Documento Científico	Software	Geometria	Componente	Estrutura	Comportamento do material
Borghi (2020)	ABAQUS	Piso misto de pequena altura	Concreto	Elementos sólidos com 8 nós	Modelo de dano associado à plasticidade
			Aço da armadura	Elementos de vigas com 2 nós	Elasto-plástico perfeito
			Perfil de aço	Elementos de casca com 4 nós	Bi-linear com encruamento isotrópico
			Interface entre o perfil de aço e o concreto	Simulação de contato	Interação de contato penalizada explícita do tipo <i>Surface-to-surface</i>
Rossi <i>et al.</i> (2020)	ABAQUS	Viga mista convencional	Concreto	Elementos sólidos com 8 nós	Modelo de dano associado à plasticidade
			Aço da armadura	Elementos de treliças com 2 nós	Bi-linear com encruamento isotrópico
			Perfil de aço	Elementos de casca com 4 nós	Elasto-plástico multilinear com encruamento isotrópico
			Conectores	Elementos sólidos com 8 nós	Elasto-plástico perfeito
			Interface entre o perfil de aço e o concreto	Simulação de contato	Interação de contato penalizada explícita do tipo <i>Surface-to-surface</i>
Zhang e Yang (2020)	ABAQUS	Vigas mistas parcialmente pré-moldadas e parcialmente revestidas	Concreto	Elementos sólidos com 8 nós	Modelo de dano associado à plasticidade
			Aço da armadura	Elementos de vigas com 2 nós	Bi-linear com encruamento isotrópico
			Perfil de aço	Elementos sólidos com 8 nós	Bi-linear com encruamento isotrópico
			Interface entre o perfil de aço e o concreto	Elementos de mola	Interação de contato caracterizada pela relação Força aplicada x Deslizamento

A partir do apresentado no Quadro 2.3 pode ser observada uma tendência no uso de elementos sólidos para representar o concreto, enquanto para a representação do perfil de aço são apresentadas abordagens com elementos sólidos e também elementos de casca. Na caracterização do material, diferentes estratégias foram pontuadas, desde a consideração de modelos constitutivos mais simplificados até representações mais complexas. Um ponto distinto entre os estudos discutidos se encontra na representação e caracterização da interface. Para legitimação do comportamento misto, são observadas abordagens que consideram a modelagem dos conectores e também estudos que caracterizam a interface sem a necessidade de simular os conectores de cisalhamento. Esses pontos devem ser bem avaliados de acordo com o problema em estudo de forma a viabilizar sua caracterização mais representativa aliando bons resultados à parâmetros referentes ao custo computacional.

### **2.2.3 Modelos analíticos para previsão de momento fletor resistente**

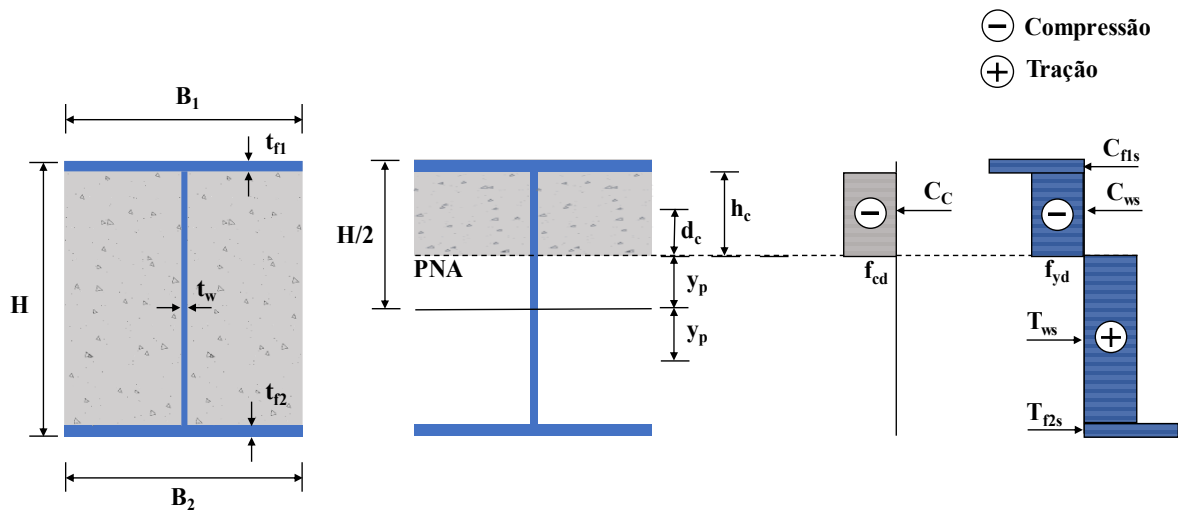
O estudo e dimensionamento das vigas mistas de aço e concreto é contemplado pela maior parte dos códigos normativos vigentes, porém a configuração foco desse trabalho, com o revestimento parcial do perfil metálico com concreto ainda é apresentado como um campo ativo de pesquisa. O Eurocode 4 (2004) incorpora em seu escopo o dimensionamento das vigas mistas de aço e concreto em sua configuração convencional e também breves apontamentos na configuração apresentada na Figura 2.13b, com a consideração de armaduras longitudinais e transversais embutidas na seção em estudo.

O código normativo europeu limita o revestimento das vigas mistas ao concreto armado, não contemplando seu dimensionamento em configurações compostas apenas com concreto simples. O comportamento misto pode ser assim alcançado por conectores de cisalhamento ou apenas pela presença das armaduras no elemento de concreto. A ABNT NBR 8800 (2008) engloba apenas o dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto convencionais. Assim, a configuração de VMPR com concreto simples tem fomentado o desenvolvimento de métodos analíticos com o intuito de prever a capacidade resistente do elemento através de formulações para o cálculo do momento fletor resistente da seção em estudo. A seguir são apresentados alguns modelos analíticos presentes na literatura para realizar essa previsão. Esses foram padronizados como forma de comparar as diferentes sugestões para o cálculo da capacidade resistente.

Kindmann e Bergmann (1993) realizaram um estudo experimental e teórico com o intuito de apresentar uma proposta ao código normativo europeu no que tange à consideração da influência do concreto entre as mesas do perfil de aço e também das barras de armaduras

longitudinais na resistência à flexão desses elementos estruturais. O método analítico desenvolvido é baseado na teoria da plasticidade da seção e também na teoria de viga de Bernoulli. As hipóteses simplificadoras adotadas pelos autores foram: consideração de interação completa entre os elementos de aço e concreto; momento resistente calculado considerando contribuição plástica apenas do perfil de aço, do concreto submetido à compressão e das barras de armadura longitudinais. Um esquema representativo da viga em estudo com a representação dos blocos de tensão e forças resultantes está ilustrado na Figura 2.19. Foi excluído deste esquema a influência das barras de armadura, visto que esse trabalho possui foco principal no uso do concreto simples.

Figura 2.19 – Esquema teórico para cálculo de  $M_r$  conforme Kindmann e Bergmann (1993)



Fonte: Adaptado de Kindmann e Bergmann (1993)

É importante destacar que Kindmann e Bergmann (1993) consideraram em suas formulações apenas seções de perfis de aço do tipo I com dupla simetria, portanto,  $B_2 = B_1$  e  $t_{f1} = t_{f2}$ . As formulações propostas estão apresentadas nas equações 2.1 e 2.2, respectivamente para o cálculo da  $y_p$  e para momento fletor resistente.

$$y_p = \frac{f_{cd} \left( \frac{-B_2 H}{2} + B_2 t_{f1} + \frac{t_w H}{2} - t_w t_{f1} \right)}{f_{cd} (t_w - B_2)} \quad (2.1)$$

$$M_r = Z_s f_{yd} + y_p^2 t_w f_{cd} + A_c f_{cd} d_c \quad (2.2)$$

Também com intuito de contribuir para o desenvolvimento de modelos teóricos para capacidade resistente de VMPR, Assi, Abed e Hunaiti (2002) realizaram um estudo teórico e

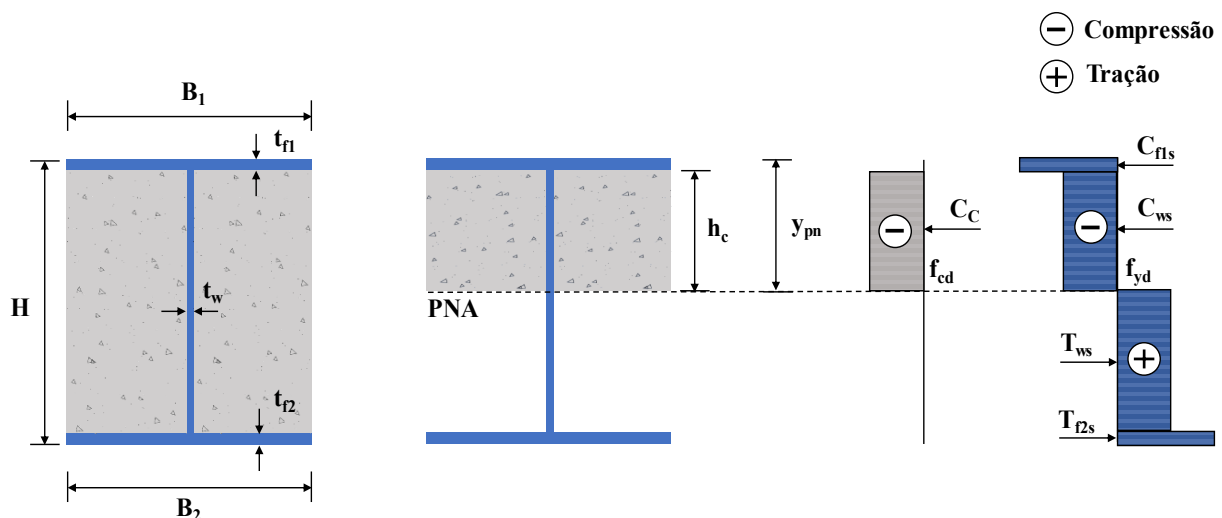
experimental com o objetivo de analisar o comportamento à flexão de VMPR com concreto convencional e também com concreto leve. Para o cálculo do momento fletor resistente foram adotadas as seguintes hipóteses simplificadoras: interação completa entre perfil de aço e revestimento de concreto; a tensão de escoamento foi adotada para as peças do perfil metálico tanto submetidos à tração, quanto à compressão; o encruamento do aço não foi considerado; o concreto tracionado não foi englobado para cálculo do momento resistente; considerou-se que acima da linha neutra plástica, o concreto comprimido atingia sua máxima resistência.

O esquema teórico de bloco de tensões, assim como de forças resultantes está ilustrado na Figura 2.20. A partir dessas considerações, os autores propuseram as equações 2.3 e 2.4 para o cálculo da altura da linha neutra plástica e momento fletor resistente, respectivamente. Assim como Kindmann e Bergmann (1993), Assi, Abed e Hunaiti (2002) consideraram em suas formulações apenas seções de perfis de aço I com dupla simetria ( $B_2 = B_1$  e  $t_{f1} = t_{f2}$ ). É importante pontuar que esses autores consideraram a influência do concreto apenas para o cálculo da linha neutra plástica, não apresentando influência direta no momento resistente do elemento estrutural.

$$y_{pn} = \frac{(H - 2t_{f2}) t_w f_{yd}}{B_2 f_{cd} + t_w (2f_{yd} - f_{cd})} + t_{f1} \quad (2.3)$$

$$M_r = \left[ B_2 t_{f2} (H - t_{f1}) - \frac{t_w}{2} (y_{pn} - t_{f1}) (H - 2t_{f2}) + \frac{t_w}{2} (H - 2t_{f2})^2 \right] f_{yd} \quad (2.4)$$

Figura 2.20 – Esquema teórico para cálculo de  $M_r$  conforme Assi, Abed e Hunaiti (2002)



Fonte: Adaptado de Assi, Abed e Hunaiti (2002)

Em busca de apresentar um método analítico para previsão de momento fletor resistente englobando seções transversais de perfis I assimétricas, De Nardin e El Debs (2009) adotaram as seguintes hipóteses simplificadoras: interação completa entre o perfil de aço e o concreto; as seções planas permanecem planas e, portanto, a deformação por cisalhamento através da seção é insignificante; a parcela do concreto tracionado não foi considerada no cálculo da capacidade resistente; a resistência total ao momento plástico pode ser alcançada. Portanto, a resistência ao momento fletor deve ser determinada considerando a distribuição das tensões plásticas do perfil de aço e do concreto em compressão.

O esquema ilustrado na Figura 2.21 representa as características geométricas da seção e a distribuição de tensões consideradas para o cálculo do momento resistente. Assim, para o cálculo da linha neutra plástica foi realizado o equilíbrio de forças na seção, resultando na formulação descrita na Equação 2.5, onde  $A_{ms}$  e  $A_{mi}$  representam respectivamente a área da mesa superior e inferior do perfil.

$$y_{pn} = \frac{-A_{ms}f_{yd} + t_w t_{f1} f_{yd} + b_c t_{f1} f_{cd} + t_w d f_{yd} - t_w t_{f2} f_{yd} + A_{mi} f_{yd}}{2 t_w f_{yd} + b_c f_{cd}} \quad (2.5)$$

A partir do cálculo da linha neutra plástica para prever o momento resistente é necessário calcular os módulos de resistência plástico, propriedades geométricas referentes ao concreto e ao aço. O módulo de resistência plástico do perfil de aço é calculado conforme equação 2.6, com divisão entre as parcelas comprimidas e tracionadas.

$$Z_s = Z_1 + Z_2 + Z_{3c} + Z_{3t} \quad (2.6)$$

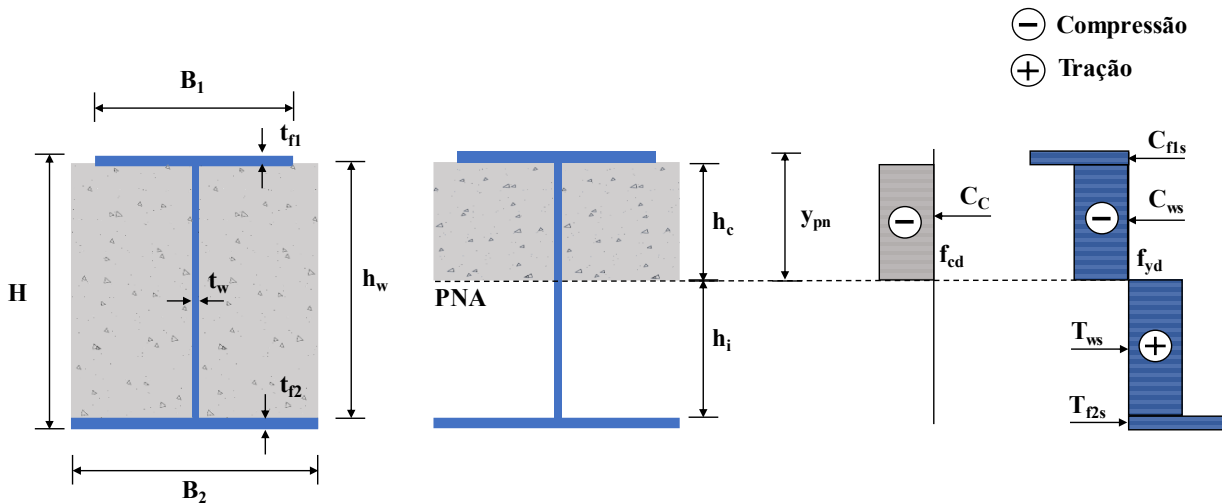
$$Z_1 = A_{ms} (h_c + 0,5t_{f1}); Z_2 = A_{mi}(h_i + 0,5t_{f2}); Z_{3c} = 0,5h_c^2 t_w ; Z_{3t} = 0,5h_i^2 t_w$$

De forma análoga, o módulo de resistência plástico do concreto é calculado conforme equação 2.7, de acordo com sua área de influência. A partir dessas propriedades, o momento fletor resistente é avaliado seguindo formulação apresentada na equação 2.8.

$$Z_c = Z_4 = 0,5 h_c^2 b_c \quad (2.7)$$

$$M_r = Z_c f_{cd} + Z_s f_{yd} \quad (2.8)$$

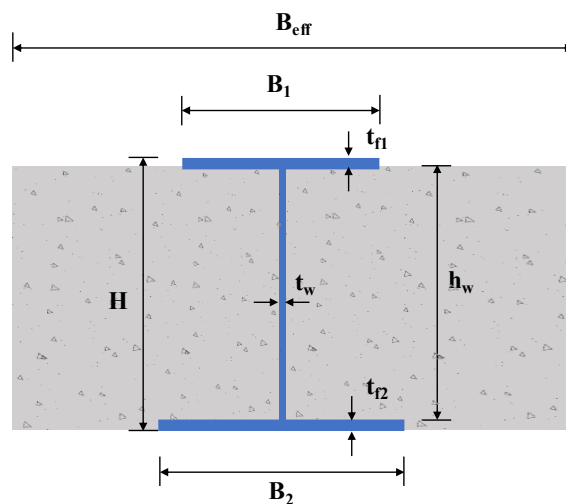
Figura 2.21 – Esquema teórico para cálculo de  $M_r$  conforme De Nardin e El Debs (2009)



Fonte: Adaptado de De Nardin e El Debs (2009)

Diferentemente dos métodos analíticos pontuados até o momento, que consideram interação completa entre o perfil de aço e o concreto, Limazie e Chen (2015) propuseram um método analítico para prever a capacidade resistente de VMPR, componentes de pisos de pequena altura, incorporando a possibilidade de consideração da interação parcial entre o perfil de aço e o concreto. A seção em estudo está apresentada na Figura 2.22.

Figura 2.22 – Seção transversal analisada por Limazie e Chen (2015)



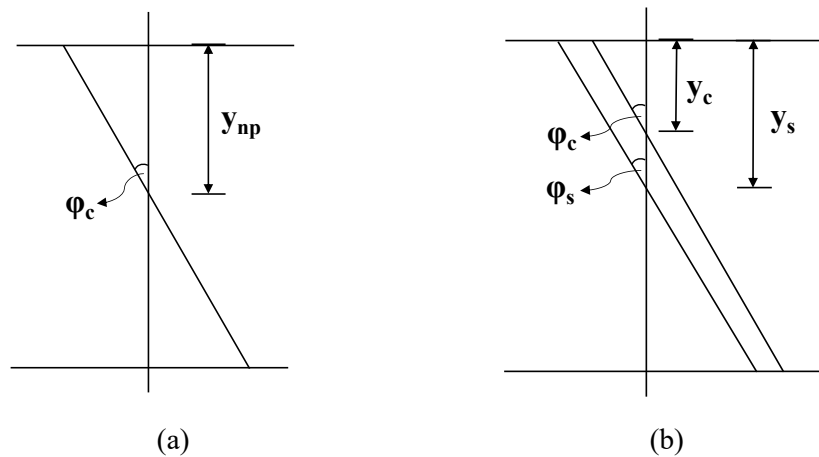
Fonte: Adaptado de Limazie e Chen (2015)

As demais hipóteses simplificadoras adotadas pelos autores foram: o perfil de aço atinge sua tensão de escoamento em toda seção e o concreto sujeito a compressão desenvolve sua resistência à compressão máxima; a parcela de concreto à tração, os efeitos do perfil da forma incorporada e da armadura foram desconsideradas no equacionamento proposto. Para o



cálculo da posição da linha neutra plástica, duas possibilidades foram abordadas, considerando a interação completa e também a interação parcial, conforme ilustrado na Figura 2.23.

**Figura 2.23 – Profundidade de linhas neutra conforme grau de interação entre materiais (a) Interação completa (b) Interação parcial**



Fonte: Adaptado de Limazie e Chen (2015)

Os autores adotam que  $y_c = h_c / \gamma$ , onde  $\gamma$  corresponde ao coeficiente da linha neutra da seção de concreto e é igual a  $0,85 - 0,007(f_{cd} - 28)$ , com  $f_{cd}$  em MPa. No caso da interação parcial, há duas posições de linha neutra, referentes ao eixo neutro da parcela de concreto e outra referente ao perfil de aço. Apesar das diferentes profundidades entre as duas linhas neutras desenvolvidas, as curvaturas devem ser as mesmas, uma vez que não ocorre o fenômeno de *uplift*. A partir do equilíbrio de forças da seção em estudo é possível determinar as profundidades das linhas neutras e conseqüentemente o momento resistente da viga, a partir do momento fletor gerado pelas forças atuantes na seção, representadas na Figura 2.24.

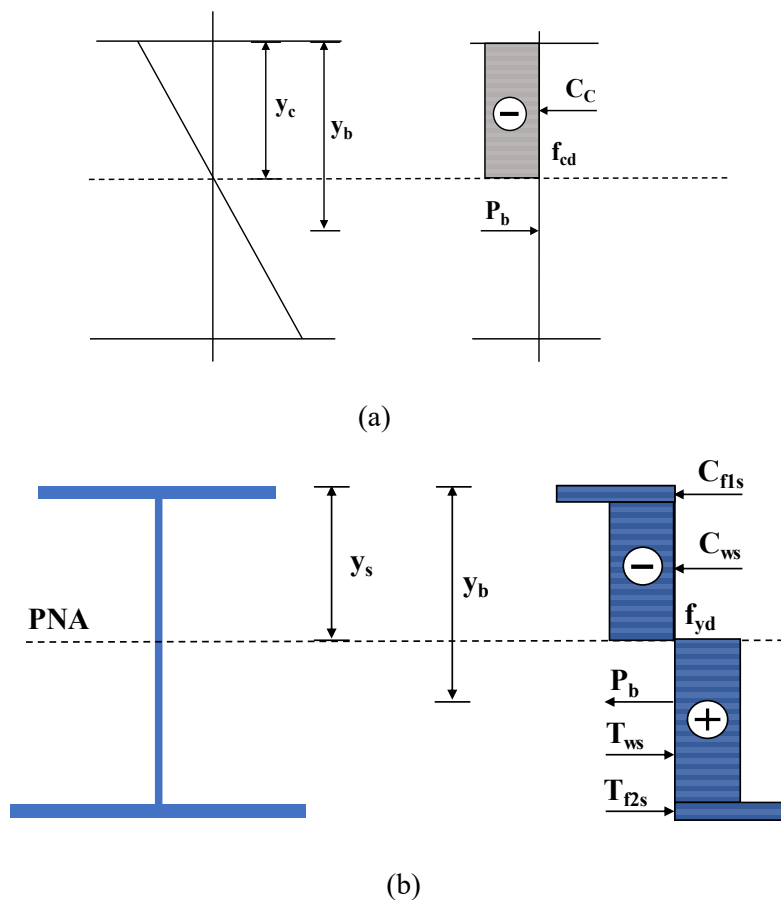
Para isso, três possibilidades de interação são consideradas: interação completa, parcial e nula. Para o caso de interação completa entre o perfil de aço e o concreto,  $y_{pn} = y_c = y_s$ , visto que não há deslizamento relativo entre as superfícies. De acordo com essa hipótese, pode-se prosseguir para o cálculo da força resistente da ligação entre o aço e o concreto ( $P_b$ ), com o objetivo de alcançar este grau de interação, através da equação 2.9.

$$P_b = \frac{B_{eff} \gamma f_{cd} [(H + t_{f1} - t_{f2}) t_w f_{yd} + T_{f2s} - C_{f1s}]}{(B_{eff} \gamma f_{cd}) + (2 t_w f_{yd})} \quad (2.9)$$

No tocante a interação parcial, o momento da seção em estudo pode ser previsto de forma análoga ao realizado para interação completa, porém com a desconsideração da força

$P_b$ , visto que esta age em mesma intensidade, porém direções contrárias na seção do perfil de aço e de concreto. Para interação nula, também desconsidera-se  $P_b$ ,  $y_c$  é igual a 0 e a linha neutra da seção equivale à  $y_s$ , visto que é considerado que o perfil de aço assume toda resistência da seção, portanto a capacidade resistente do elemento misto equivale a capacidade resistente da viga de aço.

**Figura 2.24 – Comportamento dos elementos componentes da seção (a) Comportamento no elemento de concreto (b) Comportamento no perfil de aço**



Fonte: Adaptado de Limazie e Chen (2015)

### 2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do concreto reciclado em elementos com funções estruturais, tanto convencionais como mistos de aço e concreto, tem fomentado importantes desenvolvimentos científicos. De acordo com a maioria das recomendações normativas analisadas, a aplicação do ARC como agregado graúdo para produções de concretos depende essencialmente de sua composição e quantidade de impurezas. Além disso, algumas prescrições normativas limitam o teor de substituição a ser aplicado para produção de concreto estrutural com o intuito de reduzir os efeitos prejudiciais, principalmente no que diz respeito às propriedades mecânicas e

à trabalhabilidade. A heterogeneidade desse tipo de concreto foi observada nos estudos apresentados e aspectos como a influência do teor de substituição do ARC nas propriedades mecânicas do concreto reflete análises ainda conflitantes.

Essas divergências reiteram a necessidade de mais investigações, além de cuidados no processo de produção do agregado, do concreto e na adoção de métodos de dosagem, com consideração adequada das propriedades do material reciclado que se deseja incorporar. Conforme apresentado na presente seção, uma estratégia que vem sendo adotada pela comunidade científica como tentativa de controlar a variabilidade inerente aos agregados reciclados se baseia em sua aplicação limitada a resíduos de concreto e apenas com substituição da parcela de agregado graúdo para produção de concreto estrutural.

No que tange às VMPR, essa configuração apresenta vantagens econômicas e construtivas, porém conforme pontuado, mesmo com os benefícios associados a esse elemento estrutural, como aumento na capacidade resistente proveniente do revestimento de concreto, os estudos relacionados à sua aplicação ainda são recentes e carecem de análises e discussões. As VMPR possuem interessante potencial estrutural ao apresentar comportamento superior aos elementos convencionais no que diz respeito à abalos sísmicos e à resistência ao fogo, além disso reduzem os riscos de instabilidade local nos perfis metálicos que as compõe.

Como pôde ser observado nessa seção, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos em assuntos correlatos à utilização do concreto de ARC e sua aplicação em elementos estruturais. Em geral, os trabalhos apresentados vinculados à viabilidade do concreto reciclado em elementos de viga tiveram enfoque principal na avaliação da capacidade resistente e plano de fissuração desenvolvido, por meio de ensaios de flexão. Os resultados obtidos, em sua maioria, apontam um panorama de fissuração semelhante ao observado em elementos estruturais convencionais e respostas satisfatórias no tocante à capacidade resistente do elemento. Ao focar na aplicação do concreto de ARC na composição de vigas mistas, resultados similares foram apresentados com pouca influência na capacidade resistente dos elementos analisados.

No entanto, por tratar-se de elemento misto de aço e concreto, o estabelecimento da eficiente interface entre o perfil metálico e o volume de concreto fomentaram importantes estudos, ainda não conclusivos a respeito da influência dos ARC na melhora da interação entre os materiais. É interessante pontuar que dentre os documentos científicos avaliados, a configuração de VMPR, com revestimento de concreto de ARC entre as mesas do perfil metálico não foram objeto desses estudos, o que reitera o caráter exploratório do trabalho.

Em relação aos estudos numéricos que compreendem a análise e simulação de elementos mistos, foram avaliados aqueles com enfoque no comportamento à flexão. A partir do exposto, observou-se diversas abordagens para representação dos componentes do modelo, principalmente, da interface entre o aço e o concreto, desde metodologias mais simplificadas, a exemplo da consideração da interação completa, até a aplicação de molas não lineares. Desta forma, pode-se apontar que a representação dos modelos varia de acordo com os requisitos e complexidades do fenômeno.

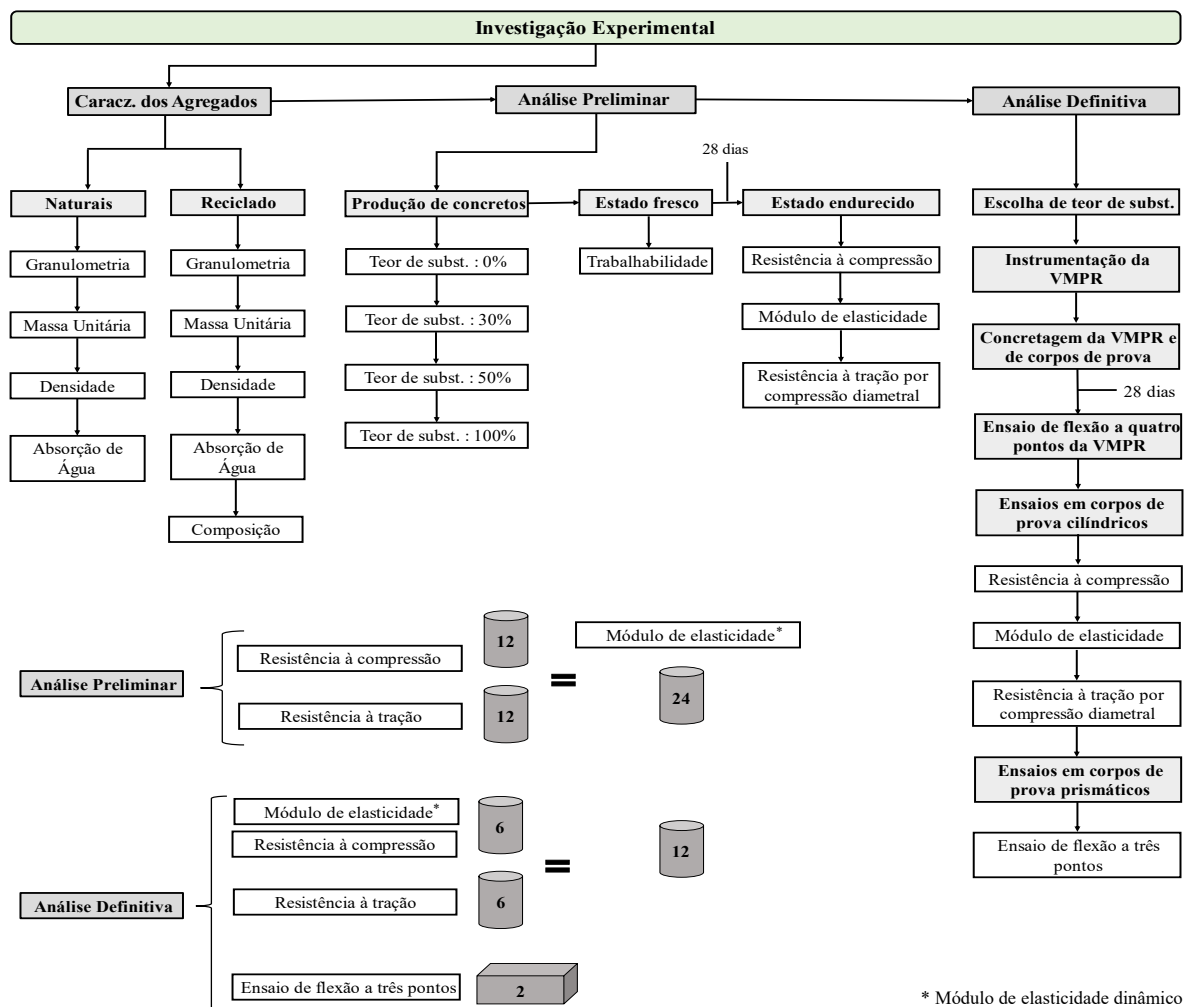
Porém, estudos com foco na composição das VMPR com concreto de ARC ainda configuram um campo científico pouco explorado, onde há espaço para novas análises e contribuições. Ao aliar o concreto reciclado à viga metálica e compor o elemento misto, pretende-se extrair os benefícios dos dois materiais, através da minimização de suas desvantagens. Portanto, esse trabalho apresenta cunho exploratório para verificar a possibilidade de aplicação de ARC nesse tipo de elemento estrutural.

### 3 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

A análise experimental realizada nesse trabalho contempla a caracterização do modelo físico e dos materiais utilizados, seguida de um estudo preliminar dos teores de substituição do agregado graúdo natural por agregado reciclado para produção do concreto de ARC e um ensaio estático de flexão a quatro pontos da VMPR.

Os ensaios preliminares para escolha do teor de substituição a ser aplicado na viga, assim como a caracterização dos agregados foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (EESC – USP) e o ensaio de flexão a quatro pontos foi executado no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da mesma instituição. As etapas do programa experimental estão ilustradas no fluxograma apresentado na Figura 3.1 e serão detalhadas no decorrer da seção.

Figura 3.1 – Fluxograma descritivo da investigação experimental



Fonte: Própria autora

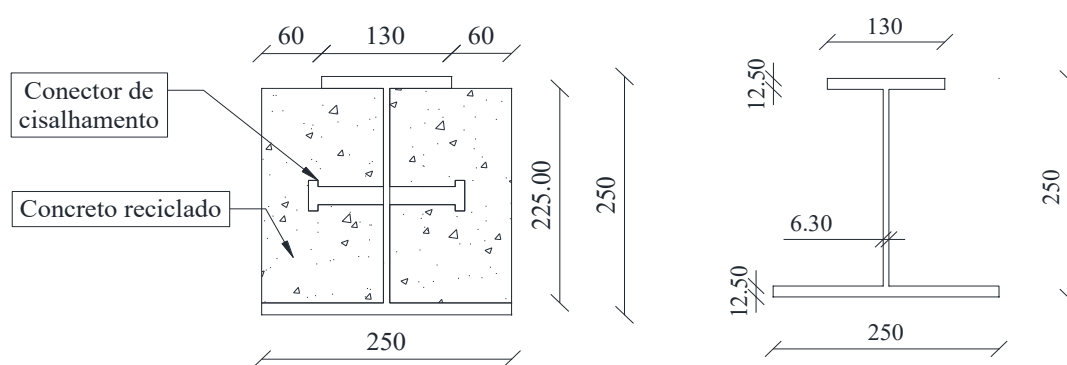
A investigação aqui apresentada possui enfoque principal em duas variáveis: o teor de substituição da parcela gráuda do agregado natural por ARC com análises acerca de sua influência na trabalhabilidade desse concreto e em suas principais propriedades mecânicas e a influência do concreto reciclado na capacidade resistente e plano de fissuração da VMPR, por meio do ensaio de flexão a quatro pontos. Foram analisados teores de substituição de agregado gráudo por ARC iguais a 0%, 30%, 50% e 100% com posterior escolha de um dos teores estudados que melhor atendesse os parâmetros de resistência mecânica e trabalhabilidade para aplicação no elemento estrutural.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MODELO FÍSICO

Foi proposto para a investigação experimental um modelo físico de VMPR com as mesmas características geométricas e propriedades investigadas experimentalmente em De Nardin e El Debs (2009). Esse estudo pode ser apontado como um dos pioneiros, desenvolvidos nacionalmente, no que tange à VMPR, com enfoque principal na influência da posição dos conectores de cisalhamento na capacidade resistente do elemento estrutural.

A VMPR é composta por um perfil I assimétrico soldado, pelo revestimento parcial de concreto e por conectores do tipo pino com cabeça posicionados horizontalmente na alma do perfil de aço, com comprimento total igual a 75 mm e diâmetro do corpo igual a 19 mm. A seção transversal do modelo está ilustrada na Figura 3.2.

**Figura 3.2 – Seção transversal do modelo de VMPR (Dimensões em mm)**

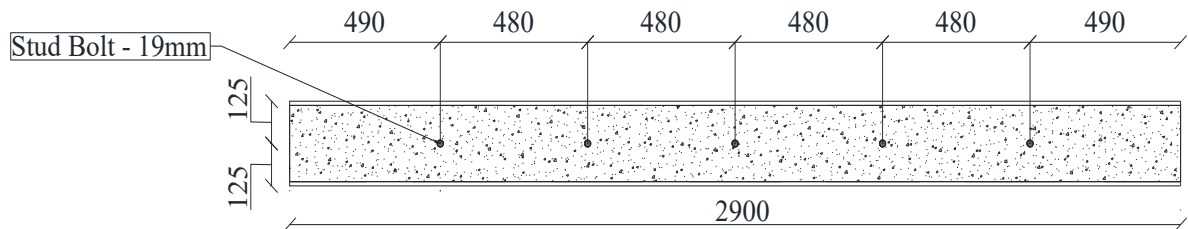


Fonte: Adaptado de De Nardin e El Debs (2009)

O comprimento total da viga é de 2900 mm. O elemento estrutural possui 10 conectores soldados horizontalmente na alma do perfil metálico, localizados 5 em cada lado da alma da viga metálica. A Figura 3.3 apresenta a seção longitudinal do elemento em estudo, assim como o espaçamento entre os conectores de cisalhamento. Portanto, a continuidade da adoção de propriedades semelhantes as trabalhadas tem por objetivo complementar os estudos

desenvolvidos nesta linha de pesquisa no Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP e utilizar os resultados e análises realizadas como referência para direcionar a pesquisa e representar o modelo, com concreto convencional.

**Figura 3.3 – Seção longitudinal do modelo de VMPR (Dimensões em mm)**



Fonte: Adaptado de De Nardin e El Debs (2009)

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Essa seção apresenta a caracterização principal dos insumos constituintes do modelo físico, conforme códigos normativos nacionais vigentes. O concreto foi analisado de acordo com suas principais propriedades mecânicas e trabalhabilidade. A dosagem aplicada nesse estudo para obtenção dos concretos convencional e reciclado foi fundamentada nos estudos de Gerin (2020), com o objetivo de obter um concreto com alta trabalhabilidade e classe C30/40. As amostras utilizadas nos ensaios foram coletadas e reduzidas conforme ABNT NBR 16915 (2021) e os códigos normativos que nortearam os procedimentos de ensaios aplicados para caracterização dos materiais estão apresentados no Quadro 3.1.

**Quadro 3.1 – Descrição da caracterização dos materiais e códigos normativos utilizados como embasamento**

Material	Propriedades	Código normativo
Agregado graúdo natural	Composição Granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003
	Massa Unitária	ABNT NBR 16972:2021
	Densidade	ABNT NBR 16917:2021
	Absorção de água	
Agregado miúdo natural	Composição Granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003
	Massa Unitária	ABNT NBR 16972:2021
	Densidade	ABNT NBR 16916:2021
	Absorção de água	
Agregado graúdo reciclado	Composição Granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003
	Massa Unitária	ABNT NBR 16972:2021
	Densidade	ABNT NBR 16917:2021
	Absorção de água	
	Composição	ABNT NBR 15116:2021

Continua

Material		Propriedades	Código normativo
Concreto	Estado Fresco	Trabalhabilidade	ABNT NBR 16889:2020
	CP cilíndrico	Resistência à compressão	ABNT NBR 5739:2018
		Módulo de elasticidade	ABNT NBR 8522-2:2021
		Resistência à tração por compressão diametral	ABNT NBR 7222:2011
	CP prismático	Energia de fratura	RILEM 50-FCM :1985
Perfil metálico		Resistência à tração	ABNT NBR ISSO 6892-1:2018

Fonte: Própria autora

### 3.2.1 Agregado natural graúdo

Os agregados graúdos selecionados, provenientes da região de São Carlos-SP, foram adquiridos como pedra brita de origem basáltica popularmente conhecidos como brita 0. A composição granulométrica desses agregados foi determinada a partir de duas amostras de 2 kg, conforme procedimentos normativos. Foram utilizados um conjunto composto por 5 peneiras com aberturas iguais a 2,36 mm, 4,75 mm, 6,3 mm, 9,5 mm e 12,5 mm, respectivamente. O conjunto foi agitado mecanicamente e posteriormente a massa de material retido em cada peneira foi quantificada. A Figura 3.4 representa as parcelas separadas em cada abertura de peneira de uma das amostras ensaiadas.

Figura 3.4 – Separação granulométrica do agregado graúdo natural



Fonte: Própria autora

As porcentagens retidas e acumuladas durante o ensaio estão dispostas na Tabela 3.1. A partir desses resultados, a curva granulométrica foi gerada (Figura 3.5) e comparada aos limites de distribuição granulométrica de acordo com ABNT NBR 7211 (2019). Assim,



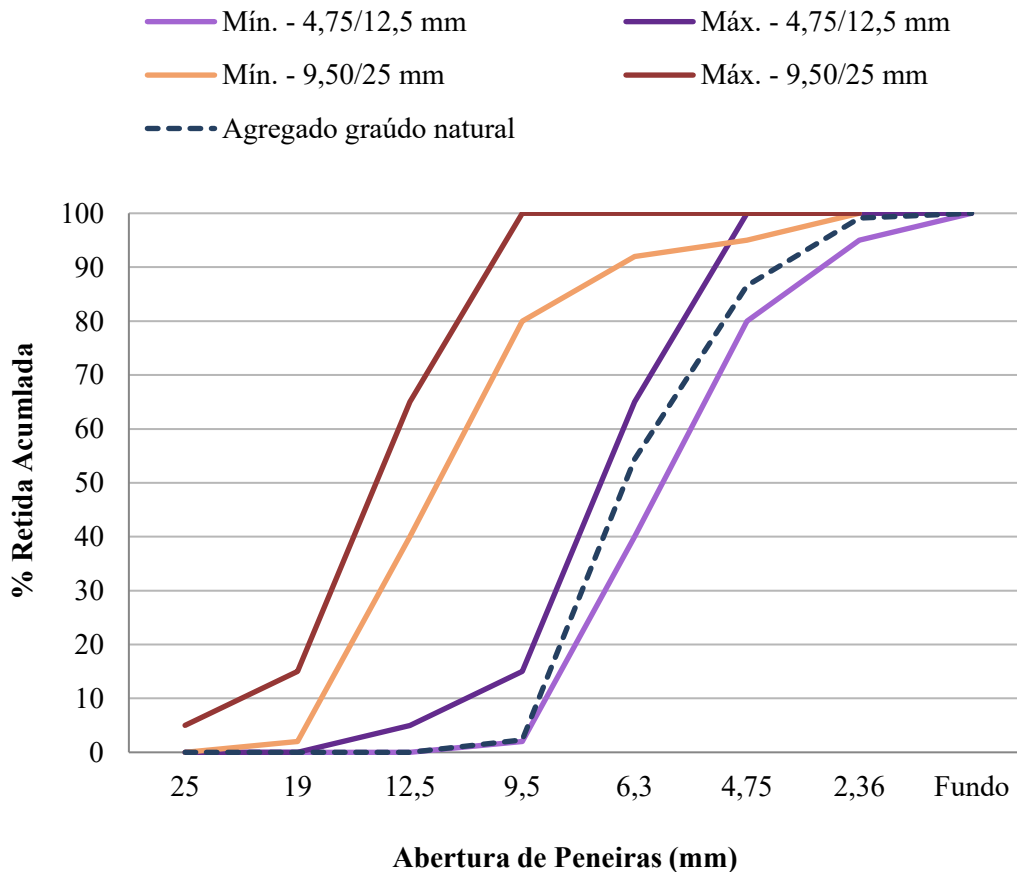
observava-se que a curva para o agregado graúdo natural se encontra entre os limites inferior e superior para agregados com dimensões máximas características entre 4,75 mm e 12,5 mm.

**Tabela 3.1 – Dados referentes à composição granulométrica do agregado graúdo natural**

Abertura de peneiras (mm)	% Média Retida	% Média Acumulada
12,5	0	0
9,5	2	2
6,3	52	54
4,75	32	87
2,36	13	99
Fundo	1	100

Fonte: Própria autora

**Figura 3.5 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural e limites normativos**



Fonte: Própria autora

O módulo de finura e dimensão máxima do agregado foram também definidos a partir do ensaio granulométrico, iguais a 2,4 e 9,5 respectivamente. Em relação às outras

propriedades , a partir das recomendações normativas foram calculados os valores de massa específica, massa unitária e absorção de água dispostos na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Resultado dos ensaios de caracterização do agregado graúdo natural**

<b>Agregado graúdo natural</b>	
Massa unitária – Estado Solto	1540 kg/m <sup>3</sup>
Massa unitária – Estado Compactado	1600 kg/m <sup>3</sup>
Densidade – Condição Seca	2,83 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	2,02 %

Fonte: Própria autora

### 3.2.2 Agregado natural miúdo

Os agregados miúdos utilizados foram provenientes da região de São Carlos-SP e consistem em areia natural. A composição granulométrica desses agregados foi determinada a partir de duas amostras de 1 kg. Foram utilizados um conjunto composto por 6 peneiras com aberturas iguais a 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 µm, 300 µm e 150 µm, respectivamente do topo à base. O conjunto foi agitado mecanicamente e posteriormente a massa de material retido em cada peneira foi medida. A Figura 3.6 representa as parcelas separadas em cada abertura de peneira de uma das amostras ensaiadas.

**Figura 3.6 – Separação granulométrica do agregado miúdo natural**



Fonte: Própria autora

De forma análoga ao apresentado para o agregado graúdo natural, as porcentagens retidas e acumuladas durante o ensaio estão dispostas na Tabela 3.3. A curva granulométrica para este agregado está ilustrada na Figura 3.7, assim como as curvas normativas contendo os limites superiores e inferiores que delimitam as zonas utilizáveis e ótimas. A partir desses,

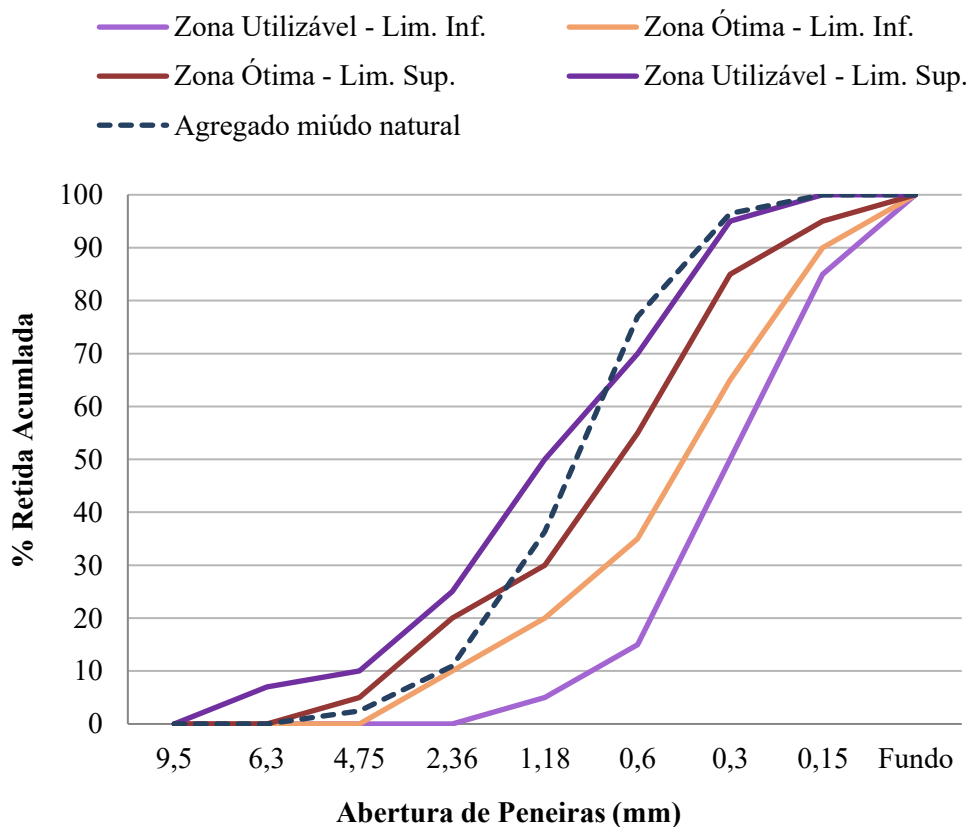
observa-se que a composição granulométrica da areia natural utilizada encontra-se entre o limite inferior (Lim. Inf.) da zona ótima e limite superior (Lim. Sup.) da zona utilizável.

**Tabela 3.3 – Dados referentes à composição granulométrica do agregado miúdo natural**

Abertura de Peneiras (mm)	% Média Retida	% Média Acumulada
4,75	0	0
2,36	2	2
1,18	9	11
600 um	25	36
300 um	41	77
150 um	19	96
Fundo	4	100

Fonte: Própria autora

**Figura 3.7 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural e limites normativos**



Fonte: Própria autora

O módulo de finura e dimensão máxima do agregado foram definidos a partir do ensaio granulométrico, iguais a 2,23 e 2,36 respectivamente. Em relação às outras

propriedades, a partir das recomendações normativas foram calculados os valores de massa específica, massa unitária e absorção de água dispostos na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4 – Resultado dos ensaios de caracterização do agregado miúdo natural**

<b>Agregado miúdo natural</b>		
Massa unitária – Estado Solto	1585	kg/m <sup>3</sup>
Massa unitária – Estado Compactado	1708	kg/m <sup>3</sup>
Densidade – Condição Seca	2,53	g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	0,20	%

Fonte: Própria autora

### 3.2.3 Agregado graúdo reciclado

Os agregados reciclados em uso durante o desenvolvimento desta pesquisa foram obtidos por meio de doação pela grupo Itaquareia, com matriz localizada na cidade de Itaquaquecetuba, no estado de São Paulo. Este grupo tem grande enfoque em preservação ambiental e ao receber RCD realizam uma análise preliminar para direcioná-los ao aterro ou para produção de agregados reciclados. Foram doados em torno de uma tonelada de agregado reciclado em granulometria semelhante à brita 0. Uma amostra do material está ilustrado na Figura 3.8.

**Figura 3.8 – Amostra de agregado reciclado**



Fonte: Própria autora

Para caracterizar o agregado reciclado de acordo com sua composição, foi realizada uma análise visual de uma amostra de aproximadamente 8 kg, conforme a ABNT NBR 15116 (2021) preconiza. Cada agregado da amostra foi inspecionado manualmente e direcionado em um de quatro grupos, sendo eles apresentados no Quadro 3.2. De acordo com a porcentagem

de composição de cada grupo em relação à massa total analisada, seguindo os limites presentes no mesmo código normativo, principalmente em função da presença de G3 e G4 nas amostras os agregados reciclados podem ser classificados como ARCO, ARCI e ARM.

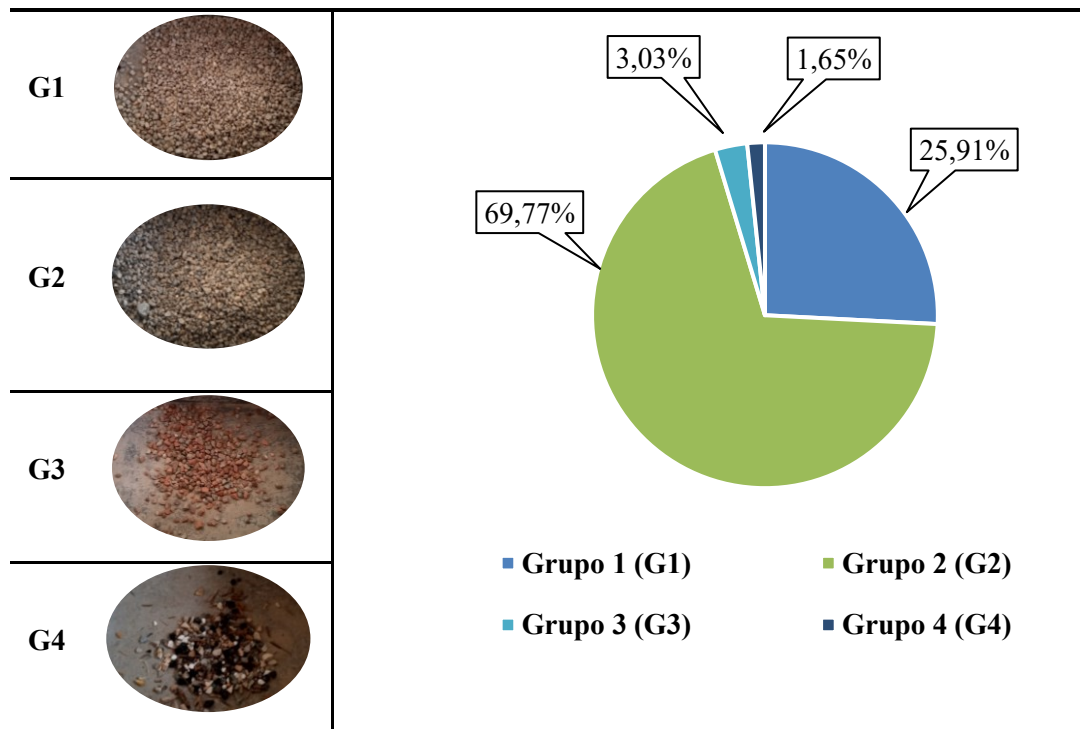
**Quadro 3.2 – Classificação de grupos de fragmentos de agregados reciclados**

<b>Grupo</b>	<b>Definição</b>
Grupo 1 (G1)	Apresentam pasta de cimento endurecida em mais de 50 % do seu volume.
Grupo 2 (G2)	Constituídos por rocha em mais de 50 % do seu volume.
Grupo 3 (G3)	Fragmentos de cerâmica vermelha, com superfície não esmaltada, em mais de 50 % do seu volume.
Grupo 4 (G4)	Fragmentos de materiais indesejáveis, de natureza orgânica, como madeiras, plásticos, betumes e materiais carbonizados, e de natureza inorgânica, como metais, vidros, cerâmica branca esmaltada e gesso.

Fonte: ABNT NBR 15116 (2021)

A Figura 3.9 ilustra de forma qualitativa e quantitativa a classificação em grupos da amostra em estudo. Portanto, a partir das diretrizes da ABNT NBR 15116 (2021), a amostra foi classificada como ARCI.

**Figura 3.9 – Grupos analisados a partir de amostra de agregado reciclado**

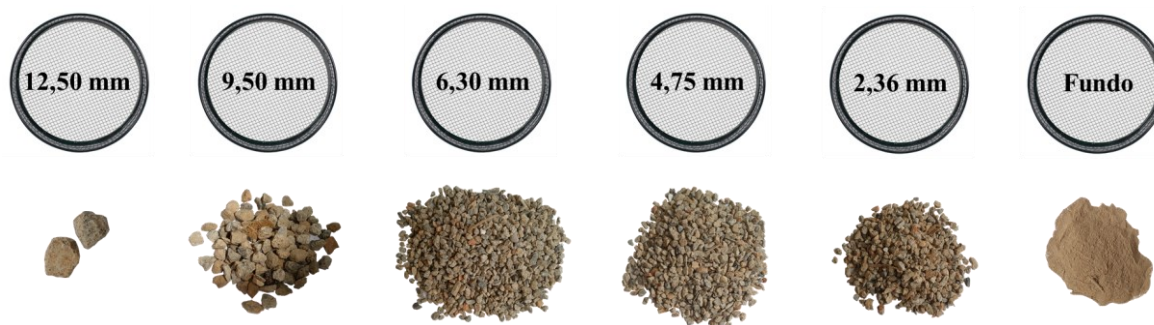


Fonte: Própria autora

A norma brasileira pontua um limite recomendado de 1% para o G4 presente na amostra analisada, valor concordante com outras normas internacionais, conforme apresentado no Quadro 2.1. Como pode-se observar na Figura 3.9, o agregado em estudo apresenta um valor superior a 1% em sua composição total, o que fortalece a importância de estudos a respeito de aplicação de diferentes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado a fim de analisar qual influência dessa heterogeneidade da composição nas propriedades mecânicas do concreto.

De forma análoga ao agregado graúdo natural, a composição granulométrica dos agregados reciclados foi determinada a partir de duas amostras de 2 kg. Foram também utilizados um conjunto composto por 5 peneiras com aberturas iguais a 2,36 mm, 4,75 mm, 6,3 mm, 9,5 mm e 12,5 mm, respectivamente. O conjunto foi agitado mecanicamente e posteriormente a massa de material retido em cada peneira foi medida. A Figura 3.10 representa as parcelas separadas em cada abertura de peneira de uma das amostras ensaiadas.

**Figura 3.10 – Separação granulométrica do agregado graúdo reciclado**



Fonte: Própria autora

As porcentagens retidas e acumuladas durante o ensaio de composição granulométrica estão dispostas na Tabela 3.5.

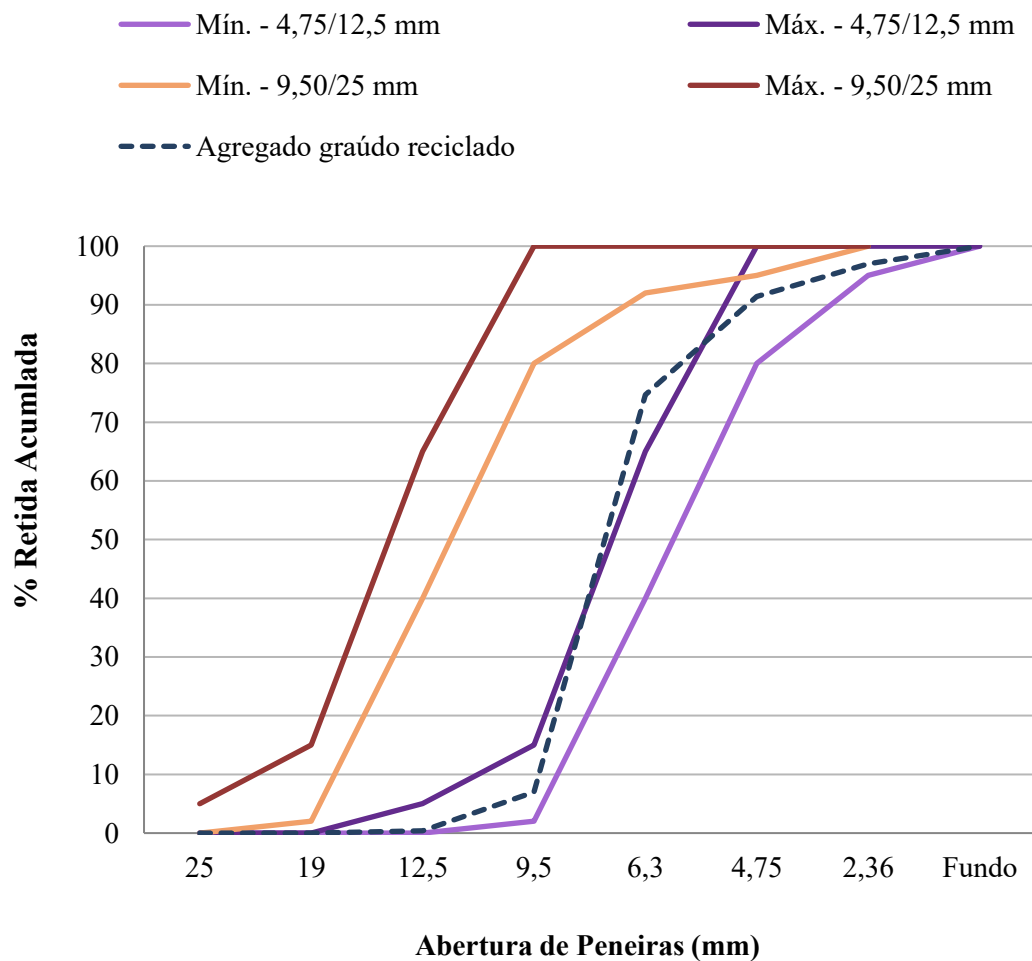
**Tabela 3.5 – Dados referentes à composição granulométrica do agregado graúdo reciclado**

Abertura de peneiras (mm)	% Média Retida	% Média Acumulada
12,5	0	0
9,5	7	7
6,3	67	75
4,75	17	91
2,36	6	97
Fundo	3	100

Fonte: Própria autora

A partir desses resultados, a curva granulométrica foi gerada (Figura 3.11) e comparada aos limites de distribuição granulométrica de acordo com ABNT NBR 7211 (2019). Assim, observava-se que a curva para o agregado graúdo reciclado se encontra entre os limites inferior para agregados com dimensões máximas características entre 4,75 mm e 12,5 mm e limite inferior para agregados com dimensões máximas características entre 9,5 mm e 25 mm. O módulo de finura e dimensão máxima do agregado graúdo reciclado foram definidos iguais a 2,70 e 12,50 respectivamente.

**Figura 3.11 – Curva granulométrica do agregado graúdo reciclado e limites normativos**



Fonte: Própria autora

Em relação às outras propriedades caracterizadas, a partir das recomendações normativas foram calculados os valores de massa específica, massa unitária e absorção de água apresentados na Tabela 3.6.

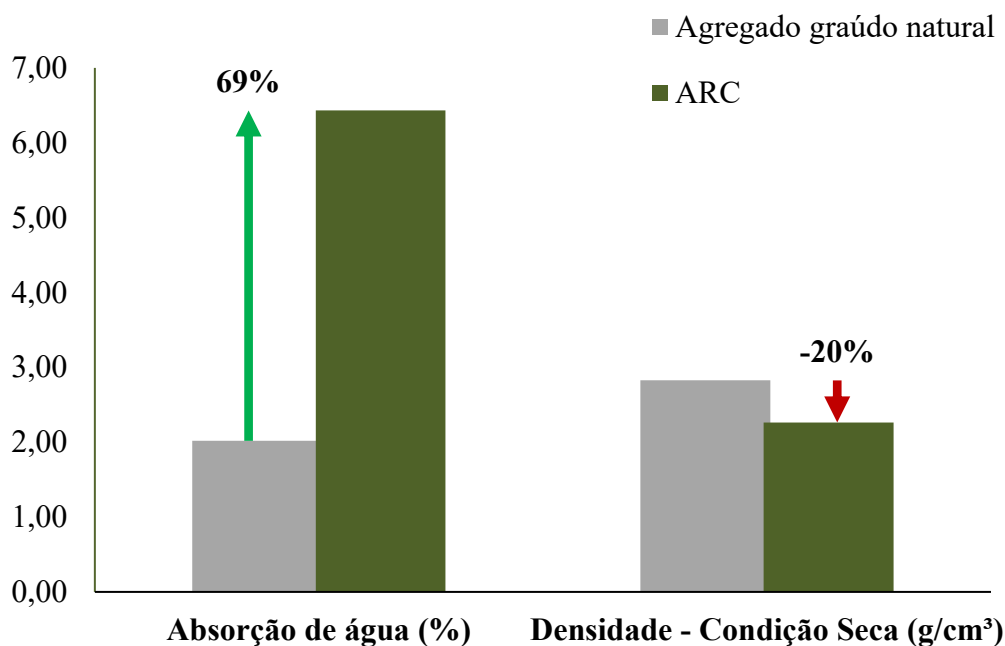
Tabela 3.6 – Resultado dos ensaios de caracterização do agregado graúdo reciclado

Agregado graúdo reciclado	
Massa unitária – Estado Solto	1269 kg/m <sup>3</sup>
Massa unitária – Estado Compactado	1326 kg/m <sup>3</sup>
Densidade – Condição Seca	2,26 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	6,43 %

Fonte: Própria autora

A Figura 3.12 representa uma comparação entre a absorção de água do agregado graúdo natural e reciclado, assim como as densidades calculadas. Observa-se que o ARC apresenta aproximadamente uma absorção 69% maior que o agregado natural, reiterando seu aspecto poroso, assim como densidade em torno de 20% menor em comparação ao agregado graúdo natural. Portanto, as propriedades aqui analisadas apresentam concordância com as tendências presentes na Revisão Bibliográfica.

Figura 3.12 – Comparação entre propriedades do agregado graúdo natural e reciclado



Fonte: Própria autora

### 3.2.4 Cimento

O cimento utilizado para produção dos concretos foi o CP-V ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial). A caracterização da massa específica desse material não foi realizada no escopo deste trabalho, sendo considerado o valor de 3,16 g/cm<sup>3</sup> determinada pelo grupo de pesquisa GESEC (Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em

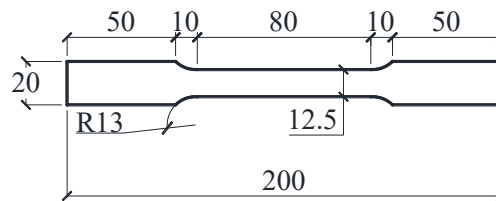


Construção Civil e Urbana) no Laboratório de Materiais e Componentes da UFSCar, para o mesmo tipo de cimento, conforme apresentado em Gerin (2020).

### 3.2.5 Perfil de aço

A viga metálica utilizada é constituída por chapas soldadas de aço do tipo ASTM A-36. A caracterização do aço foi realizada a partir das recomendações normativas nacionais, por meio da extração de três corpos de prova do elemento metálico: da mesa inferior, superior e da alma da viga soldada. Os corpos de prova possuíam espessuras de 6,3 mm e 6,0 mm para representação da alma e das mesas da viga, respectivamente. As demais características geométricas estão apresentadas na Figura 3.13.

**Figura 3.13 – Dimensões dos corpos de prova metálicos (mm)**



Fonte: Própria autora

Os três corpos de prova foram ensaiados à tração no Núcleo de Ensaios de Materiais e Análise de Falhas da EESC – USP. Na Figura 3.14 são apresentadas imagens do ensaio de caracterização do aço.

**Figura 3.14 – Ensaio de caracterização do aço e ruptura dos corpos de prova**



Fonte: Própria autora

A Tabela 3.7 apresenta as tensões de escoamento e ruptura média resultado dos três corpos de prova ensaiados.

**Tabela 3.7 – Propriedades mecânicas do aço**

<b>Propriedades: ASTM A-36</b>	
Limite de escoamento	318,5 MPa
Limite de ruptura	444,3 MPa

Fonte: Própria autora

### 3.2.6 Concreto

Um dos objetivos desse trabalho é a elaboração de um concreto reciclado estrutural. Para isso, a norma ANBT NBR 8800 (2008) preconiza que sua resistência à compressão característica deve estar situada entre os limites de 20 MPa e 50 MPa. Como o método de dosagem não é objeto de estudo dessa pesquisa adotou-se como referência o traço utilizado em Gerin (2020), apresentado na Tabela 3.8, que resultou em concretos estruturais convencionais e reciclados com elevada trabalhabilidade. As resistências à compressão características aos 28 dias alcançadas pela autora foram de 32,68 MPa e 37,54 MPa, respectivamente para o concreto de referência (CREF-0) e para o produzido com agregados graúdos reciclados com 100% de substituição do agregado graúdo natural por ARC (CARC-100). A nomenclatura dos traços aqui adotada seguiu a mesma proposta por Gerin (2020), com o tipo de concreto seguido do teor de substituição de ARC aplicado no traço.

**Tabela 3.8 – Traços em massa propostos por Gerin (2020)**

Nomenclatura	<b>CREF-0</b>	<b>CARC-30</b>	<b>CARC-50</b>	<b>CARC-100</b>
Teor de substituição	0%	30%	50%	100%
Cimento	1	1	1	1
Agregado miúdo (areia)	2,42	2,42	2,42	2,42
Agregado graúdo natural	2,58	1,81	1,29	-
Agregado graúdo reciclado	-	0,66	1,10	2,19
Fator água/cimento	0,68	0,68	0,68	0,68
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	351,7	351,7	351,7	351,7

Fonte: Gerin (2020)

Partindo das análises estabelecidas para dosagem dos concretos, o traço apresentado em Gerin (2020) foi ajustado por meio da metodologia aplicada em Leite (2001) e Kuster

Junior (2018) para correção das proporções mediante densidade dos materiais componentes, visto que o ARC apresenta menor densidade quando comparado ao agregado graúdo natural o que implicaria em uma variação significativa de volume, caso fosse utilizada uma substituição direta de mesma massa entre esses agregados. Assim, a equação 3.1 foi adotada para ajuste e correção da massa de ARC, onde  $M_{ARC}$  e  $M_{NAT}$  representam respectivamente a massa do ARC e do agregado graúdo natural, assim como  $d_{ARC}$  e  $d_{NAT}$  representam suas respectivas densidades.

$$M_{ARC} = M_{NAT} \frac{d_{ARC}}{d_{NAT}} \quad 3.1$$

Diante dos resultados da caracterização dos agregados miúdos e graúdos apresentados durante a seção, os traços corrigidos para produção dos concretos foram calculados e estão expostos na Tabela 3.9. Optou-se por permanecer constante a relação a/c para avaliação dos traços com enfoque principal nos teores de substituição, sem o objetivo de manter estável o grau de trabalhabilidade em todas as misturas.

**Tabela 3.9 – Traços em massa adotados**

Nomenclatura	<b>CREF-0</b>	<b>CARC-30</b>	<b>CARC-50</b>	<b>CARC-100</b>
Teor de substituição	0%	30%	50%	100%
Cimento	1	1	1	1
Agregado miúdo (areia)	2,42	2,42	2,42	2,42
Agregado graúdo natural	2,58	1,81	1,29	-
Agregado graúdo reciclado	-	0,62	1,03	2,06
Fator água/cimento	0,68	0,68	0,68	0,68
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	349,1	349,1	349,1	349,1

Fonte: Própria autora

A partir do ajuste do traço, uma análise preliminar foi realizada com intuito de avaliar a influência dos teores de substituição (0%, 30%, 50%, 100%) na trabalhabilidade do concreto no estado fresco e em algumas propriedades mecânicas no estado endurecido para posterior escolha do traço a ser aplicado no elemento estrutural. O método de mistura utilizado foi o TSMA, sem pré-molhagem do ARC. Nessa etapa foram concretados um total de 24 corpos de prova (10x20 cm<sup>2</sup>), 6 de cada traço, em uma betoneira com capacidade de 150 l. O adensamento aplicado foi do tipo manual e após cura inicial de 24 horas a partir da moldagem

dos corpos de prova, estes foram deformados e alocados em câmara úmida por 28 dias. A Figura 3.15 ilustra alguns dos corpos de prova moldados.

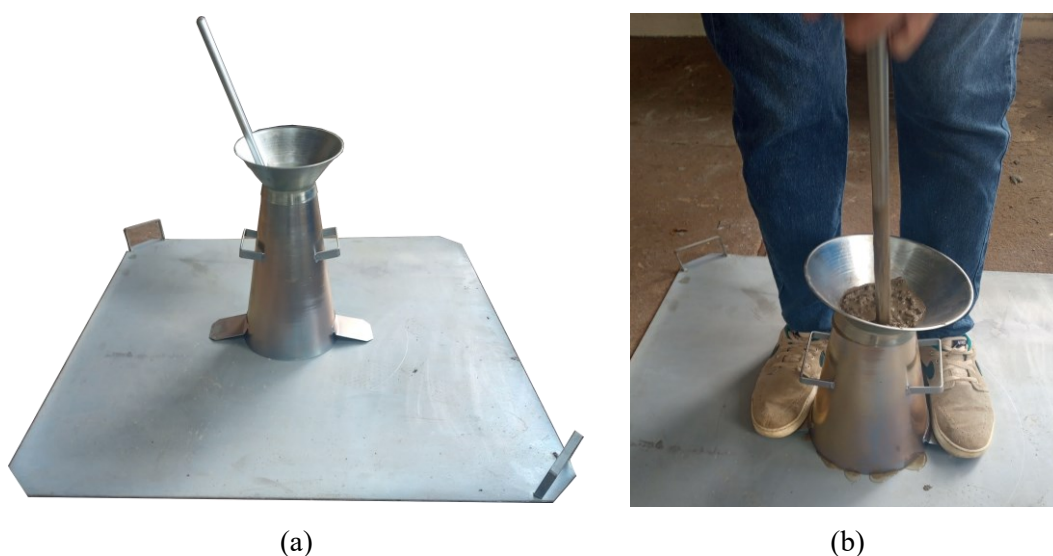
**Figura 3.15 – Corpos de prova moldados na etapa de análise preliminar**



Fonte: Própria autora

No estado fresco, os quatro traços foram avaliados quanto à trabalhabilidade por meio do ensaio de tronco de cone. Os procedimentos para realização do ensaio seguiram as orientações presentes em norma nacional, conforme Quadro 3.1. Três medições foram realizadas para cada traço estudado e a média entre os valores foi considerado como representativo do abatimento do concreto. A Figura 3.16 ilustra os aparatos utilizados e uma das etapas do procedimento dos ensaios sendo executada.

**Figura 3.16 – (a) Aparatos utilizados para ensaio (b) Exemplo do procedimento de ensaio de abatimento de tronco de cone**

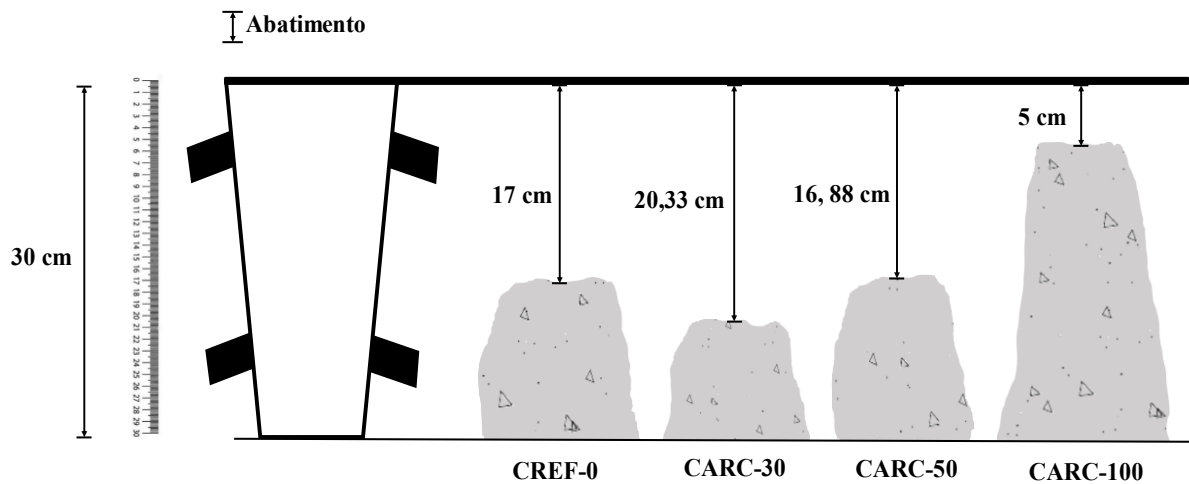


Fonte: Própria autora

Os resultados obtidos a partir do ensaio de tronco de cone estão apresentados na Figura 3.17. O traço mais trabalhável foi o CARC-30, diferentemente do observado em Gerin

(2020) onde houve diminuição gradual do valor de abatimento com aumento dos teores de substituição, sendo o com agregados naturais o mais trabalhável. Acredita-se que essas variações de tendências devem-se à origem e composição dos agregados manipulados, visto que a alta quantidade de materiais finos pode ter facilitado a trabalhabilidade de forma mais significativa que os prejuízos provenientes da alta absorção inerente ao ARC. Essas análises requerem mais estudos e ensaios, que não estão presentes no escopo deste trabalho, para melhor justificar o fenômeno. Como esperado, o traço menos trabalhável foi o CARC-100, visto que a substituição total dos agregados graúdos aliada ao método de mistura sem pré-molhagem levaram à produção de um concreto mais poroso, devido à alta absorção de água referente ao ARC.

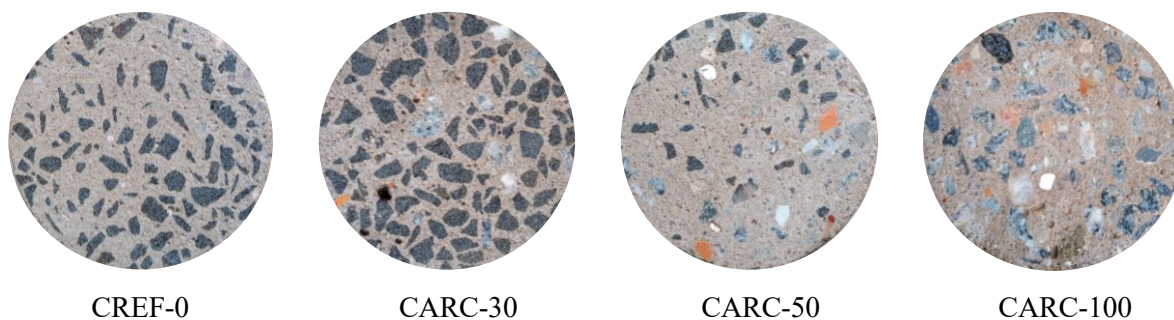
**Figura 3.17 – Resultados de abatimento dos traços estudados durante análise preliminar**



Fonte: Própria autora

No estado endurecido foram avaliadas as resistências à compressão, à tração e módulo de elasticidade dinâmico dos corpos de prova cilíndricos estudados. A resistência à compressão foi analisada por meio de ensaios de compressão axial e a resistência à tração foi obtida de forma indireta, através do ensaio de tração por compressão diametral. Ambos os ensaios foram realizados na máquina hidráulica ELE Autotest 2000.

A Figura 3.18 exibe uma vista superior dos corpos de prova retificados que foram ensaiados para obtenção de suas resistências à compressão. Foram rompidos três corpos de prova de cada traço. Inicialmente, o critério de Chauvenet foi aplicado ao conjunto de dados, para avaliar se algum dos resultados deveria ser descartado por estar fora da distribuição estatística esperada, porém todos os valores atenderam ao critério aplicado. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.10 e refletem uma variabilidade aceitável, inferior a 10%, de acordo com os parâmetros estatísticos utilizados.

**Figura 3.18 – Corpos de prova retificados que foram ensaiados para obtenção de resistência à compressão**

Fonte: Própria autora

Como pode-se perceber na Tabela 3.10 os resultados de resistência à compressão foram próximos entre si, alcançando resistência estrutural em todos os traços estudados, refletindo a pouca influência do teor de substituição nesta propriedade mecânica. Como esperado, o traço sem ARC (CREF-0) apresentou a maior resistência à compressão, seguido do CARC-50, CARC-30 e CARC-100.

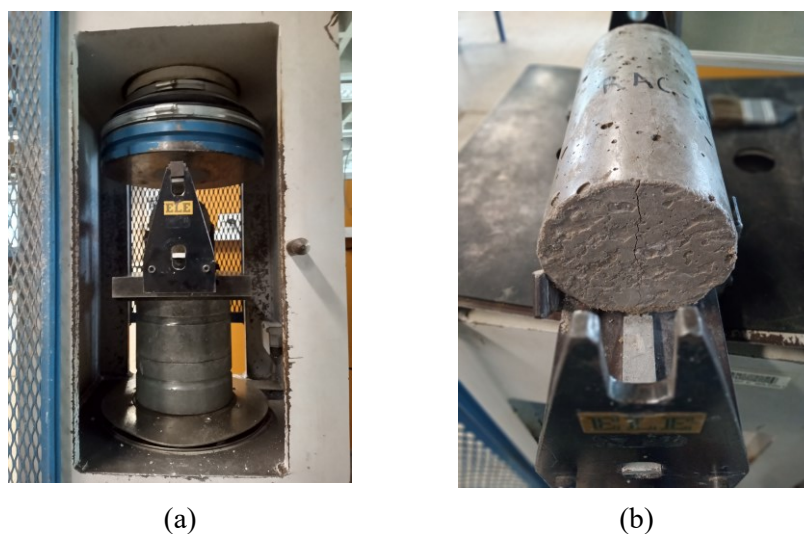
**Tabela 3.10 – Resultado dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias**

Traço		Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
CREF-0	CP1	34,15	35,62	2,38	6,7%
	CP2	38,37			
	CP3	34,34			
CARC – 30	CP1	32,32	33,39	1,40	4,2%
	CP2	32,87			
	CP3	34,97			
CARC – 50	CP1	32,35	34,04	1,82	5,3%
	CP2	33,8			
	CP3	35,96			
CARC – 100	CP1	34,04	32,13	1,66	5,2%
	CP2	31,01			
	CP3	31,33			

Fonte: Própria autora

No tocante à resistência à tração, essa foi obtida de forma indireta, por meio do ensaio de tração por compressão diametral e foram rompidos três corpos de prova de cada traço. A Figura 3.19 ilustra o ensaio e a fissura característica desse modo de ruptura. A Tabela 3.11 apresenta os resultados obtidos.

**Figura 3.19 – (a) Ensaio de tração por compressão diametral (b) Fissura no corpo de prova após ensaio**



Fonte: Própria autora

**Tabela 3.11 – Resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias**

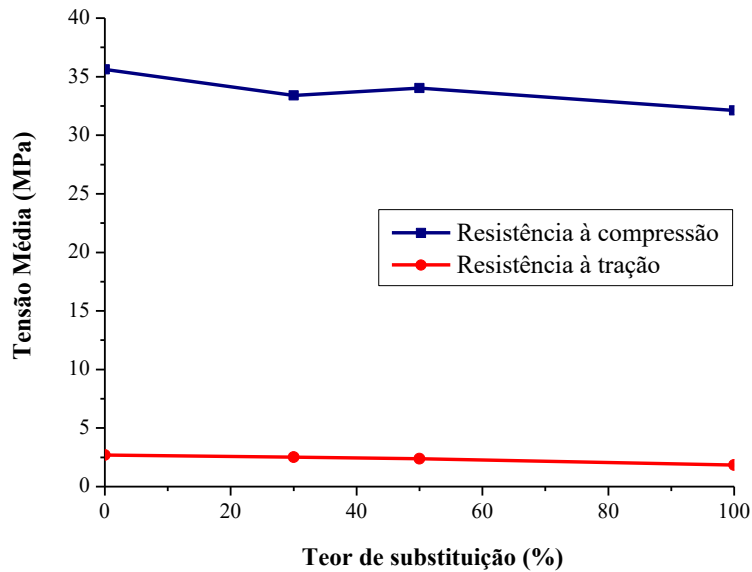
Traço		Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
CREF-0	CP1	2,87	2,70	0,47	19,2%
	CP2	2,53			
	CP3	1,94*			
CARC – 30	CP1	2,32	2,52	0,41	16,1%
	CP2	2,99			
	CP3	2,25			
CARC – 50	CP1	2,06	2,39	0,38	15,9%
	CP2	2,30			
	CP3	2,80			
CARC – 100	CP1	1,62	1,85	0,25	13,4%
	CP2	1,81			
	CP3	2,12			

\*Valor descartado em cálculo de média por ter ocorrido mal posicionamento do CP durante ensaio

Fonte: Própria autora

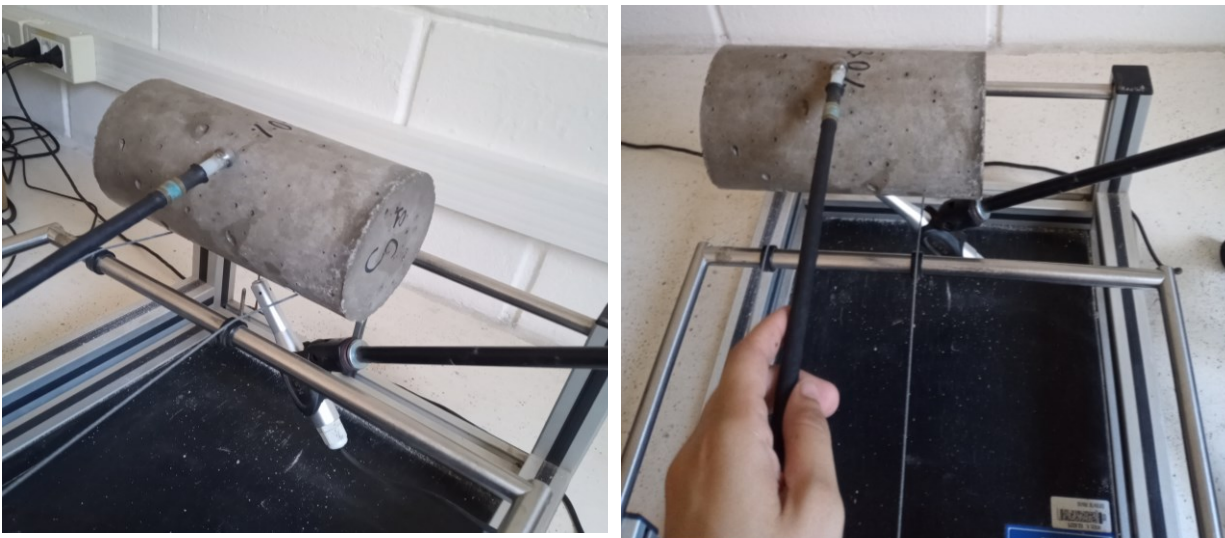
Assim como para a resistência à compressão, o critério de Chauvenet foi aplicado para os resultados à tração, onde nenhuma amostra foi descartada. Conforme Tabela 3.11, as resistências à tração dos corpos de prova apresentaram uma redução amena de acordo com o aumento do teor de substituição do agregado graúdo natural por ARC. A Figura 3.20 apresenta graficamente as variações de tensões de compressão e tração obtidas para cada tipo de concreto, reiterando valores próximos entre si principalmente entre os teores de substituição de 30% e 50%. O traço menos resistente e também menos trabalhável foi o com substituição total de ARC.



**Figura 3.20 – Representação gráfica dos resultados de resistência à compressão e à tração aos 28 dias**

Fonte: Própria autora

O módulo de elasticidade dinâmico foi analisado aos 28 dias por meio do equipamento Sonelastic, desenvolvido pela ATCP – Engenharia Física, que utiliza a frequência natural de vibração para cálculo desta propriedade do concreto. A Figura 3.21 ilustra o equipamento utilizado para realização do ensaio não destrutivo.

**Figura 3.21 – Ensaio não destrutivo para determinação de módulo de elasticidade dinâmico**

Fonte: Própria autora

Os resultados dos módulos de elasticidade dinâmico, assim como a dispersão obtida a partir dos ensaios estão apresentados na Tabela 3.12. O critério de Chauvenet foi aplicado aos valores obtidos experimentalmente e nenhum dos valores foi descartado.



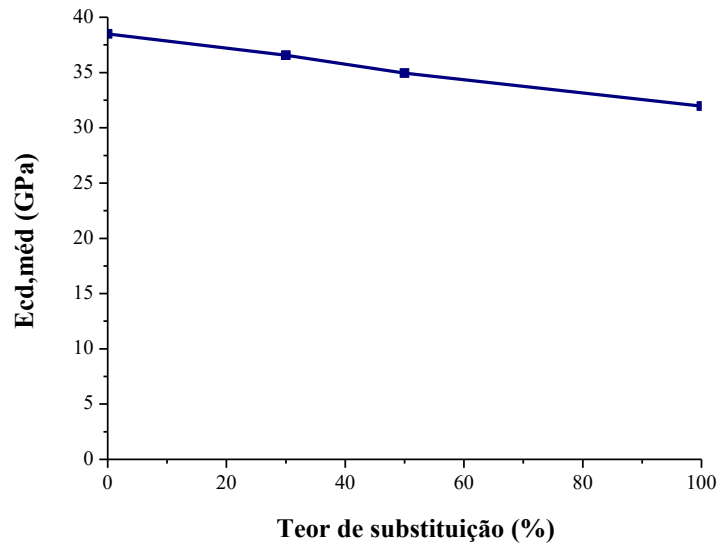
Tabela 3.12 – Resultado dos módulos de elasticidade dos concretos aos 28 dias

Traço		$E_{cd}$ (Gpa)	$E_{cd,méd}$ (GPa)	Dispersão	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
CREF-0	CP1	39,31	38,49	2,1%	0,59	1,5%
	CP3	38,49		0,0%		
	CP3	37,92		1,5%		
	CP4	38,17		0,8%		
	CP5	39,09		1,6%		
	CP6	37,95		1,4%		
CARC-30	CP1	37,28	36,56	2,0%	1,03	2,8%
	CP3	37,14		1,6%		
	CP3	37,43		2,4%		
	CP4	36,12		1,2%		
	CP5	34,69		5,1%		
	CP6	36,71		0,4%		
CARC-50	CP1	35,41	34,95	1,3%	0,49	1,4%
	CP3	34,73		0,6%		
	CP3	34,12		2,4%		
	CP4	35,02		0,2%		
	CP5	34,97		0,05%		
	CP6	35,47		1,5%		
CARC-100	CP1	32,01	31,95	0,2%	0,47	1,5%
	CP3	31,47		1,5%		
	CP3	31,72		0,7%		
	CP4	32,67		2,2%		
	CP5	32,32		1,1%		
	CP6	31,53		1,3%		

Fonte: Própria autora

Ao se comparar os valores de módulo dinâmico dos quatro traços observa-se uma proximidade entre eles, porém conforme ilustra a Figura 3.22 os valores apresentam uma queda com o aumento do teor de substituição de ARC. Essa queda se comporta de forma branda, com a redução do  $E_{cd,méd}$  em torno de 2~3 GPa para cada aumento do teor de substituição, dentre os estudados. A partir do presente na literatura, observa-se que o concreto de ARC tende a apresentar menor rigidez do que o concreto convencional, em virtude dos agregados mais deformáveis. Assim, essa característica apresenta-se em conformidade com o observado durante a investigação experimental.

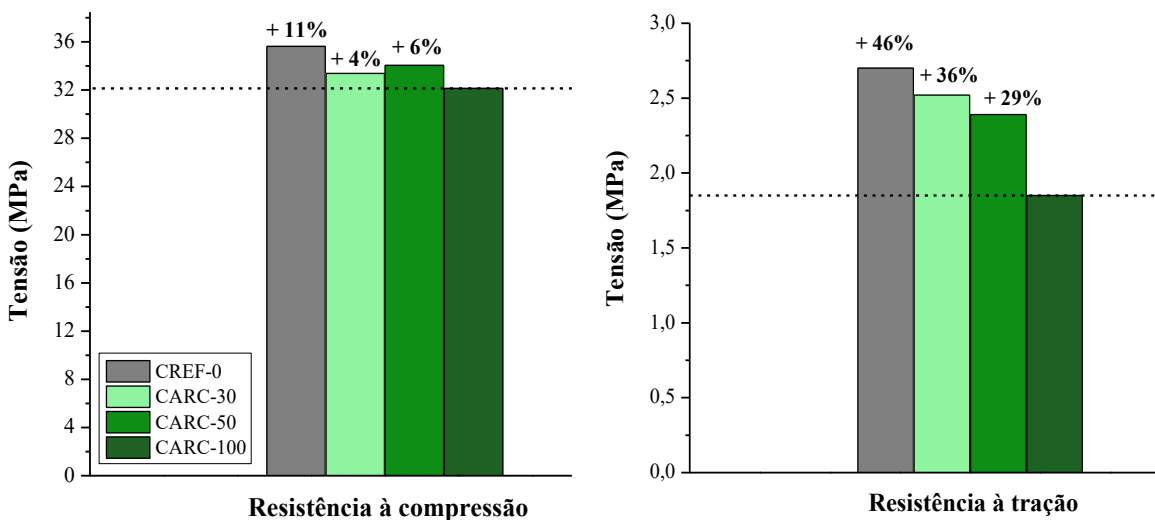
Figura 3.22 – Representação gráfica dos resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias

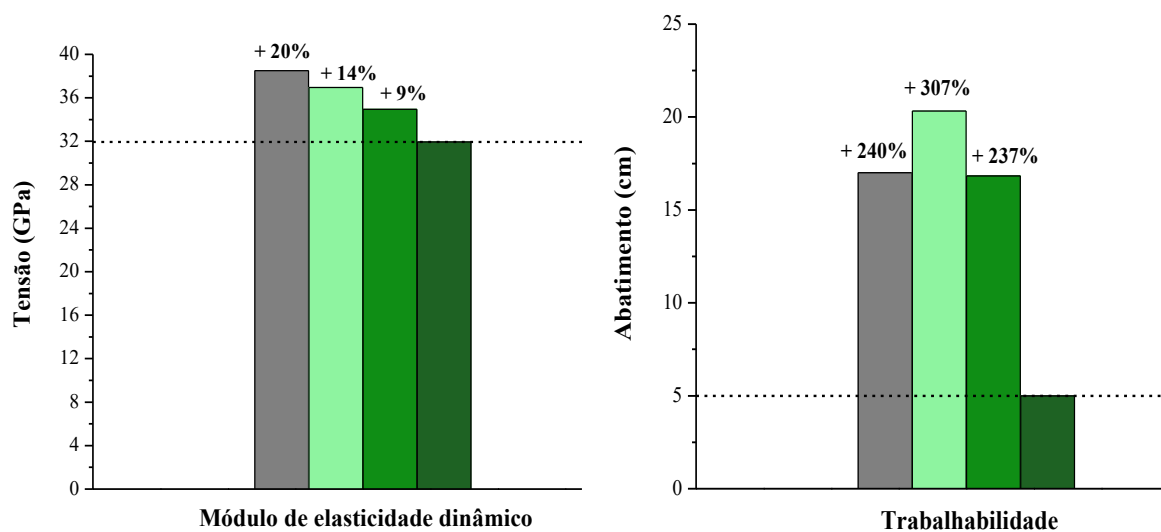


Fonte: Própria autora

Diante do exposto, analisando de forma conjunta os resultados das propriedades mecânicas e trabalhabilidade dos concretos produzidos, apresentados na Figura 3.23, os melhores desempenhos com ARC foram atingidos com teores de substituição de 30% e 50%. Ambas as misturas apresentaram-se bem trabalháveis, com desempenhos similares entre todos os traços estudados. No que tange às resistências à compressão e à tração do CARC-30 e CARC-50, seus resultados divergem em torno de 2% e 7%, respectivamente, apresentando comportamentos similares, com uma leve superioridade do CARC-50 à compressão e do CARC-30 à tração, que pode ser justificada pela heterogeneidade do material trabalhado.

Figura 3.23 – Resumo das propriedades analisadas para os concretos desenvolvidos na análise preliminar





Fonte: Própria autora

No que diz respeito ao módulo de elasticidade dinâmico, a diferença entre os desempenhos dos CARC-30 e CARC-50 situa-se em 5%, com a perda de rigidez do concreto sendo proporcional à quantidade de ARC adotado na mistura. De modo geral observou-se que a consideração do ARC no concreto produzido apresenta predominantemente concordância com as tendências da literatura, com comportamentos similares entre si, indicando viabilidade desse concreto para aplicação estrutural mediante propriedades aqui analisadas.

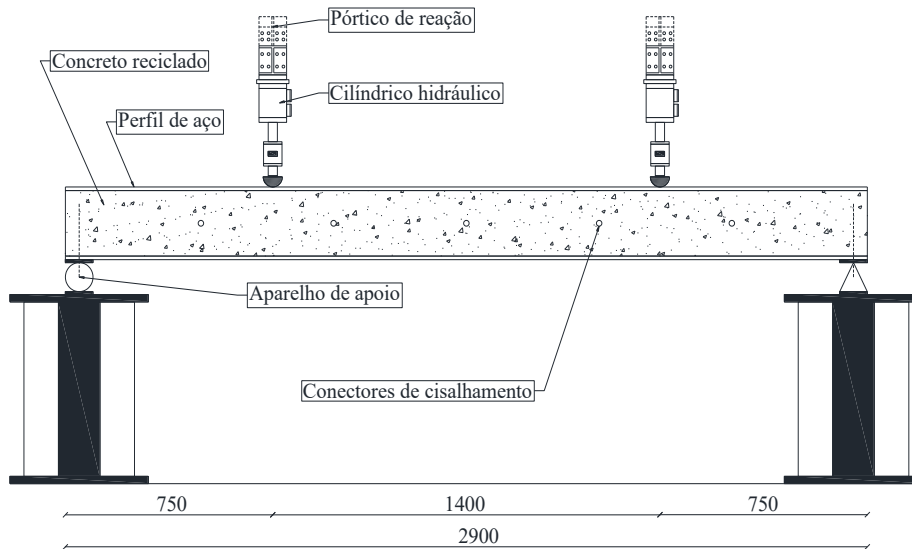
O CARC-100 foi o traço com desempenhos menos satisfatórios, visto que a substituição total da parcela graúda de agregado potencializa os efeitos adversos inerentes à heterogeneidade do material, já os traços com 30% e 50% de substituição apresentaram comportamentos congruentes ao CREF-0, com destaque para um comportamento mais deformável e ligeiramente menos resistente, devido à origem do agregado reciclado. É importante comentar que os teores iguais a 30% e 50% refletem respectivamente 13%, 22% dos agregados totais, estando o CARC-30 de acordo com o limite normativo inferior a 20% e o CARC-50 ligeiramente superior, porém com resultados mecânicos satisfatórios. Assim, ao se analisar os resultados das propriedades estudadas optou-se pela escolha do teor de 50% para aplicação no elemento estrutural. Com isso, potencializa-se o aspecto sustentável do concreto aliado à bons desempenhos no estado fresco e endurecido.

### 3.3 ENSAIO DE FLEXÃO

O ensaio consiste na flexão a quatro pontos do modelo estático de VMPP simplesmente apoiada. As cargas verticais estão separadas entre si por uma distância igual a 1400 mm, localizadas a 750 mm das extremidades do elemento estrutural. A Figura 3.24

ilustra o esquema de ensaio com as dimensões adotadas. Os carregamentos foram aplicados por meio de dois atuadores servo-hidráulicos com capacidade nominal de 500 kN e controle de deslocamento a uma taxa igual a 0,01 mm/s.

**Figura 3.24 - Esquema de ensaio de flexão a quatro pontos (Dimensões em mm)**



Fonte: Própria autora

### 3.3.1 Confeção e instrumentação do modelo de VMPR

A concretagem da VMPR foi realizada em duas etapas, em dias distintos com um intervalo de 48h entre elas. Em cada etapa foi concretada uma face do modelo. Após 24h da concretagem da primeira etapa a fôrma foi removida e montada para execução da segunda etapa. A Figura 3.25 apresenta alguns desses procedimentos.

**Figura 3.25 – Preparação e concretagem do modelo de VMPR**



Fonte: Própria autora

O elemento estrutural foi adensado mecanicamente por meio do vibrador de imersão convencional. Além da concretagem da VMPR, foram concretados 6 corpos de prova cilíndricos e 1 prismático em cada etapa, adensados em mesa vibratória, conforme exemplificado na Figura 3.26. As superfícies dos corpos de prova foram regularizadas com o uso de uma espátula de aço. As amostras foram cobertas com lona plástica com o objetivo de evitar a perda de água. Todos os elementos concretados tiveram o mesmo processo de cura úmida por 7 dias. Após esse período, as amostras foram alocadas no galpão onde permaneceram durante 28 dias precedentes aos ensaios.

**Figura 3.26 – Adensamento da VMPR e concretagem de corpos de prova**



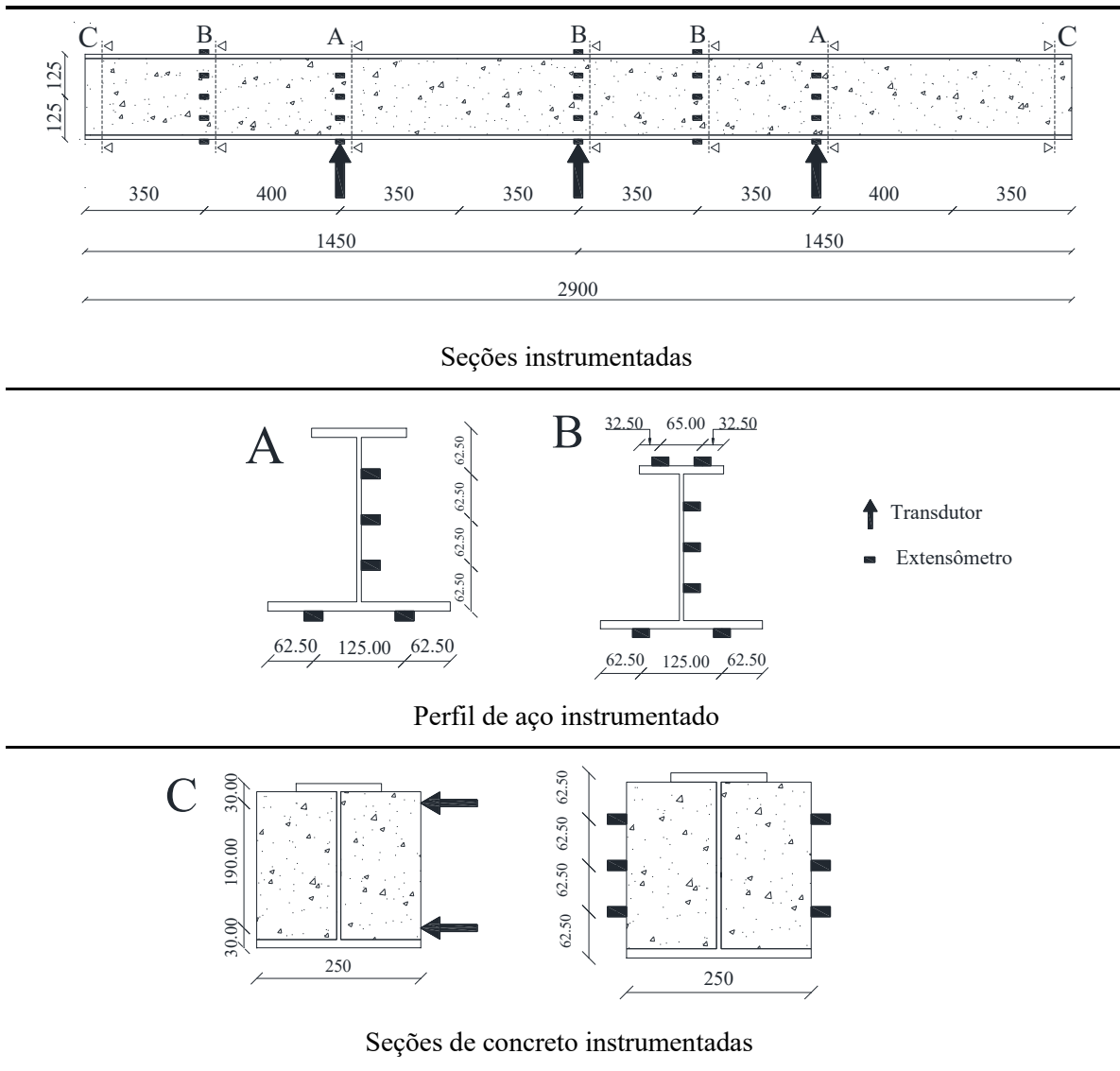
Fonte: Própria autora

A instrumentação da VMPR foi realizada com intuito de acompanhar as deformações, assim como os deslocamentos verticais e deslizamentos entre a porção de concreto e perfil metálico, conforme evolução do carregamento aplicado. Foram utilizados 31 extensômetros elétricos de resistência no perfil de aço, 10 localizados na mesa inferior, 6 na mesa superior e 15 na alma da viga metálica. No revestimento de concreto foram instrumentados 6 extensômetros no meio do vão, sendo 3 de cada lado da viga. A quantidade e localização dos extensômetros utilizados segue o proposto por De Nardin e El Debs (2009) com o objetivo de permitir análises comparativas entre o elemento de concreto reciclado e convencional.

Em relação aos transdutores de deslocamento, foram utilizados 7 no total, 3 na seção longitudinal e 4 nas seções transversais. A Figura 3.27 ilustra a quantidade e posicionamento da instrumentação utilizada. As seções “A” correspondem aos pontos de carregamento, logo não possuem extensômetros na mesa superior do perfil de aço. As seções “B” possuem extensômetros em ambas as mesas, assim como na alma do perfil de aço. As seções “C” apresentam os transdutores horizontais, utilizados para caracterizar o deslocamento relativo

entre a viga metálica e o concreto, dado de suma importância para o estudo da interface entre os dois materiais. A linha central de extensômetros na alma do perfil metálico sofre um deslocamento de 32 mm para esquerda, devido presença dos conectores horizontais nesta seção.

**Figura 3.27 – Instrumentação da viga a ser ensaiada (Dimensões em mm)**

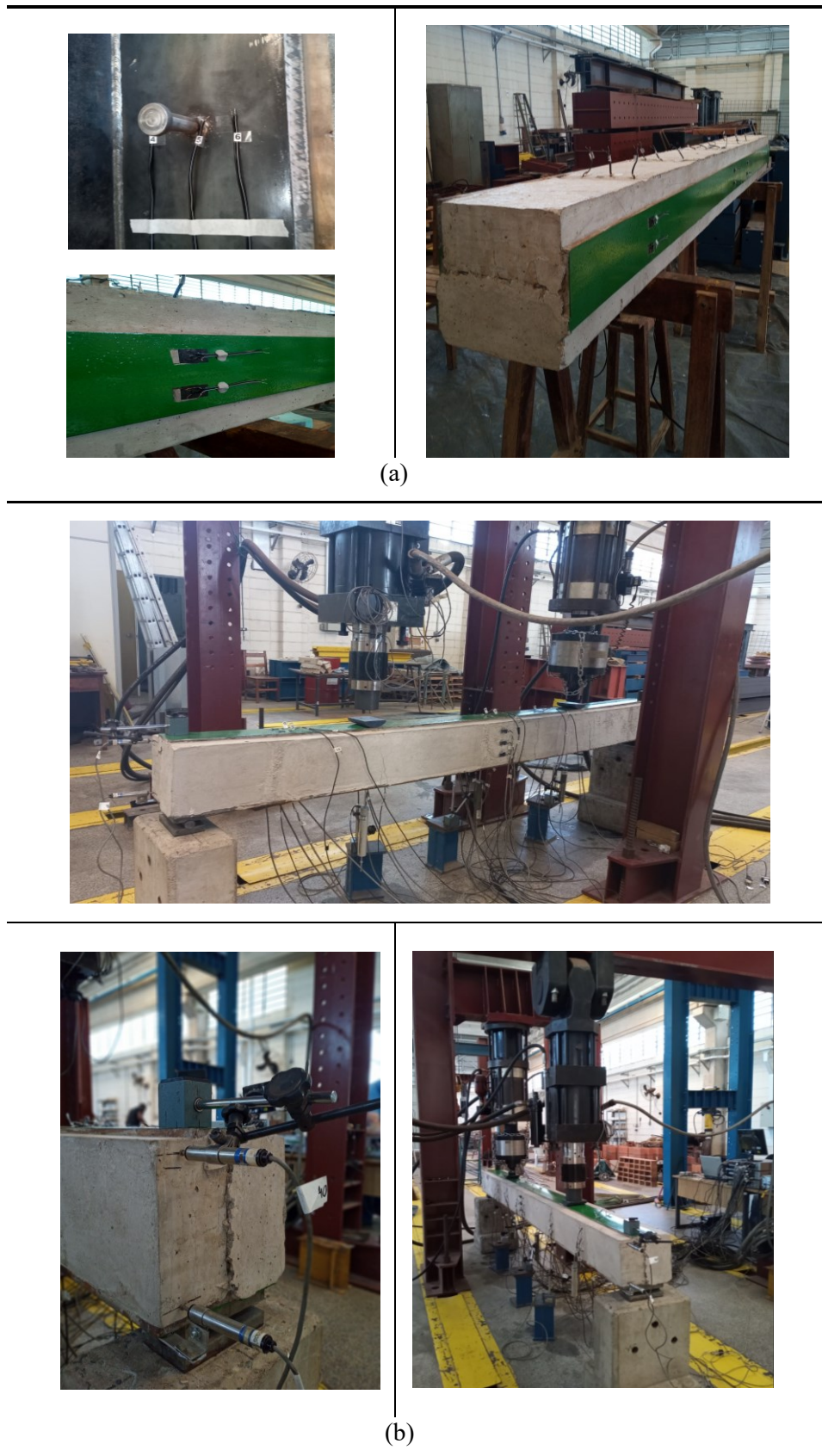


Fonte: Própria autora

Os extensômetros utilizados na alma do perfil metálico foram do tipo KYOWA, modelo KFG-5-120-C1-11. Nas mesas do elemento metálico foram do tipo EXCEL PA-06-250BA-120-L. No concreto foram utilizados extensômetros do tipo EXCEL PA-06-800BA-120-L. Alguns detalhes da instrumentação estão apresentados na Figura 3.28, assim como o esquema completo do ensaio de flexão a quatro pontos.



Figura 3.28 – Instrumentação da VMPR e esquema de ensaio de flexão (a) Extensômetros no aço e no concreto (b) Esquema do ensaio de flexão em quatro pontos



Fonte: Própria autora

### 3.3.2 Caracterização do concreto

O concreto utilizado no elemento estrutural foi o CARC-50 e para sua caracterização no estado fresco foram feitas medições de abatimento de tronco de cone. No estado endurecido foram realizados ensaios de compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico, sendo moldados 6 corpos de prova cilíndricos em cada dia de concretagem, além de 1 corpo de prova prismático em cada dia com o intuito de analisar a energia de fratura do concreto em estudo. A Figura 3.29 ilustra alguns dos procedimentos realizados durante os ensaios no estado fresco. O valor de abatimento médio obtido foi igual a 23 cm, caracterizando uma mistura bem trabalhável.

Figura 3.29 – Ensaio de abatimento de tronco de cone no CARC-50



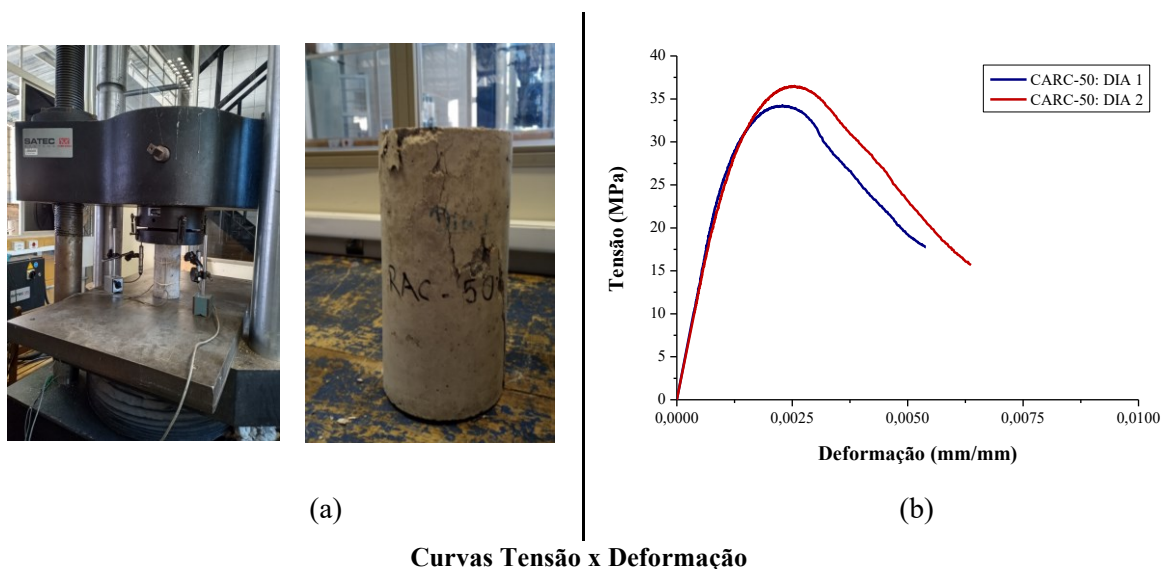
Fonte: Própria autora

Para os ensaios de compressão, duas máquinas foram utilizadas. Dos 12 corpos de prova, 10 foram ensaiados na ELE Autotest 2000 e o restante, 1 referente à cada dia foram submetidos ao ensaio de compressão na Instron Satec®, modelo 300 HVL, com capacidade nominal de 1500 kN e aplicação de controle de deslocamentos a uma velocidade de 0,005 mm/s para obtenção de curvas Tensão x Deformação a serem aplicadas na modelagem numérica.

A Figura 3.30 apresenta alguns detalhes do ensaio, o plano de fissuração observado e as curvas obtidas. Foram utilizados dois *clip-gages* e dois transdutores de deslocamento para acompanhamento das deformações. Em relação à resistência à tração e módulo de elasticidade estes foram medidos de forma análoga ao apresentado na seção 3.2.6. Para determinar a energia de fratura do concreto reciclado foram realizados ensaios de flexão a três pontos em corpos de prova prismáticos com entalhe central, para evitar a dissipação de energia fora da zona de fratura.



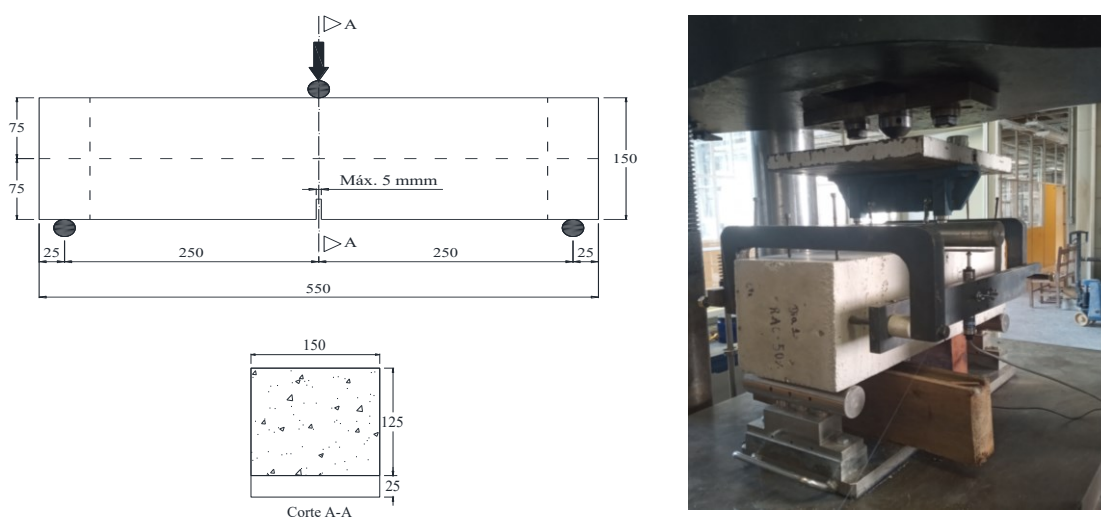
Figura 3.30 – Ensaio de compressão e curvas dos corpos de prova analisados (a) Ensaio de compressão (b)



Fonte: Própria autora

A Figura 3.31 apresenta detalhes geométricos do corpo de prova prismático adotado, assim como o esquema de ensaio. Esse foi executado na Instron Satec®, modelo 300 HVL, com controle de deslocamento e a uma velocidade de 0,0005 mm/s, mesma taxa adotada em Pereira (2014). Foram utilizados *clip-gage* e transdutores de deslocamento para medir a abertura do entalhe e deslocamento no meio do vão, respectivamente.

Figura 3.31 – Ensaio de flexão em três pontos em corpo de prova prismático (Dimensões em mm)



Fonte: Adaptado de RILEM 50-FCM (1985)

O cálculo da energia de fratura ( $G_f$ ), que pode ser entendida como a energia necessária para abrir uma unidade de área de fissura, foi realizado de acordo com a formulação

apresentada no RILEM 50-FCM (1985) que descreve este parâmetro conforme Equação 3.2, onde  $w_0$  é definida como área contida abaixo do gráfico Força x Deslocamento proveniente do ensaio de prisma;  $m_1$  é a massa do corpo de prova entre os apoios;  $m_2$  é a massa do equipamento não acoplada ao atuador que acompanha a deformação do corpo de prova durante a realização do ensaio;  $g$  é a aceleração da gravidade;  $\delta_0$  é a flecha última e  $A_{lig}$  representa a área de ligamento, referente à região acima do entalhe.

$$G_f = \frac{w_0 + (m_1 + m_2)g\delta_0}{A_{lig}} \quad (3.2)$$

Diante do exposto, a Tabela 3.13 apresenta os resultados das propriedades mecânicas avaliadas nos corpos de prova moldados. O critério de Chauvenet foi aplicado ao conjunto de dados referente à cada propriedade e apenas um valor pertence às medições de resistência à tração não atendeu ao critério aplicado, sendo removido do conjunto de dados apresentado. A partir dos resultados obtidos pode-se observar que estão em concordância com as tendências observadas na análise preliminar e apresentam uma variabilidade satisfatória.

**Tabela 3.13 – Resumo das propriedades mecânicas do CARC-50**

Propriedades mecânicas		Medições	Média	Dispersão	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Resistência à compressão (MPa)	CP1	34,84	35,92	3,01%	1,36	3,8%
	CP2	35,17		2,09%		
	CP3	37,24		3,67%		
	CP4	37,53		4,48%		
	CP5	36,50		1,61%		
	CP6	34,24		4,68%		
Resistência à tração (MPa)	CP1	2,89	2,89	0,15%	0,11	3,9%
	CP2	2,84		1,84%		
	CP3	2,84		1,74%		
	CP4	2,81		3,02%		
	CP5	3,09		6,76%		
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	CP1	29,88	30,76	2,85%	0,82	2,7%
	CP2	31,43		2,19%		
	CP3	29,96		2,58%		
	CP4	30,24		1,67%		
	CP5	31,31		1,80%		
	CP6	31,71		3,11%		
Energia de fratura (N/mm)	CP1	0,100	0,095	4,97%	0,01	7,0%
	CP2	0,091		4,97%		

### 3.3.3 Resultados e discussões

Os resultados apresentados nesta seção são referentes ao ensaio de flexão a quatro pontos realizado na VMPR com concreto de resíduos reciclados de concreto, adotando 50% de substituição da parcela graúda por ARC. É importante destacar que os valores representativos do concreto produzido com agregados naturais (concreto convencional) foram extraídos de De Nardin e El Debs (2009). A Tabela 3.14 apresenta as principais propriedades mecânicas e resultados experimentais dos elementos estudados.

Constata-se uma proximidade entre as propriedades mecânicas dos elementos, com diferenças inferiores à 10%, com exceção do resultado para o módulo de elasticidade estático, concordante com a origem mais deformável do agregado que tende a influenciar na rigidez do concreto resultante. É importante destacar que o módulo de elasticidade para o CARC-50 foi adotado a partir das curvas Tensão x Deformação resultantes dos ensaios de compressão dos corpos de prova cilíndricos, calculado no trecho linear das curvas, até um valor de tensão referente à 40%, conforme Model Code (*fib*, 2013).

**Tabela 3.14 – Principais propriedades mecânicas e capacidade resistente das vigas analisadas**

Tipo de revestimento	Propriedades mecânicas (MPa)				Força última (kN)	Desl. máx. (mm)	Escorr. máx. (mm)
	$f_{cm}$	$f_{tm}$	$E_c$	$f_{ym}$			
De Nardin e El Debs (2009) Conc.convencional	35,7	2,7	32288	308	309,10	27,36	3,14
Investigação experimental CARC-50	35,92 (+ 1%)	2,89 (+ 7%)	23992 (- 26%)	318,50 (+ 3%)	325,46 (+ 5%)	32,98 (+ 17%)	1,75 (- 44%)

Fonte: Própria autora

No que tange à capacidade resistente das VMPR, a revestida com concreto reciclado apresentou um valor de força última, ou seja, força máxima aplicada em cada região de carregamento, ligeiramente superior à revestida com concreto convencional e consequentemente um maior valor de deslocamento vertical máximo no meio do vão. Acerca do escorregamento entre o perfil de aço e o volume de concreto, a VMPR com CARC-50 apresentou resultado inferior.

A fim de avaliar quais formulações teóricas mais se aproximam da capacidade resistente da VMPR com concreto reciclado, a partir dos modelos analíticos apresentados na seção 2.2.3 e aplicando as propriedades obtidas experimentalmente, a Tabela 3.15 aponta os resultados de acordo com os quatro modelos teóricos estudados, com a consideração de

interação completa entre o perfil de aço e o concreto. Diante do exposto, nota-se que todos os modelos teóricos apresentam valores de momento fletor superiores ao experimental e o que melhor aproxima a capacidade resistente obtida no ensaio de flexão a quatro pontos é o desenvolvido por Assi, Abed e Hunaiti (2002), com diferença em torno de 2%. Os demais apresentam erro menor que 10%, com exceção do modelo proposto em Limazie e Chen (2015).

Todas as previsões analíticas se apresentaram como alternativas viáveis para prever o comportamento do elemento estrutural. É interessante salientar que o modelo desenvolvido em Assi, Abed e Hunaiti (2002) não considera a contribuição do concreto na formulação de momento resistente, sendo incluído apenas no cálculo da linha neutra plástica, o que justifica ter sido o menor dentre os momentos teóricos calculados.

**Tabela 3.15 – Resultados teóricos para previsão da capacidade resistente da VMPR**

Documento científico	Momento fletor máximo (kNm)		Analítico/Exp.	Erro (%)
	Teórico	Experimental CARC-50		
Kindmann e Bergmann (1993)	242,99	227,82	1,07	6,66%
Assi, Abed e Hunaiti (2002)	232,99		1,03	2,27%
De Nardin e El Debs (2009)	250,38		1,09	9,90%
Limazie e Chen (2015)	253,10		1,11	11,09%

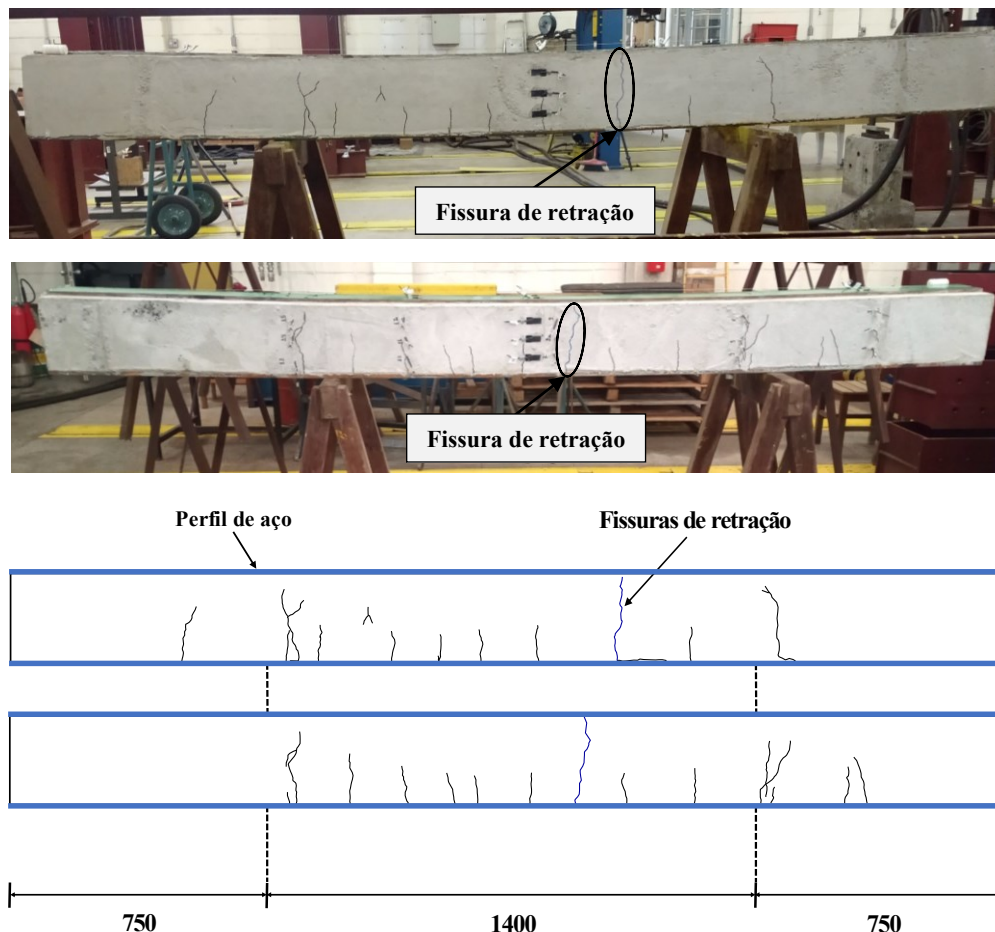
Fonte: Própria autora

A Figura 3.32 ilustra o panorama final de fissuração da viga, dos dois lados do elemento ensaiado, assim como um desenho esquemático para melhor localizar e analisar as fissuras. O modo de falha verificado foi a ruptura por flexão, com escoamento do perfil metálico na região tracionada e alto grau de fissuração do concreto entre as mesas do perfil, com início na região de momento fletor constante se propagando para os apoios com o aumento do carregamento aplicado. A primeira fissura foi observada a um nível de carga igual a 32,92 kN, equivalente a aproximadamente 10% da força última. De Nardin e El Debs (2009) e Cavalcanti (2010) observaram o início de fissuração para valores de carga iguais a 33 kN e 42 kN, respectivamente, coerente com o observado experimentalmente nesse estudo.

As fissuras no estágio inicial de carga foram praticamente verticais, assumindo inclinações ao passo que a força aumentava, chegando a se tornar horizontal e paralela na interface inferior entre a mesa do perfil e revestimento de concreto, panorama compatível com o observado em De Nardin e El Debs (2009). A partir da Figura 3.32 pode-se observar duas fissuras de retração, uma em cada lado da VMPR. Essas surgiram logo após a concretagem,

durante a cura do concreto, porém não apresentaram aumento significativo de abertura durante o ensaio.

**Figura 3.32 – Panorama final da VMPR ensaiada (Dimensões em mm)**



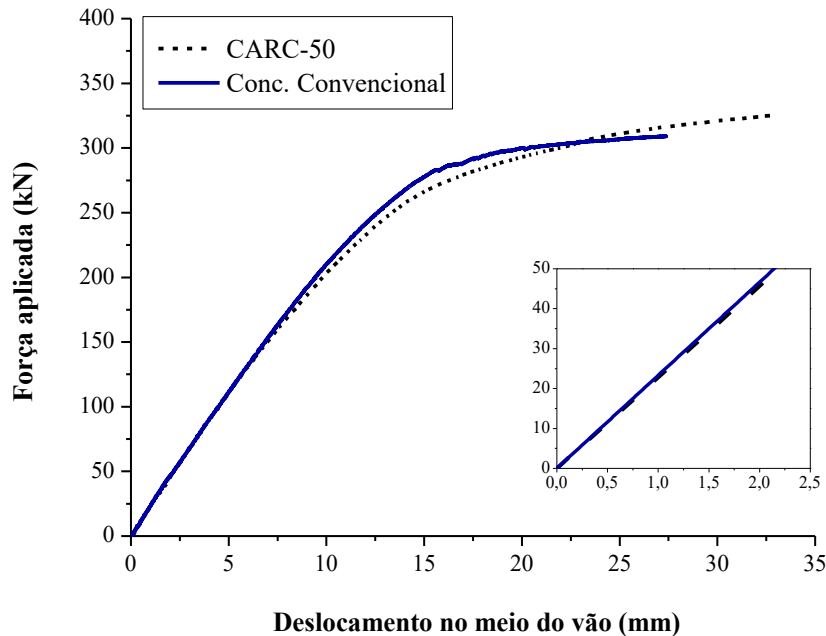
Fonte: Própria autora

Acerca dos deslocamentos verticais, esses foram medidos por três transdutores de deslocamentos e os resultados referentes ao meio do vão de acordo com a aplicação do carregamento estão apresentados na Figura 3.33, assim como uma comparação com a curva resultante da viga revestida com concreto convencional. O trecho elástico apresenta alto grau de similaridade entre os dois elementos estudados ilustrando mudanças significativas apenas a partir de valores de força aplicada em torno de 200 kN.

No trecho pré-pico, o modelo com concreto convencional tem comportamento mais rígido, coerente com o esperado do concreto com agregados reciclados, que mesmo apresentando valores próximos à De Nardin e El Debs (2009) em termos de módulo de elasticidade refletiu prejuízos na rigidez da curva do elemento estrutural. O pico das curvas também apresenta variações, conforme apontado na Tabela 3.14. De acordo com os modelos

teóricos, acredita-se que o aumento na capacidade resistente da viga com CARC-50 deve-se à maior tensão de escoamento do perfil de aço utilizado.

**Figura 3.33 – Curva Força x Deslocamento no meio do vão de acordo com o revestimento da VMPR**



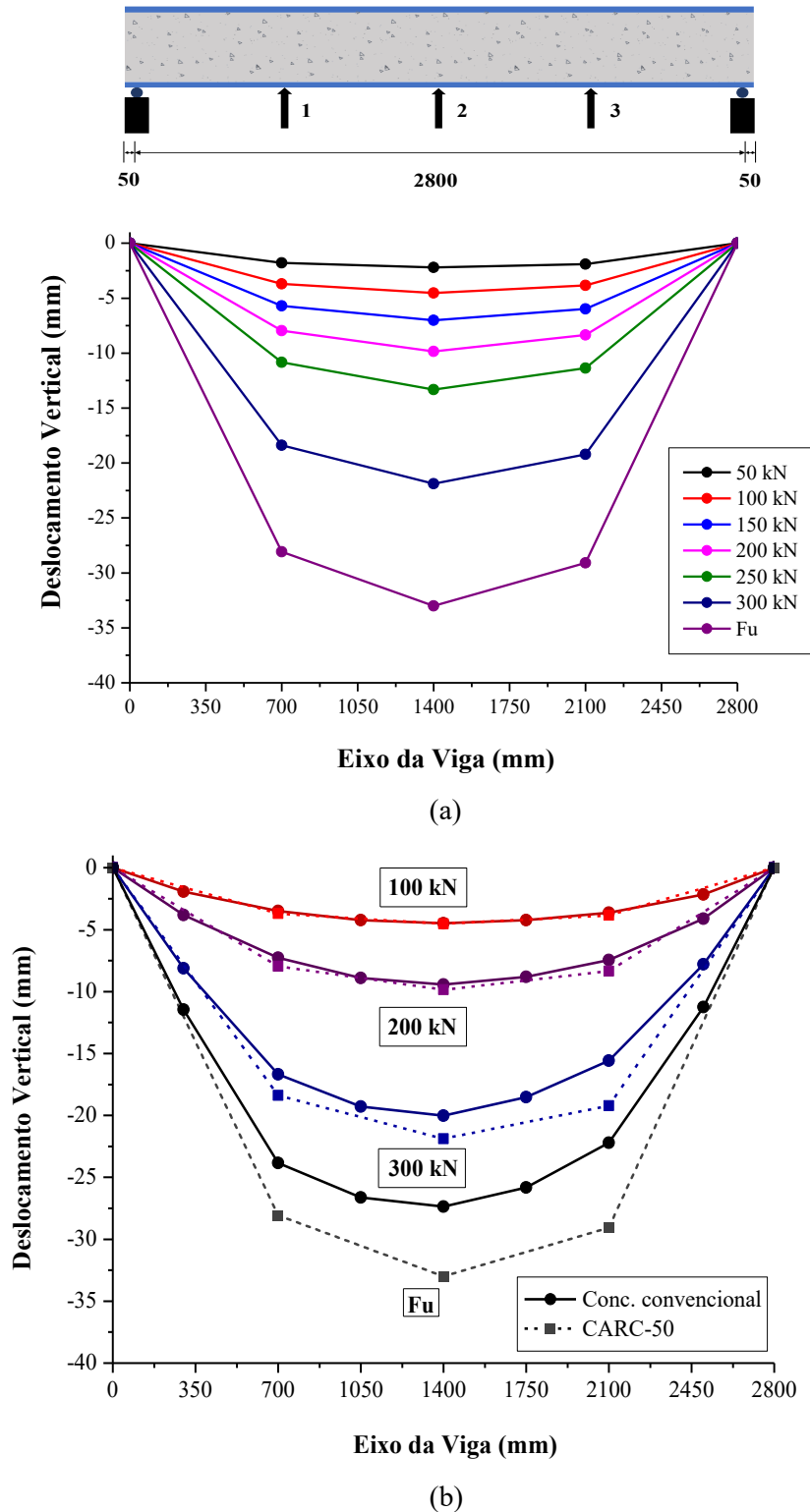
Fonte: Própria autora

Em relação ao crescimento dos deslocamentos verticais nos pontos de medição, a Figura 3.34 apresenta os resultados graduais dos deslocamentos do elemento fletido com o aumento da aplicação de força. É interessante pontuar que até valores de forças próximos a 200 kN o aumento de deslocamentos se deu de forma branda, porém a partir de carregamentos superiores a 250 kN, ou seja, em torno de 77% da carga última, os deslocamentos verticais obtiveram crescimento notório a uma taxa perceptivelmente superior à observada nos estados iniciais de aplicação de carga.

A Figura 3.34b apresenta uma comparação do desenvolvimento dos deslocamentos verticais para as vigas revestidas com concreto convencional e reciclado. Para forças inferiores a 300 kN observa-se que as duas VMPR se deformam de forma similar, mas a partir de níveis de carga próximos à força última os deslocamentos da viga revestida com CARC-50 aumentam consideravelmente, devido à natureza mais deformável do ARC. A partir desse fenômeno, admite-se que ao analisar o Estado Limite de Serviço os dois elementos estruturais apresentam comportamento similares. O aumento de deslocamento vertical observado para a VMPR com CARC-50 não influencia na capacidade resistente do elemento estrutural, que chega a superar o valor de força última da viga revestida com concreto com agregados naturais, mas evidencia a necessidade de análises a respeito dos limites de deformações que a

estrutura requer para melhores avaliações a respeito de sua viabilidade a depender da aplicação.

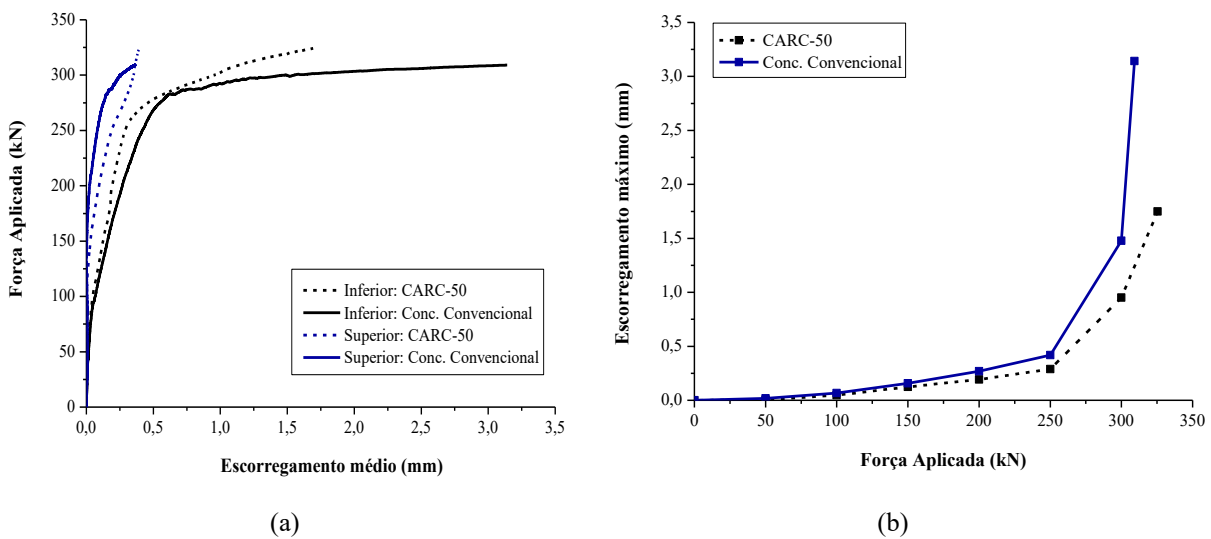
Figura 3.34 – Deslocamentos verticais das VMPR em estudo (a) CARC-50 (b) Concreto convencional e CARC-50



Fonte: Própria autora

A fim de melhor avaliar a influência do CARC-50 no estabelecimento da interface entre o aço e o volume de concreto e conseqüentemente no comportamento misto, as medições dos escorregamentos foram realizadas por meio de 4 transdutores, 2 em cada extremidade, localizados a 30 mm da mesa superior e inferior das VMPR. A Figura 3.35 apresenta os resultados de escorregamento médio inferiores e superiores do elemento estrutural, assim como os máximos obtidos de acordo com o carregamento aplicado.

**Figura 3.35 – Comparação entre escorregamentos das vigas analisadas de acordo com o tipo de revestimento (a) Curvas de escorregamento médio inferior e superior (b) Escorregamentos máximos**



Fonte: Própria autora

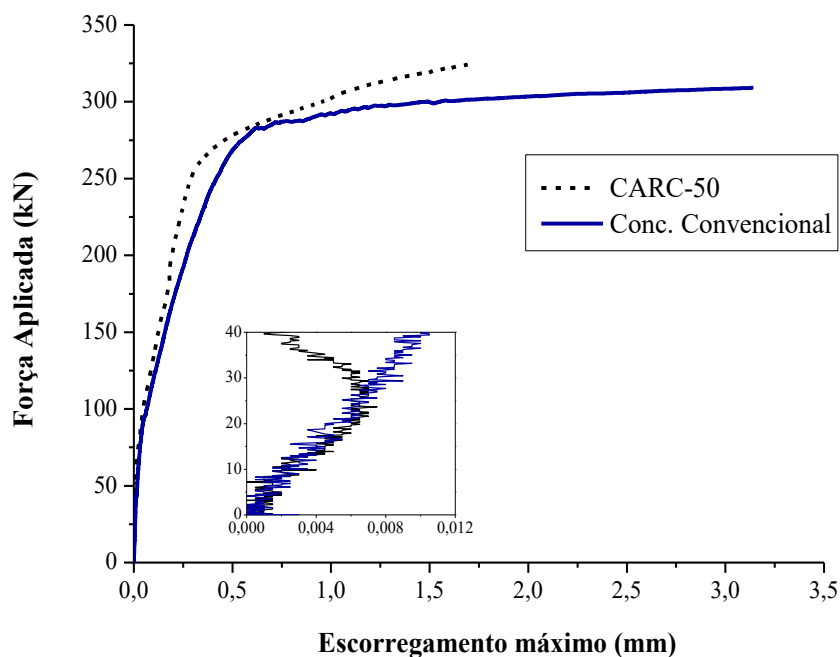
Os maiores valores de escorregamento foram medidos na zona de tração das VMPR (Figura 3.35a), na parte inferior. Em relação às comparações entre os valores de escorregamento das duas vigas, como observado na Figura 3.35b pode-se perceber que diferenças mais significativas são observadas para carregamentos a partir de 250 kN, onde a diferença entre os deslizamentos em relação ao concreto convencional está em torno de 31%. Para o carregamento último pontua-se que a viga revestida com concreto convencional apresentou um deslizamento significativamente superior ao da viga revestida com CARC-50.

A exemplo de Li *et al.* (2015), o uso de agregados reciclados na produção de concretos melhorou o estabelecimento de uma efetiva interface entre o elemento de aço e o concreto, reduzindo o deslizamento, congruente com o observado na investigação experimental. O trecho inicial das curvas ilustradas na Figura 3.36 possui comportamento mais rígido, coerente com a magnitude do carregamento aplicado, correspondente à parcela natural de aderência da interface entre o perfil de aço e o concreto. A partir de carregamentos por volta de 30 kN percebe-se uma ruptura desse tipo de aderência a um escorregamento em torno de



0,006 mm, com uma mudança de comportamento da curva, comportamento semelhante ao observado em Cavalcanti (2010), para um nível de carga igual a 25 kN. Assim, diante da análise experimental realizada aponta-se uma melhora na interface entre os materiais, com redução do escorregamento em relação ao modelo com concreto convencional.

**Figura 3.36 – Curva Força x Escorregamento máximo da VMPR conforme tipo de revestimento**



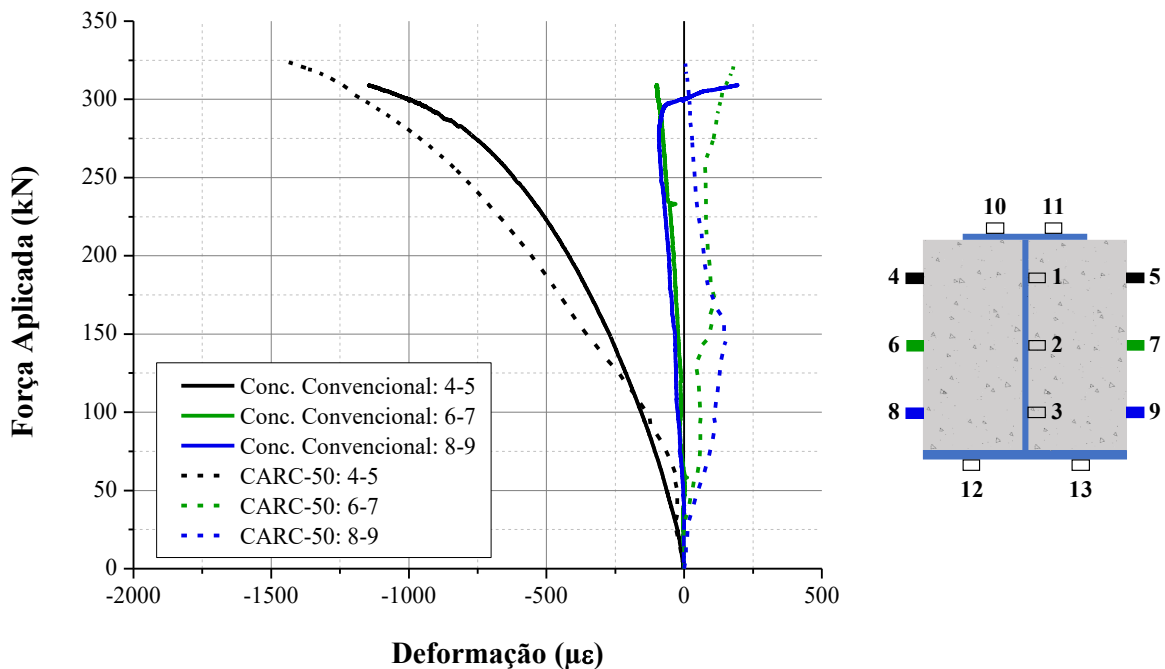
Fonte: Própria autora

No que tange às deformações do concreto no meio do vão, a Figura 3.37 ilustra os resultados médios para o elemento ensaiado em De Nardin e El Debs (2009) e o com CARC-50. A partir do gráfico pode-se notar que a parcela superior do concreto, acima do centro geométrico da seção transversal representada pela média dos extensômetros 4 e 5, apresenta os maiores níveis de deformação, em torno de 1470  $\mu\epsilon$  para o CARC-50 e 1150  $\mu\epsilon$  para o concreto convencional. Essa porção de concreto encontra-se comprimida, comportamento esperado devido ao fenômeno de flexão.

À meia altura as deformações foram contabilizadas por média das leituras dos extensômetros 6 e 7. Para o concreto convencional apresentou valores negativos, representativos de compressão, enquanto para o reciclado apresentou valores característicos de tração, indicando, por meio das deformações do concreto, diferentes posições de linha neutra (LN) para as duas VMPR. É importante declarar que os níveis de deformação medidos foram baixos para os dois elementos estruturais, em torno de - 99  $\mu\epsilon$  e 182  $\mu\epsilon$  para o elemento revestido com concreto convencional e CARC-50, respectivamente.

Para os extensômetros localizados na parte inferior da seção transversal (8 e 9), a viga com concreto convencional apresentou-se submetida à compressão, com mudança de comportamento próximo à força última, indicando tração, enquanto a com concreto reciclado apresentou-se submetida à tração durante toda trajetória de carga aplicada. Para níveis de carregamentos próximos da força máxima, as deformações contemplam menores valores, em torno de  $195 \mu\epsilon$  e  $3 \mu\epsilon$ , respectivamente para o concreto convencional e reciclado. Assim, pode-se observar que para os dois elementos a contribuição do concreto à tração foi pouco significativa, enquanto à compressão seu comportamento foi mais colaborativo.

Figura 3.37 – Deformações do concreto no meio do vão conforme tipo de revestimento das VMPR



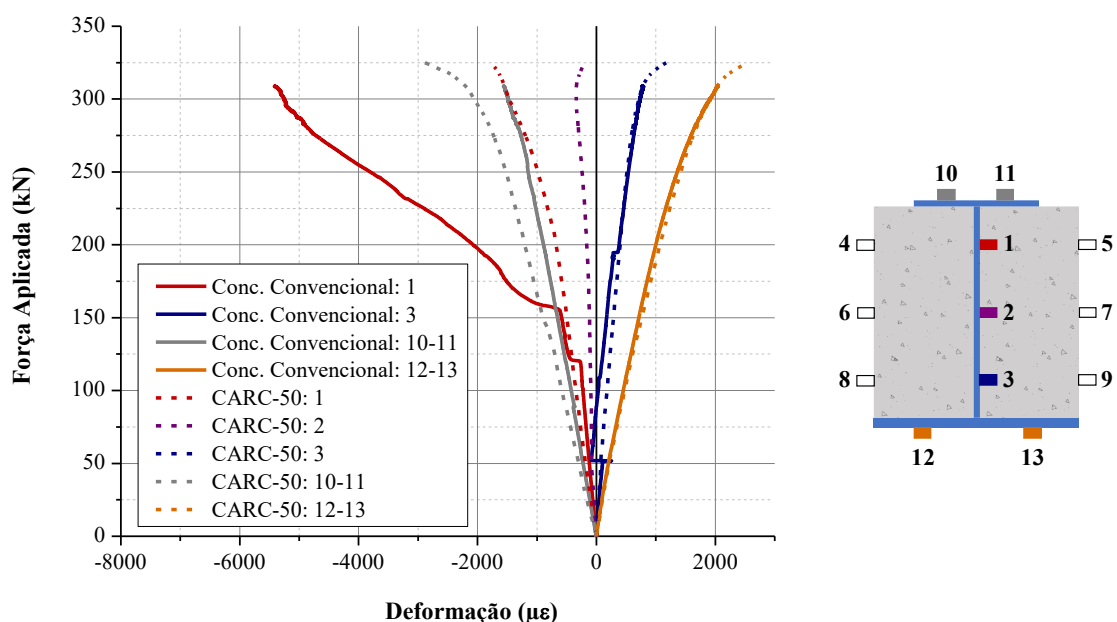
Fonte: Própria autora

As deformações no perfil de aço, quando analisado o meio do vão, estão apresentadas na Figura 3.38. Pode-se observar que as maiores medições ocorreram na alma da viga com concreto convencional, na porção superior, representada pelo extensômetro 1 e na mesa superior, para a VMPR com CARC-50. As deformações dos extensômetros 3 e a média entre os 12 e 13 são praticamente idênticas para as duas VMPR, até a força máxima atingida em De Nardin e El Debs (2009). Para a viga revestida com concreto convencional houve um problema com a medição do extensômetro 2 o que inviabilizou sua representação, sendo apresentado apenas o resultado para o elemento revestido com CARC-50, com deformações negativas, indicando que à meia seção o perfil metálico encontra-se submetido à compressão.

Diante disso, o que se verifica é uma distribuição mais uniforme das deformações da viga com concreto reciclado, com o ponto inferior da alma do perfil assim como a mesa inferior (3 e 12-13) tracionados, enquanto os pontos referentes à meia seção, parcela superior da alma e mesa também superior (1,2 e 10-11) encontram-se comprimidos indicando posição de LN do perfil metálico entre os pontos 2 e 3. Para o concreto convencional, a LN localiza-se entre os pontos 1 e 3. Além disso, por conta do concreto reciclado apresentar um módulo de elasticidade inferior ao concreto convencional este apresenta uma menor contribuição ao homogeneizar a seção transversal.

No tocante as regiões mais solicitadas, para a viga com concreto reciclado a região metálica mais solicitada foi a mesa superior, já para o elemento estudado em De Nardin e El Debs (2009) o ponto 1, referente à parcela superior da alma do perfil metálico foi o que apresentou maiores deformações. As autoras justificam esse comportamento como consequência da posição do conector de cisalhamento, porém esse fenômeno não foi observado na viga ensaiada no presente trabalho. Mais investigações são necessárias para melhor avaliar essas deformações e a influência efetiva da posição dos conectores no comportamento dessas deformações.

**Figura 3.38 - Deformações no perfil de aço no meio do vão conforme tipo de revestimento das VMPR**

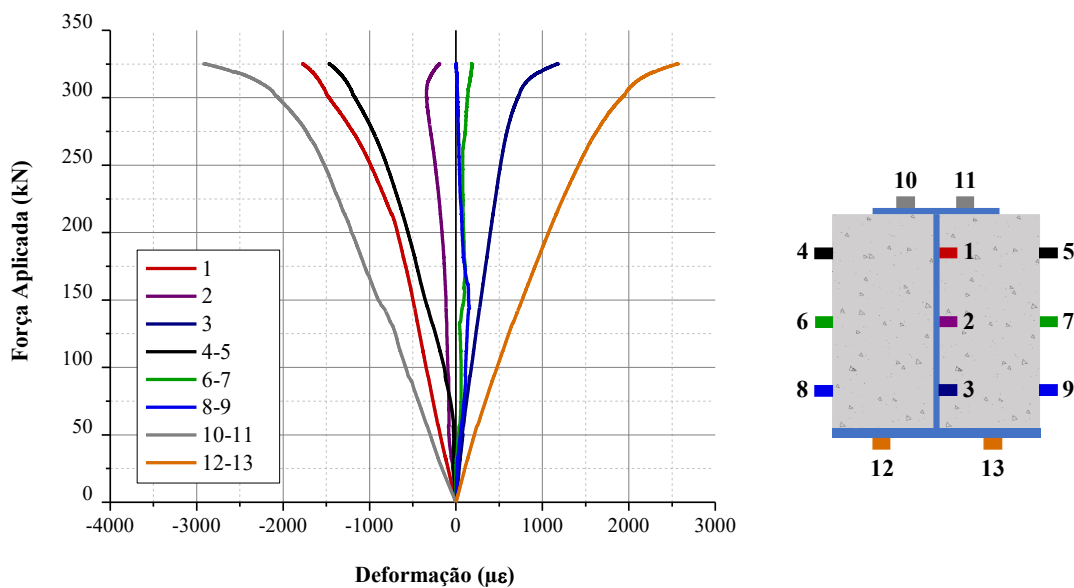


Fonte: Própria autora

A Figura 3.39 apresenta um resumo das deformações de todos os pontos de extensômetros instrumentados no meio do vão da VMPR. As regiões mais solicitadas foram as mesas do perfil metálico. É perceptível a contribuição do concreto no trecho comprimido,

enquanto o perfil metálico é majoritariamente responsável pela resistência à tração do elemento misto. À meia seção, observa-se que a alma do perfil encontra-se comprimida, enquanto o concreto encontra-se tracionado. Algumas hipóteses para justificar esse fenômeno se encontram em irregularidades geométricas que podem ter ocasionados diferentes distribuições de tensões, no entanto análises mais profundas são necessárias para explicar o fenômeno.

**Figura 3.39 - Deformações no meio do vão para VMPR com CARC-50**

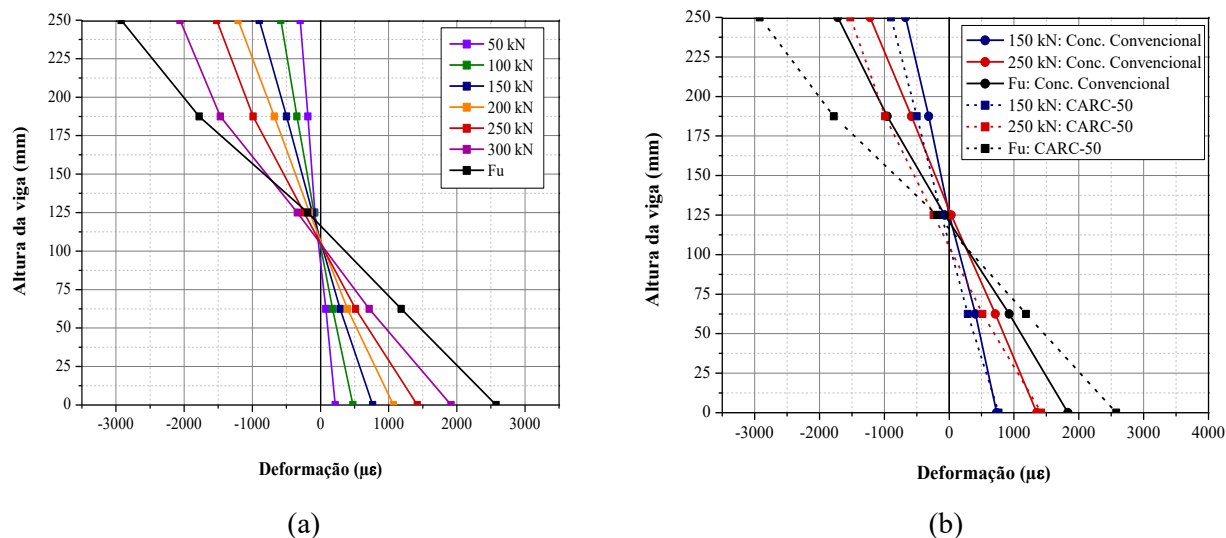


Fonte: Própria autora

No que se refere à localização da LN no meio do vão da VMPR com CARC-50, a Figura 3.40 apresenta sua distribuição de acordo com os níveis de carregamento aplicado, assim como uma comparação entre alguns valores de carga nos dois elementos estruturais estudados. Pode-se observar que para a viga com CARC-50 a LN localiza-se abaixo do meio da seção, ou seja, a uma altura inferior a 125 mm para todos os níveis de carga. Como esperado as deformações vão aumentando de forma gradativa ao passo que a força também aumenta, sendo que para carga última ( $F_u$ ) a LN é igual a aproximadamente 117 mm. Para o concreto convencional, a LN encontra-se em torno de 125 mm, à meia seção, indicando um comportamento simétrico de distribuição das tensões.

Para os dois elementos, desde o início do carregamento observa-se a mobilização do comportamento conjunto dos componentes da estrutura mista, o que reitera o aumento da altura da LN referente à força última, pois devido ao crescimento gradativo da fissuração do concreto é necessária uma maior altura da seção tracionada para respeitar o equilíbrio de forças agindo na seção transversal.

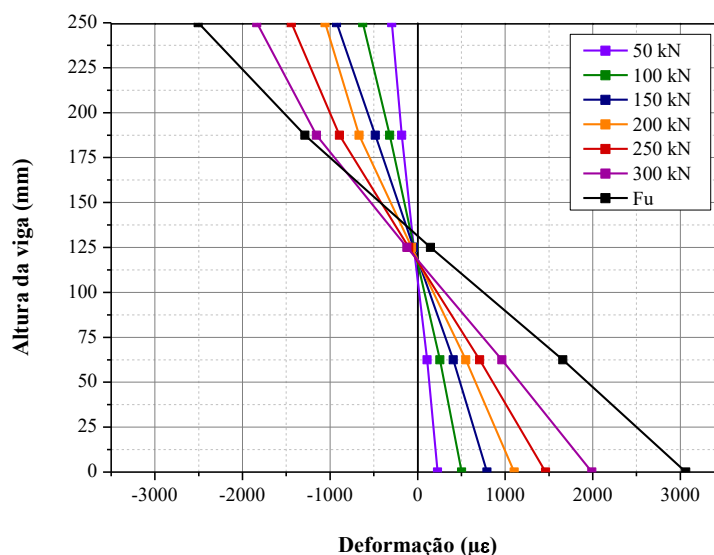
**Figura 3.40 - Configuração da linha neutra no meio do vão para VMPR com CARC-50 (a) e comparação com elemento revestido com concreto convencional (b)**



Fonte: Própria autora

Os outros pontos instrumentados na VMPR com CARC-50 na região de momento fletor constante, localizado à 1100 mm da extremidade do elemento, apresentaram comportamentos semelhantes ao apresentado na Figura 3.40a, conforme ilustrado na Figura 3.41.

**Figura 3.41 - LN referente à região de momento fletor constante da VMPR:CARC-50**



Fonte: Própria autora

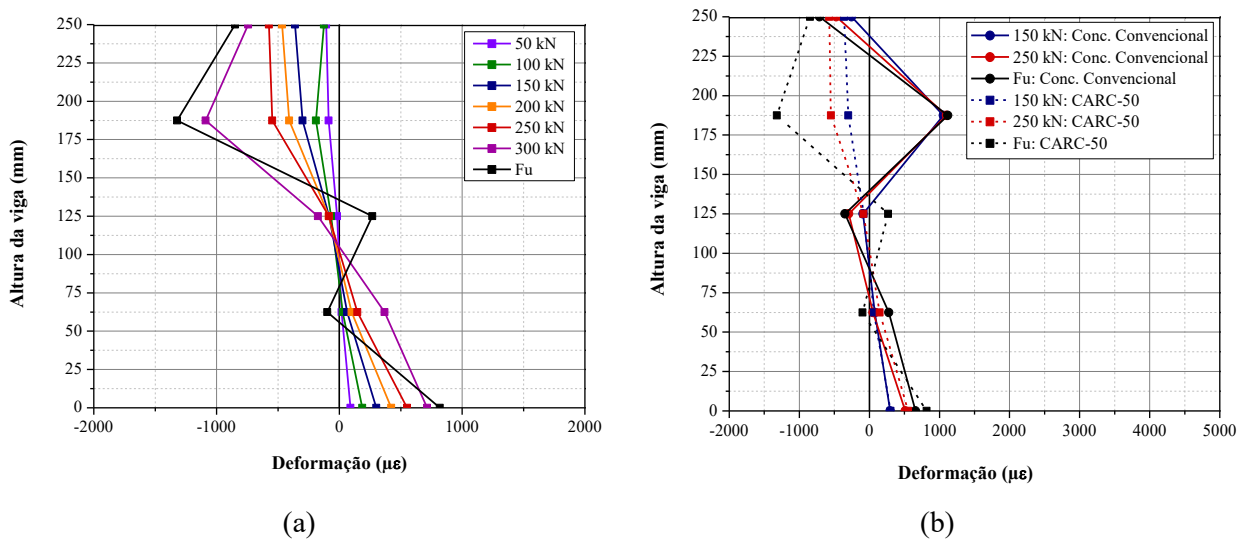
Nessa região, as LN de todos os níveis de carregamento apresentaram-se localizadas à meia seção, ou seja, na altura igual a 125 mm, diferentemente da região do meio do vão que apresentou uma localização inferior a 125 mm para todos os carregamentos aplicados. No

tocante aos trechos de esforço cortante constante, a Figura 3.42 representa a evolução do carregamento e correspondente posição da LN, assim como um comparativo em alguns níveis de carga com o observado para o elemento revestido com concreto convencional em De Nardin e El Debs (2009).

É importante destacar que na VMPR com concreto reciclado observa-se uma mudança abrupta de comportamento da LN quando aplicada força máxima, o que não acontece em outros níveis de carregamento, diferentemente do pontuado em De Nardin e El Debs (2009), que conforme Figura 3.42b ilustram para VMPR com concreto convencional mudanças na LN desde baixos níveis de carregamento.

De Nardin e El Debs (2009) comentam que essa mudança brusca de comportamento pode ser justificada pelo rompimento da interface entre o perfil de aço e o concreto. As autoras comentam que os conectores de cisalhamento soldados horizontalmente no perfil metálico não foram suficientes para promover o comportamento misto, com interação completa e desenvolvimento de apenas uma LN. No entanto, como visto para o elemento com concreto reciclado esse fenômeno só foi perceptível para o mais alto nível de força, indicando uma influência positiva do CARC-50 no estabelecimento do comportamento misto até 300 kN. Além disso, a única diferença entre os modelos é o tipo de concreto, assim leva-se a acreditar que a interface entre os materiais foi favorecida pelo ARC, induzindo a viga a apresentar um comportamento conjunto, em interação completa até próximo da ruptura.

**Figura 3.42 - Configuração da linha neutra na região de esforço cortante constante para VMPR com CARC-50 (a) e comparação com elemento revestido com concreto convencional (b)**



Fonte: Própria autora

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O programa experimental desenvolvido englobou uma caracterização dos materiais componentes do concreto e da viga metálica utilizada. A partir dos ensaios realizados foi constatado que o ARC utilizado possuía em sua composição, predominantemente, fragmentos constituídos de rocha em mais de 50% de seu volume total. Ao comparar o ARC com o agregado natural notou-se uma significativa diferença no teor de absorção de água, sendo superior ao natural. Essa diferença também é perceptível para a densidade, onde os resultados foram inferiores aos do agregado natural, coerente com a natureza mais leve e porosa do material reciclado.

Após essa etapa, uma análise preliminar foi realizada com o objeto de identificar as principais influências dos teores de substituição de agregado gráudo natural por ARC (0%,30%,50%, 100%) na trabalhabilidade da mistura e nas principais propriedades mecânicas do concreto resultante. A partir da escolha do teor de substituição igual a 50% para produção do concreto reciclado a ser utilizado na VMPR, o elemento estrutural foi instrumentado, seguindo o proposto em De Nardin e El Debs (2009).

Diante dos resultados obtidos, observou-se que a instrumentação tem potencial de redução, no que se refere principalmente à quantidade de extensômetros. As seções localizadas nos pontos de aplicação de carga não apresentaram resultados satisfatórios para análises, visto que a distribuição de tensões foi altamente influenciada por seu posicionamento, resultando em análises pouco representativas. Já para disposição dos transdutores, essa mostrou-se adequada diante das análises da evolução dos deslocamentos verticais e escorregamento entre o perfil de aço e a porção de concreto.

A concretagem da VMPR com CARC-50 foi feita em duas etapas, com duração de dois dias e caracterização dos concretos em cada um dos dias. Os resultados dos ensaios foram coerentes com os observados durante análise preliminar. Além disso, as propriedades mecânicas dos materiais aplicados nas VMPR com concreto reciclado ao serem comparadas com as da VMPR com concreto convencional, estudada em De Nardin e El Debs (2009), apresentaram-se próximas entre si, fortalecendo o aspecto comparativo do estudo. Adicionalmente, foram realizados ensaios de prismas para determinação da energia de fratura e ensaios de compressão para determinação de curva Tensão x Deformação, com o objetivo de calibrar o modelo numérico. Ao comparar o valor da energia de fratura a partir dos ensaios experimentais com o valor estimado pelo Model Code (CEB,1990), utilizado para previsão desse parâmetro durante análise numérica do elemento com concreto convencional, o valor

calculado analiticamente resultou em torno de 10 % inferior ao experimental, corroborando para indicar uma previsão satisfatória proposta pelo código normativo.

De modo geral, os resultados referentes ao comportamento estrutural da VMPR, panorama de fissuração, assim como às propriedades do CARC-50 foram similares aos obtidos para o elemento revestido com concreto convencional. O valor de força máxima atingido pelo elemento com concreto reciclado foi ligeiramente superior ao atingido pelo revestido com concreto convencional. Acredita-se que esse fenômeno pode ser justificado pela maior tensão de escoamento do perfil metálico adotado nesse estudo. Em relação à influência do concreto reciclado no comportamento misto, notou-se uma melhora no deslizamento entre o perfil de aço e o volume de concreto.

A configuração de VMPR estudada nesse trabalho, ainda não é contemplada pela ABNT NBR 8800 (2008). Desta forma, com o objetivo de estimar a capacidade resistente do elemento estrutural, através do cálculo do momento fletor resistente, foram analisados alguns métodos analíticos propostos na literatura. Dentre os quatro avaliados (KINDMANN; BERGMANN ,1993; ASSI; ABED; HUNAITI, 2002; DE NARDIN; EL DEBS, 2009; LIMAZIE; CHEN ,2015) o que melhor representou o comportamento da viga ensaiada experimentalmente foi o proposto em Assi, Abed e Hunaiti (2002), mas todos os demais apresentaram estimativas satisfatórias, com maior erro em torno de 11%.

Ao analisar as deformações desenvolvidas na VMPR, o trecho central apresentou alta semelhança com o elemento com concreto convencional. No entanto, na região de esforço cortante observou-se que a VMPR com CARC-50 se comportou em interação completa até altos níveis de carga aplicada, diferentemente do observado para VMPR com concreto convencional, o que pode ser interpretado como indicativo de benefício no estabelecimento da interação, proveniente do uso do ARC. Portanto, diante das limitações da investigação experimental realizada, foram obtidos resultados positivos para adoção do concreto de ARC com função estrutural e aplicação em VMPR.

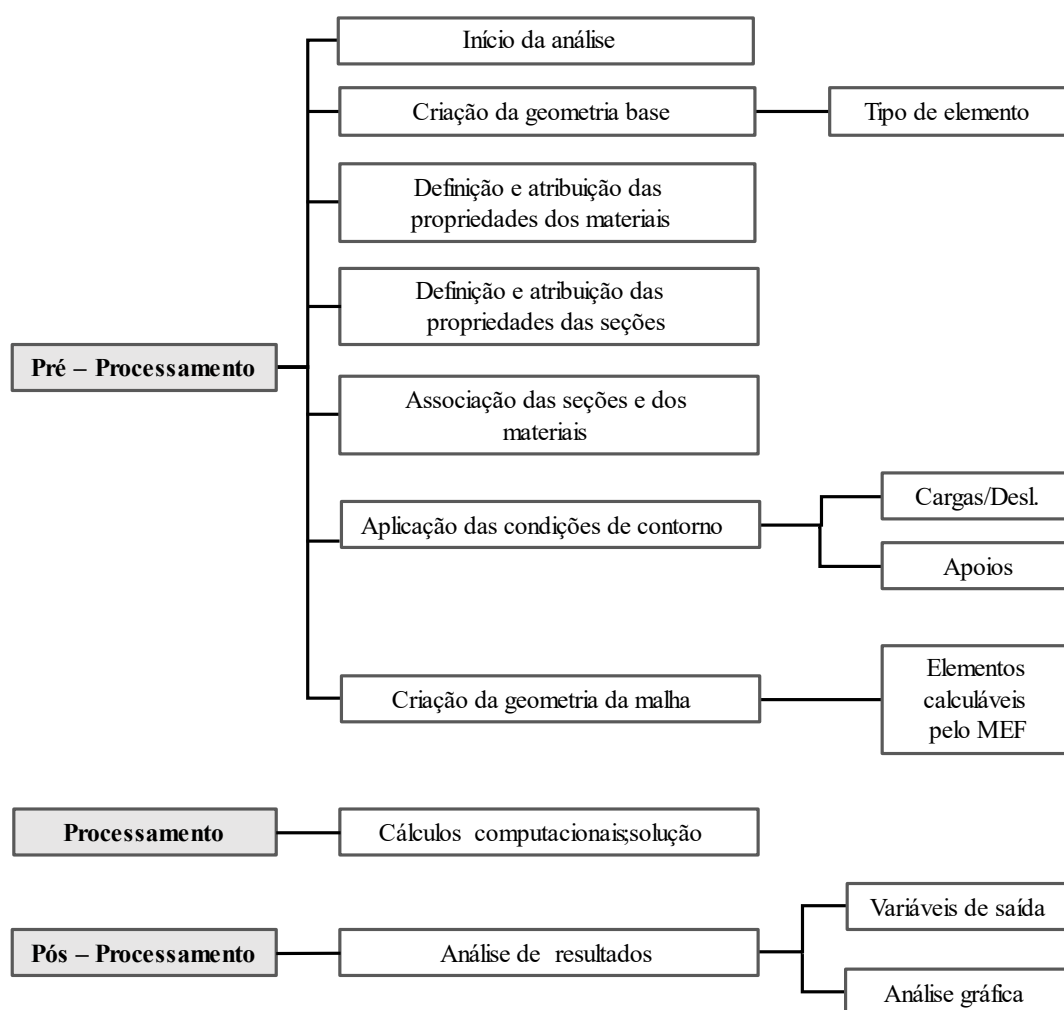


## 4 ANÁLISE NUMÉRICA

A simulação numérica proposta consiste no desenvolvimento de modelos em elementos finitos da VMPR com concreto convencional e concreto reciclado com objetivo de obter resultados representativos do seu comportamento quando submetidas à ensaios de flexão a quatro pontos.

As análises numéricas foram realizadas no software ABAQUS, versão 6.16, que configura um conjunto de programas poderosos para simulações em engenharia, baseados no método dos elementos finitos possibilitando a resolução de problemas desde análises lineares até as mais desafiadoras análises não lineares. A modelagem numérica pode ser dividida basicamente em três fases: o pré-processamento, o processamento e o pós-processamento. A descrição simplificada de cada uma delas na resolução de um problema está apresentada no fluxograma presente na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Fluxograma simplificado das fases da simulação no ABAQUS



Estes parâmetros de entrada serão discutidos nas próximas seções, assim como as estratégias de simplificação adotadas e o método de solução utilizado. Para padronizar as unidades utilizadas durante as simulações, considerou-se como unidades base para deslocamentos metros (m), e Pascal (Pa) para unidade de tensão.

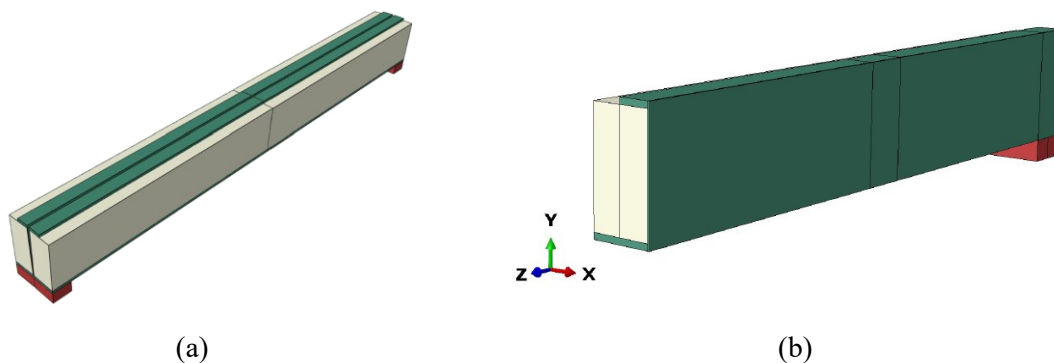
A análise numérica está subdividida em três etapas. A primeira constitui a elaboração e calibração do modelo numérico com os resultados obtidos por De Nardin e El Debs (2009) no que tange ao comportamento a flexão das VMPR com concreto convencional e conectores soldados na alma do perfil. A segunda etapa desta análise contempla a calibração da simulação numérica com os resultados obtidos em laboratório da VMPR com CARC-50. Por fim, apresenta-se uma análise paramétrica dos modelos elaborados com foco principal na influência das propriedades geométricas do perfil metálico no comportamento à flexão dos elementos estudados e também do tipo de concreto e tensão de escoamento do perfil de aço.

#### 4.1 GEOMETRIA E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para a representação da VMPR foi construído um modelo tridimensional com elementos sólidos, com consideração da dupla simetria, sendo simulado apenas  $\frac{1}{4}$  da viga, como apresentado na Figura 4.2. Esta abordagem permite reduzir o número de elementos finitos utilizados no modelo e conseqüentemente garantir um menor tempo de processamento. Com o objetivo de permitir uma melhor distribuição das tensões e se aproximar da configuração do ensaio experimental foi adotada a utilização de um sólido auxiliar com elevada rigidez e dimensões de 0,125m x 0,05m x 0,1m, para caracterizar a chapa de apoio.

As dimensões da viga foram simuladas de acordo com as características já apresentadas em De Nardin e El Debs (2009). Assim, o material aço foi atribuído aos volumes correspondentes ao perfil I assimétrico e o restante ao concreto. A viga 3D com destaque para as seções atribuídas (verde-aço; bege-concreto; vermelho-sólido auxiliar).

**Figura 4.2 - Geometria do modelo de VMPR (a) Viga completa (b)  $\frac{1}{4}$  do modelo de VMPR**

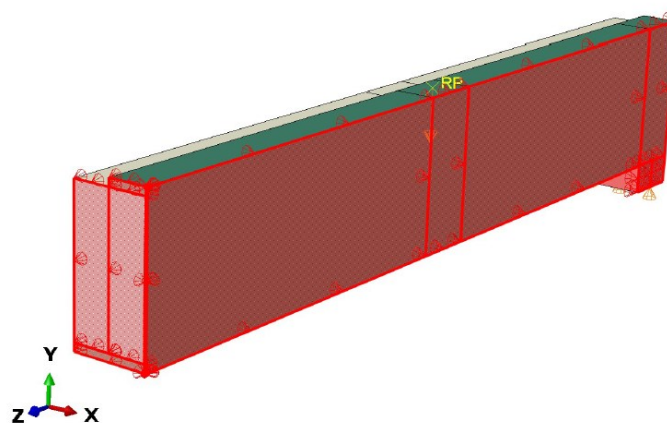


Fonte: Própria autora

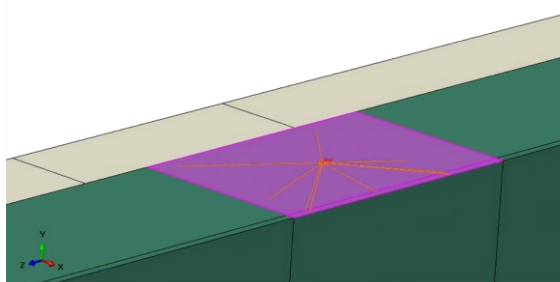
As condições de contorno foram adotadas referentes aos planos de simetria presentes na estrutura e aos apoios. Assim, foram aplicadas restrições de deslocamentos nas duas faces da viga em estudo, sendo a face da direita impedida de deslocar na direção x e a face posterior com deslocamentos restringidos na direção z (Figura 4.3a). No sólido auxiliar, representativo da chapa de apoio, restrições de deslocamento no eixo y foram aplicadas em nós gerados pela criação de uma linha auxiliar. Estes apoios foram simulados com uma distância de 0,05m de cada extremidade, respeitando o apresentado na configuração do programa experimental.

Para caracterizar as condições de carregamento optou-se pela aplicação de deslocamento para viabilizar a análise da estrutura em seu pico e pós-pico. O deslocamento foi aplicado em um ponto de referência associado à superfície do perfil de aço, representativa da área de aplicação de carregamento apresentada na investigação experimental (Figura 4.3b).

**Figura 4.3 - (a) Condições de simetria (b) Condição de acoplamento adotada**



(a)



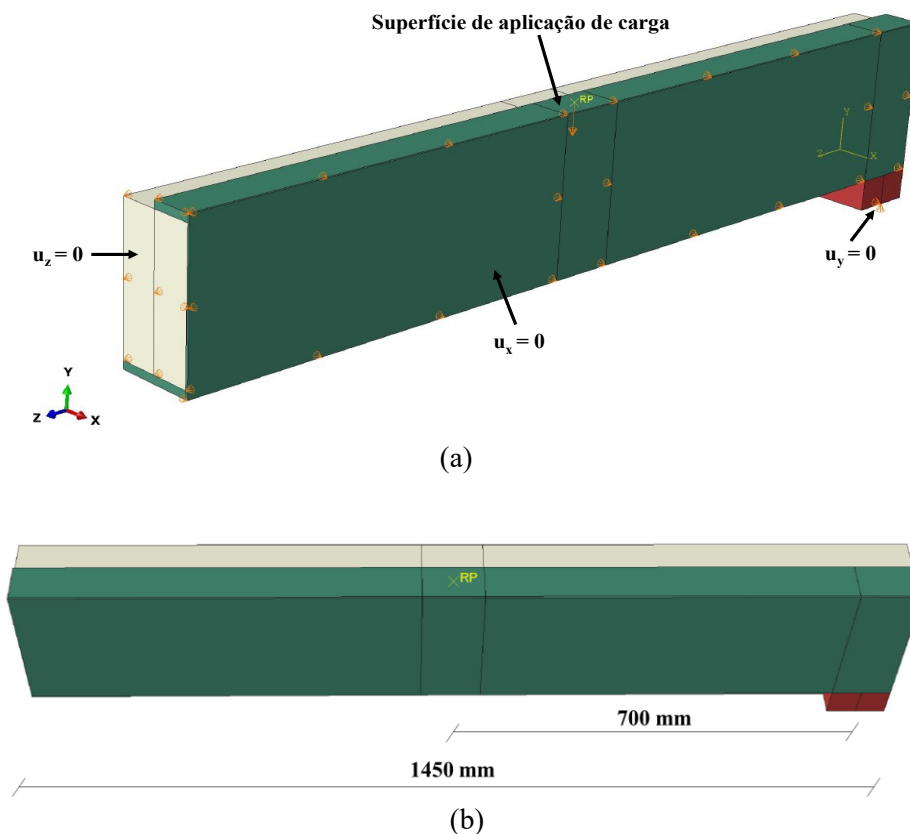
(b)

Fonte: Própria autora

A imposição de deslocamento foi realizada gerando uma reação contrária no ponto de aplicação, que pode ser medido em força. Para viabilizar a aquisição desse dado foi imposto o deslocamento em um ponto de referência (RP) e a este ponto foi acoplado a superfície de

aplicação de carga através da ferramenta *coupling* no módulo de interação do ABAQUS, do tipo *constraint*, assim o restante dos nós da base devem ser deslocados igualmente. Esta base foi considerada como uma superfície de dimensões 0,1 m x 0,065 m. Foram acoplados a este ponto os três graus de liberdade ( $u_1$ ,  $u_2$  e  $u_3$ ). Todas as condições de contorno e deslocamento presentes na estrutura estão ilustradas na Figura 4.4.

**Figura 4.4 - Condições de contorno e deslocamento aplicado (a) Indicação das condições (b) Comprimento e ponto de aplicação de carga**

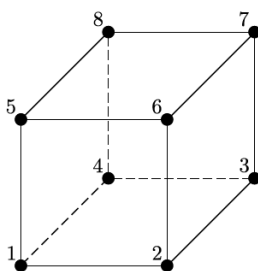


Fonte: Própria autora

## 4.2 MALHA

A geometria do modelo foi discretizada com elementos lineares tridimensionais do tipo *brick* com oito nós e integração reduzida (C3D8R), apresentados na Figura 4.5a. Outras opções de elementos sólidos foram avaliadas em uma análise preliminar, a exemplo de elementos com 20 nós e integração reduzida (C3D20R). Os resultados obtidos com esse tipo de elemento sólido chegaram a ter um tempo de processamento significativamente maior que os de 8 nós e as mudanças no comportamento da curva Força aplicada x Deslocamento no meio do vão não foram expressivas, por isso optou-se pelo C3D8R, que apresentou melhor custo computacional e resposta numérica satisfatória.

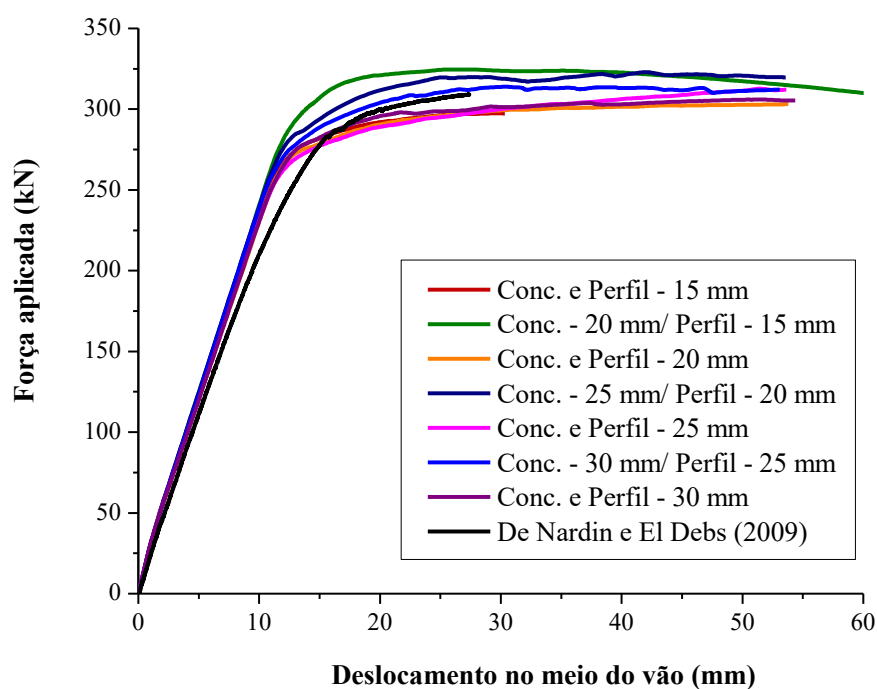
**Figura 4.5 - Elemento C3D8R**



Fonte: Adaptado de Systèmes (2017)

Testes de diversos tamanhos de malha foram realizados com intuito de melhor avaliar a sensibilidade do modelo a variação desse parâmetro, assim como fundamentar a escolha da discretização da malha em termos de melhor resposta numérica aliada ao custo computacional. A Figura 4.6 ilustra os testes realizados.

**Figura 4.6 – Curva Força aplicada x Deslocamento no meio do vão : Teste de sensibilidade da malha**



Fonte: Própria autora

Os modelos então foram avaliados a respeito dos valores de erro no que tange à força máxima e deslocamento máximo no meio do vão, assim como comparados o número de incrementos para convergência do modelo numérico. A Tabela 4.1 apresenta os testes realizados e resultados quantitativos. É importante comentar que o modelo com malha igual a 15 mm, para representação do perfil metálico e do concreto, demonstrou problemas de convergência na região de pico.

Tabela 4.1 - Testes de malha para calibração de modelo numérico

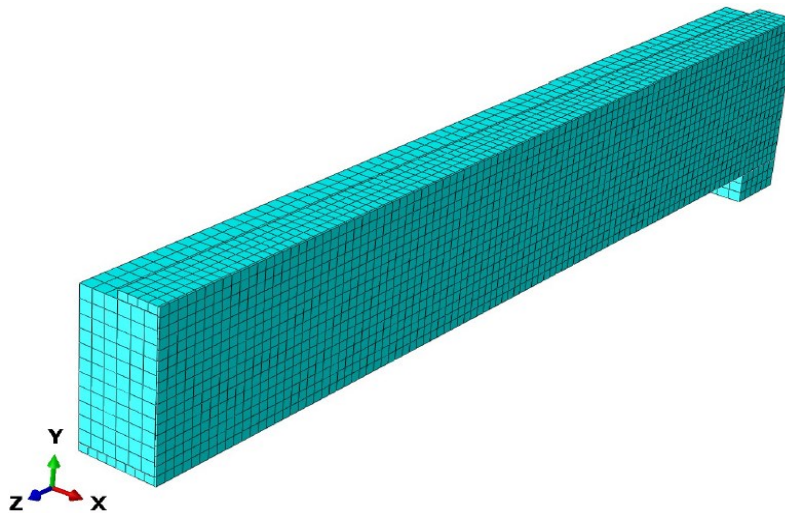
Malha (mm)	Concreto	Perfil	Quant. Incrementos	Força Máx. (kN)	Desl. (mm)	Erro Força	Erro Desl.
	15	15	1172	297,322	30,326	-3,810%	10,842%
20	15	587	324,610	26,733	5,018%	-2,291%	
20	20	956	303,068	53,591	-1,951%	95,875%	
25	20	630	322,974	42,109	4,489%	53,908%	
25	25	525	312,704	51,445	1,166%	88,030%	
30	25	673	313,944	30,475	1,567%	11,386%	
30	30	612	305,944	51,759	-1,021%	89,176%	

Modelo numérico com problemas de convergência

Fonte: Própria autora

Portanto, foi possível observar que a variação do tamanho da malha principalmente do perfil metálico apresentou influências significativas nas curvas obtidas, reiterando seu expressivo impacto na capacidade resistente do elemento misto e necessidade de uma discretização representativa. Assim, optou-se pela malha de tamanho aproximado global igual a 20 mm para a caracterização do concreto e do sólido auxiliar e tamanho igual a 15 mm para o perfil de aço, ilustrada na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Malha adotada no modelo numérico



Fonte: Própria autora

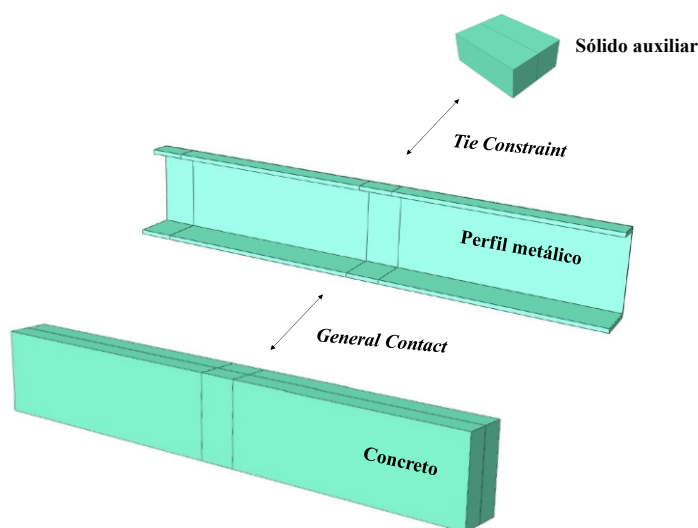
Essa apresentou resultados satisfatórios comparado aos experimentais, assim como bom desempenho computacional. A qualidade da malha foi verificada por meio do comando *verify mesh* não apresentando regiões identificadas como distorcidas, que pudessem ocasionar mal condicionamento da matriz. Foram gerados 12208 nós e 7673 elementos do tipo C3D8R.

### 4.3 CONTATO ENTRE OS COMPONENTES

A modelagem proposta não contempla a simulação dos conectores de cisalhamento. A caracterização da interface entre o perfil de aço e o concreto foi realizada com o intuito de representar as interações de contato entre os materiais considerando a influência dos conectores. Assim, a estratégia de simular a viga sem modelá-los em busca de resultados representativos do problema se justifica na complexidade inerente à simulação desses componentes, que refletem em custo computacional e eventuais problemas numéricos.

Dessa forma, a caracterização da interface foi implementada entre as superfícies por meio da ferramenta *general contact*. As propriedades de contato têm por objetivo caracterizar o comportamento normal e tangencial da interface. O comportamento normal foi definido como *hard contact* (contato rígido), não permitindo a separação das superfícies quando submetidas à tração. O contato rígido garante que a penetração entre as superfícies seja imperceptível. Para o comportamento tangencial foi adotado o modelo de fricção *penalty* (penalidade), que permite deslizamento entre as superfícies, caracterizado por meio de coeficientes de atritos representativos da interface. Já o contato entre o perfil de aço e o sólido auxiliar foi definido pela ferramenta *tie constraint*, na qual assegura que não haja deslizamento entre as superfícies. As interações adotadas estão ilustradas na Figura 4.8.

**Figura 4.8 - Interações de contato entre os componentes do modelo numérico**



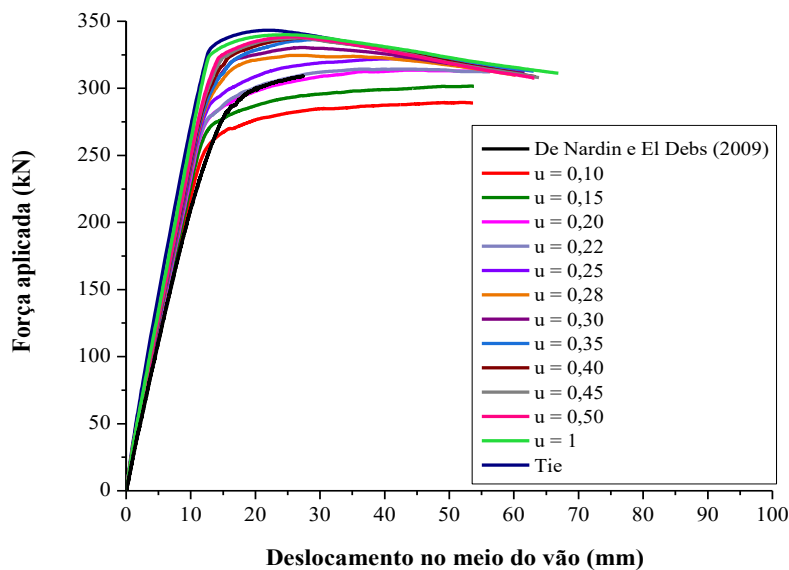
Fonte: Própria autora

Na literatura, diferentes estratégias são encontrados para caracterizar o contato entre as superfícies do perfil de aço e do concreto. Diante disso, foram avaliadas duas principais, a consideração da interação completa, com o *tie constraint*, representando aderência perfeita e a

consideração do *general contact* com as seguintes variações para o coeficiente de atrito: 0,1; 0,15; 0,2; 0,22; 0,25; 0,28; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 1.

Kochem e De Nardin (2020) comentam que embora alguns valores de coeficiente de atrito não tenham, a princípio, significado físico, tratam-se de artifícios matemáticos para tentar aproximar as representações do contato do modelo numérico com as condições experimentais. Os resultados de curva Força aplicada x Deslocamento no meio do vão estão apresentados na Figura 4.9 em comparação com o resultado experimental obtido em De Nardin e El Debs (2009).

**Figura 4.9 - Curva Força aplicada x Deslocamento no meio do vão : Teste de Contato**



Fonte: Própria autora

A partir da Figura 4.9 observa-se que a curva mais rígida foi proveniente da estratégia da interação completa, o que justifica o comportamento mais resistente visto que essa considera que não há deslizamento entre o perfil de aço e o elemento de concreto. No que tange à aplicação de diferentes coeficientes de atrito, observa-se que a rigidez da curva aumenta ao passo que o coeficiente de atrito também aumenta. A partir de uma primeira análise das curvas mais próximas dos resultados experimentais, foram posteriormente analisados resultados numéricos de força máxima e deslocamento máximo, apresentados na Tabela 4.2. Os melhores desempenhos foram obtidos para coeficientes de atrito iguais a 0,28 e 0,30. Assim, por apresentarem comportamentos próximos entre si, adotando como critério de escolha entre eles a menor porcentagem de erro obtida em termos de força máxima, a partir da avaliação quantitativa e qualitativa, além da análise do panorama de fissuração, o valor adotado para o coeficiente de atrito foi de 0,28.



Tabela 4.2 - Resultados de força máxima e deslocamento no meio do vão dos modelos numéricos

Carac. Contato	Força Máx. (kN)	Desl. meio do vão (mm)	De Nardin e El Debs (2009)		
			Erro - Força	Erro - Desl.	
<i>Tie Constraint</i>	343,316	21,783	11,07%	20,39%	
Coeficiente de Atrito ( $\mu$ )	0,1	289,492	-6,34%	90,33%	
	0,15	301,628	-2,42%	94,99%	
	0,20	313,572	1,45%	60,27%	
	0,22	314,448	1,73%	33,96%	
	0,25	322,172	4,23%	55,53%	
	0,28	324,61	5,02%	-2,29%	
	0,30	330,422	27,332	6,90%	-0,10%
	0,35	336,422	29,686	8,84%	8,50%
	0,40	337,494	27,397	9,19%	0,14%
	0,45	337,522	26,810	9,20%	-2,01%
	0,50	338,348	26,023	9,46%	-4,89%
1,00	339,93	24,720	9,97%	-9,65%	

Fonte: Própria autora

#### 4.4 MODELOS CONSTITUTIVOS

Existem diferentes estratégias para caracterizar o comportamento do aço e do concreto em simulações numéricas, conforme apresentado no Quadro 2.3. Nessa seção estão apresentadas as estratégias adotadas para representação numérica dos materiais, levando em consideração suas propriedades analisadas experimentalmente em De Nardin e El Debs (2009) e desenvolvidas durante este estudo. A Tabela 4.3 resume algumas propriedades medidas experimentalmente e que foram aplicadas durante a simulação. As demais foram estimadas com o intuito de melhor representar o comportamento observado.

Tabela 4.3 - Propriedade dos materiais analisados numericamente

Propriedade	Modelo concreto convencional De Nardin e EL Debs (2009)	Modelo concreto reciclado (CARC-50)
$f_{cm}$ (MPa)	35,7	35,37
$f_{tm}$ (MPa)	2,7	2,84
$f_{ym}$ (MPa)	308	318,5
$E_c$ (MPa)	32290	23992,3
$E_y$ (MPa)	200000	200000
$\epsilon_{cl}$	Estimado : 0,00212	0,00242
$G_f$ (N/mm)	Estimado : 0,0859	0,0954

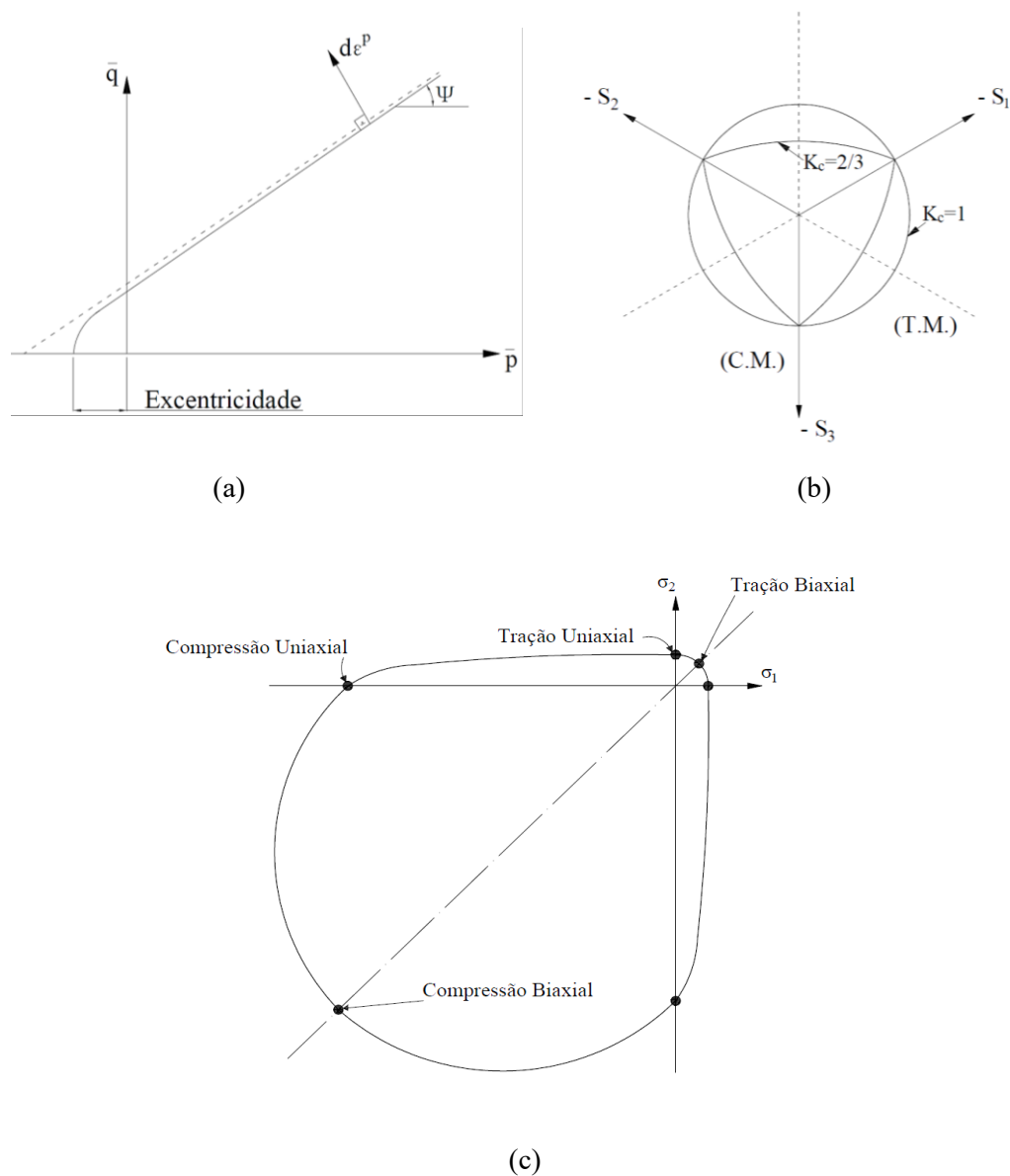
Fonte: Própria autora

#### 4.4.1 Concretos

A representação do comportamento não linear do concreto foi realizada por meio da adoção do modelo constitutivo que considera a plasticidade e o dano do material, o *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). Esse modelo foi proposto por Lubliner *et al.* (1989), mas apresenta modificações incorporadas por Lee e Fenves (1998). Na definição do CDP, adicionalmente ao módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), considerado igual a 0,2 para representar o concreto, são requeridos cinco parâmetros de entrada para caracterizar a plasticidade, além da descrição do comportamento do material à compressão e à tração. Os parâmetros estão ilustrados na Figura 4.10 e estão descritos a seguir:

- a. Ângulo de dilatância ( $\psi$ ) – Valor calculado no plano contendo tensão hidrostática equivalente (p) e tensão desviadora equivalente (q) a elevadas pressões de confinamento, comumente interpretado como o ângulo de atrito interno do concreto. Genikomsou e Polak (2015) apresentaram valores experimentais do ângulo de dilatância entre 31° a 42°.
- b. Excentricidade (e) – Esse parâmetro define a taxa a partir da qual a função plástica potencial se aproxima da assíntota (Figura 4.10a). Recomenda-se um valor padrão para excentricidade potencial de fluxo igual a 0,1 (SYSTÈMES, 2017).
- c. Viscosidade – O parâmetro de viscosidade implementado na formulação do CDP influi, sobretudo, na forma de distribuição e propagação do dano no concreto, dependendo da malha de elementos finitos (MICHAŁ; ANDRZEJ, 2015). Além disso, esse auxilia a contornar os problemas de convergência comumente presentes durante a degradação da rigidez na região do pós-pico do comportamento dos materiais (SYSTÈMES, 2017). Como pontuado por Reginato (2020), na literatura são encontrados valores de viscosidade na ordem de  $10^{-4}$  (MICHAŁ e ANDRZEJ, 2015),  $10^{-5}$  (SANTOS et al., 2019) e 0.002 (WOSATKO *et al.*, 2019).
- d. K – Definido como a razão entre as distâncias entre o eixo hidrostático e a idealização da hipótese de ruptura de Drucker-Prager (Figura 4.10b). O valor recomendado é de 2/3.
- e.  $f_{b0}/f_{c0}$  – Relação entre as tensões de escoamento biaxial e uniaxial do concreto à compressão (Figura 4.10c). O manual do ABAQUS (SYSTÈMES, 2017) especifica um valor padrão de 1,16 para essa relação.

**Figura 4.10 - Representação dos parâmetros do CDP (a) Excentricidade e ângulo de dilatação (b) Parâmetro  $K_c$  (c) Tensões de ruptura de compressão e tração biaxiais**



Fonte: Adaptado de SYSTÈMES (2017)

Portanto, um resumo dos parâmetros adotados no CDP está apresentado na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 - Parâmetros de entrada do CDP**

$\psi$	$e$	$f_{b0}/f_{c0}$	$k$	Viscosidade
$38^\circ$	0,1	1,16	0,6667	0,0001

Fonte: Própria autora

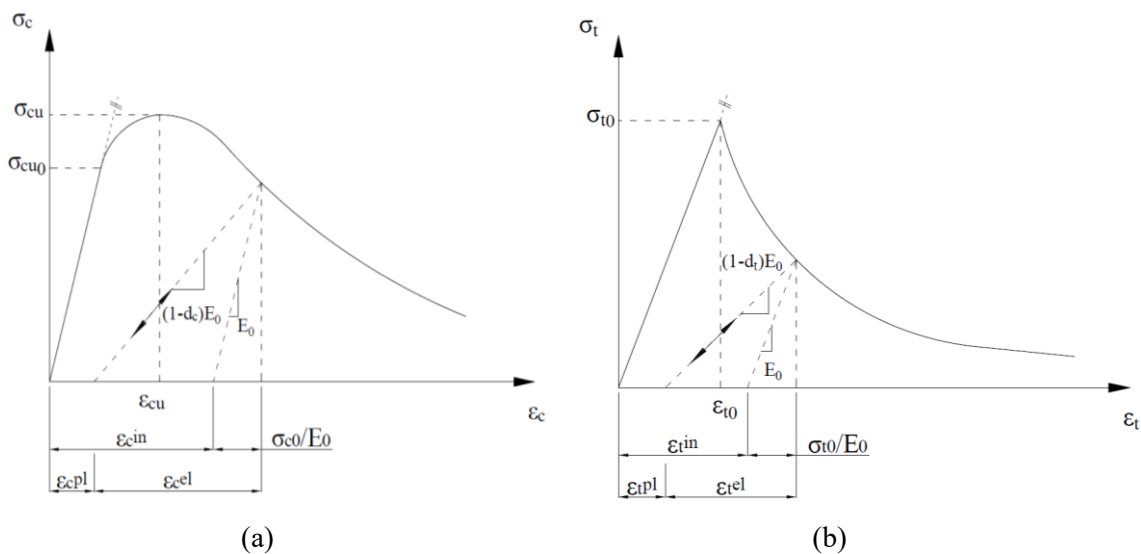
Além desses parâmetros, o concreto também deve ser caracterizado por meio de relações Tensão x Deformação inelástica uniaxial à tração e compressão e por meio de

relações Dano x Deformação inelástica uniaxial à tração e compressão, onde a deformação inelástica ( $\varepsilon_{c/t}^{in}$ ) pode ser definida como  $\varepsilon_{c/t}^{in} = \varepsilon_{c/t} - \varepsilon_{el}$ , com  $\varepsilon_{el} = \sigma_{c/t} / E_c$ .

O CDP assume que o comportamento do concreto à compressão e tração uniaxial é caracterizado genericamente conforme Figura 4.11. Assim, tratando-se de um carregamento monotônico de compressão (Figura 4.11a), o regime linear é definido até a tensão  $\sigma_{c0}$ , onde a partir do aparecimento de fissuras observa-se uma diminuição do módulo de elasticidade até alcançar a tensão última ( $\sigma_{cu}$ ), em uma curva de endurecimento. Após atingir a tensão de pico, ocorre uma redução dessa, caracterizando o abrandamento da curva.

No comportamento à tração (Figura 4.11b), o regime linear é definido até a tensão última ( $\sigma_{tu} = \sigma_{t0}$ ). Após ser atingida, com o aparecimento de fissuras, ocorre redução de tensão com o aumento das deformações, caracterizando também um abrandamento da curva. No que tange ao dano, considera-se que há uma degradação de rigidez associada ao nível de fissuração, assim  $d_{c/t}$  é a variável representativa do dano, variando de 0 (sem degradação) a 1 (degradação total).

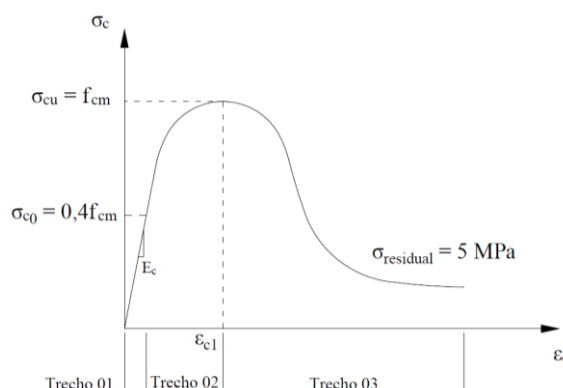
**Figura 4.11 - Resposta de ensaios uniaxiais do concreto (a) Compressão (b) Tração**



Fonte: SYSTÈMES (2017)

O comportamento Tensão x Deformação do concreto submetido à compressão pode ser estimado analiticamente por diversas relações e modelos presentes na literatura, mas que podem diferir significativamente de formulação. A curva Tensão x Deformação uniaxial do concreto à compressão foi aqui considerada composta por três trechos, conforme apresentado na Figura 4.12. O primeiro trecho é caracterizado por um regime linear com módulo de elasticidade secante  $E_c$  até a tensão  $\sigma_{c0}$ , sendo esta considerada como 40% da tensão última, de acordo com recomendação do Model Code (*fib*, 2013).

Figura 4.12 - Comportamento do concreto à compressão



Fonte: Adaptado de Reginato (2020)

O modelo escolhido foi o proposto por Carreira e Chu (1985). Esse utiliza apenas uma expressão para o comportamento dos trechos do diagrama e leva em consideração o módulo de elasticidade inicial do concreto ( $E_{ci}$ ), estimado pela formulação do Model Code (*fib*, 2013), de acordo com a Equação 4.1 e 4.2.

$$E_{ci} = E_c / \alpha_i \quad (4.1)$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2f_{cm}/88 \leq 1,0 \quad (4.2)$$

A deformação limite do concreto convencional ( $\epsilon_{c1}$ ), referente à tensão máxima ( $f_{cm}$ ) foi estimada de acordo com a formulação do Eurocode 2 (2004), apresentada na Equação 4.3.

$$\epsilon_{c1} = 0,7f_{cm}^{0,31} \leq 0,0028 \quad (4.3)$$

A partir desses valores, pode-se calcular o parâmetro do material,  $\beta$ , dependente da forma do diagrama e conforme proposto por Carreira e Chu (1985) calculado de acordo com a Equação 4.4. Consequentemente as tensões de compressão foram encontradas seguindo a Equação 4.5.

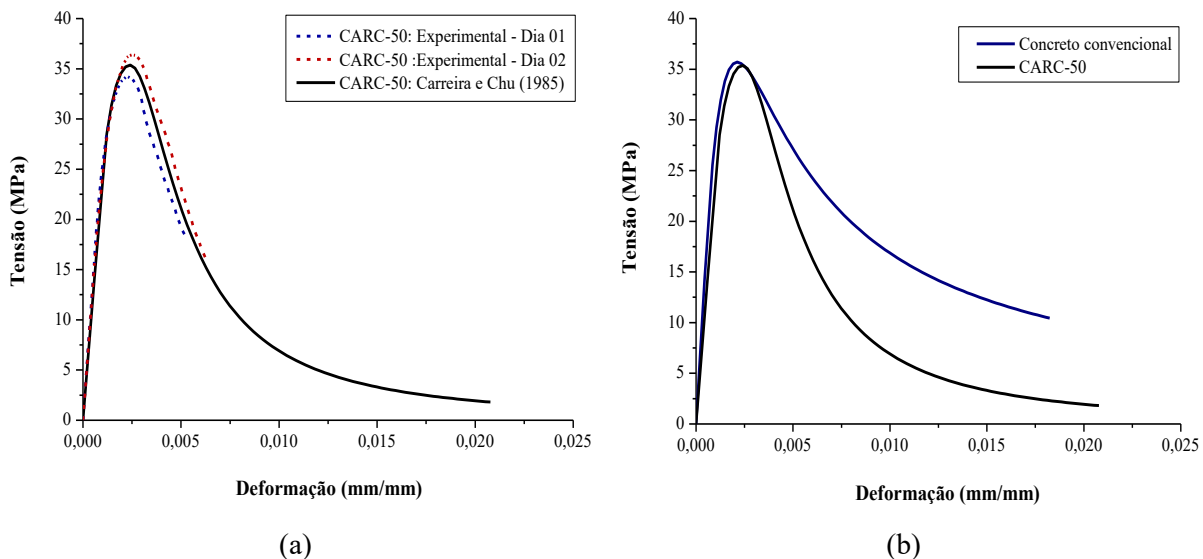
$$\beta = 1 / [1 - (f_{cm} / (\epsilon_{c1} E_{ci}))] \text{ para } \beta \geq 1 \text{ e } \epsilon \leq \epsilon_u \quad (4.4)$$

$$\sigma_c = f_{cm} \frac{\beta(\epsilon/\epsilon_{c1})}{\beta - 1 + (\epsilon/\epsilon_{c1})^\beta} \quad (4.5)$$

O comportamento do CARC-50 no modelo numérico foi simulado de forma análoga ao concreto convencional. Quando submetido à compressão, o diagrama proposto por Carreira

e Chu (1985) foi adotado com alteração do valor do  $\beta$  para melhor se adequar ao comportamento médio das curvas provenientes dos ensaios de corpos de prova realizados, conforme pontuado na seção 3.3.2. Esse valor foi ajustado com a divisão da curva em dois trechos, antes do pico com  $\beta$  igual a 1,95 e após o pico, equivalente a 2,87. O módulo de elasticidade, resistência à compressão e deformação última foram adotados como média das curvas investigadas, apresentadas na Figura 3.30b. Dessa forma, a Figura 4.13a ilustra as curvas Tensão x Deformação experimentais à compressão, assim como a adotada numericamente para caracterizar o CARC-50. Na Figura 4.13b estão apresentadas as curvas adotadas para os dois tipos de concreto.

**Figura 4.13 – Curvas Tensão x Deformação à compressão (a) CARC-50 (b) Adotadas numericamente para concreto convencional e CARC-50**



Fonte: Própria autora

O comportamento à tração do concreto foi caracterizado seguindo o modelo proposto por Genikomsou e Polak (2015), baseado em energia de fratura ( $G_F$ ). Reginato (2020) comenta que o comportamento do concreto então é caracterizado por um comportamento Tensão x Abertura de fissura ( $w$ ), onde, ao atingir a tensão última  $f_{tm}$  ( $w = 0$ ), começam a desenvolver fissuras, resultando na diminuição da tensão até o limite onde  $\sigma_t = 0$  e  $w = w_c$ , sendo  $w_c$  a abertura de fissura crítica. Como se deseja expressar a relação Tensão x Deformação, a abertura de fissura deve ser transformada em um parâmetro de deformação. Essa transformação pode ser realizada conforme Equação 4.6 (GENIKOMSOU E POLAK, 2015).

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{tu} + w/l_d \quad (4.6)$$

Sendo  $\varepsilon_{tu}$  a deformação na tensão última, igual a  $f_{tm}/E_c$ , e  $l_d$  o comprimento característico do elemento finito ou também chamado de largura de banda, onde, para elementos sólidos 3D, pode ser calculado pela raiz cúbica do volume do elemento, como apresentado por Genikomsou e Polak (2015). Assim, a formulação proposta para o cálculo da tensão de tração está apresentada na Equação 4.7.

$$\sigma_t(w) = f_{tm} \left(1 - \frac{2}{3} \frac{w}{w_1}\right) \text{ para } w \leq w_1; \quad \sigma_t(w) = f_{tm} \left(\frac{3}{7} - \frac{2}{21} \frac{w}{w_1}\right) \text{ para } w_1 < w \leq w_c \quad (4.7)$$

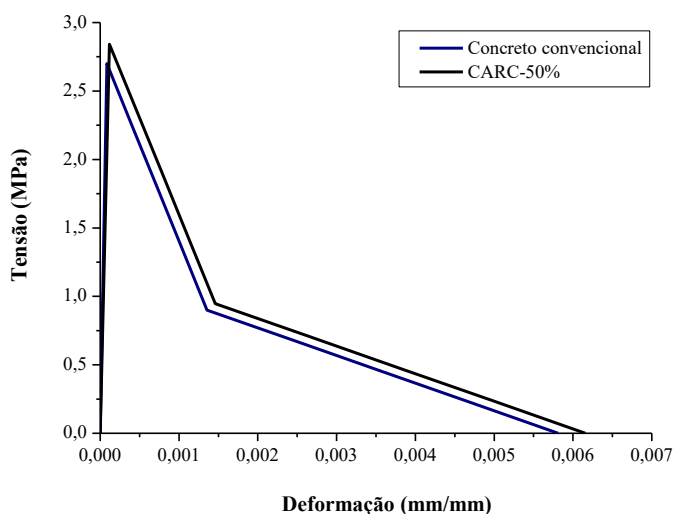
$$w_1 = 0.8G_f/f_{tm} \text{ e } w_c = 3.6 G_f/f_{tm}.$$

A energia de fratura foi calculada de acordo com a formulação do Model Code (CEB,1990), seguindo a Equação 4.8. De acordo com esta recomendação normativa,  $f_{cm0}$  é igual a 10 e o parâmetro  $G_{f0}$  depende do tamanho máximo do agregado (considerado igual a 19 mm), podendo ser obtido através de interpolação, a partir dos valores tabelados presentes no Model Code (CEB,1990). Foi avaliado a possibilidade de utilizar a formulação proposta no Model Code (fib, 2013), porém os melhores resultados dos modelos foram obtidos com a Equação 4.8, proveniente da versão anterior do mesmo documento científico.

$$G_F \text{ (N/mm)} = G_{f0} (f_{cm}/f_{cm0})^{0,7}, \text{ com } f_{cm} \text{ em MPa.} \quad (4.8)$$

Para o CARC-50 o comportamento à tração foi estimado com a mesma formulação utilizada para o concreto convencional. A única diferença na aplicação do modelo foi que a energia de fratura adotada foi a proveniente do ensaio de prisma realizado experimentalmente. A Figura 4.14 ilustra as curvas aplicadas para os dois concretos.

**Figura 4.14 - Gráfico Tensão x Deformação à tração adotadas para o concreto convencional e CARC-50**



Fonte: Própria autora

Os parâmetros de dano na compressão e tração, respectivamente, atuam reduzindo as rigidezes nas curvas Tensão x Deformação. Para a representação dessa relação Dano x Deformação inelástica, o modelo proposto por Birtel e Mark (2006) foi adotado para a compressão e o modelo de Yu *et al.* (2010) para a tração para os dois tipos de concreto. O modelo de Birtel e Mark (2006) reflete uma representação mais complexa do dano, seguindo a formulação apresentada na Equação 4.9. Já o modelo de Yu *et al.* (2010) apresenta uma abordagem mais simples, que consiste em subtrair da unidade a razão entre a tensão atuante no ramo pós-pico e a tensão resistente máxima, conforme apresentado na Equação 4.10.

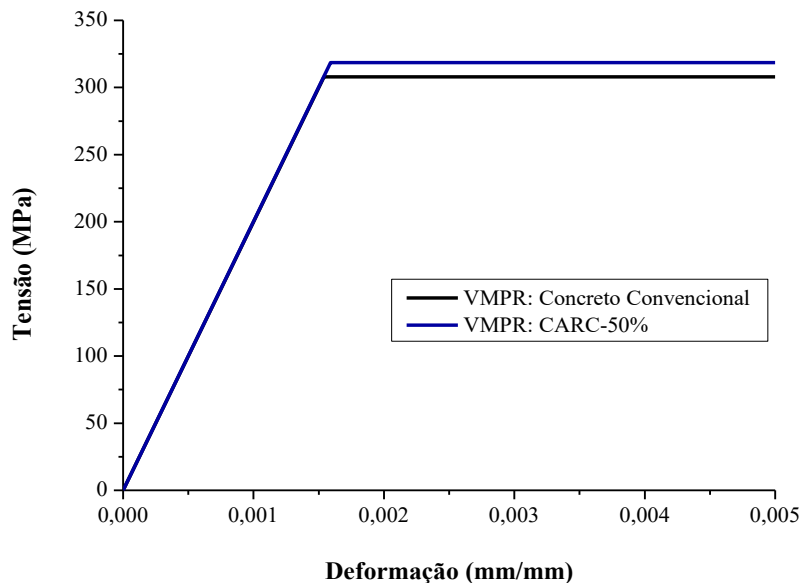
$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}}, \text{ sendo } \varepsilon_c^{pl} = b_c \varepsilon_c^{in} \text{ e } b_c = 0,7 \quad (4.9)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_{tm}}, \text{ para } \varepsilon_t \geq \varepsilon_{tu} \quad (4.10)$$

#### 4.4.2 Perfil de aço

Para representar o comportamento não linear do aço do perfil, o modelo constitutivo adotado foi o elasto-plástico perfeito. O diagrama Tensão x Deformação adotado para o aço está apresentado na Figura 4.15. Foi considerado coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) igual a 0,3 e resistência ao escoamento obtida nos ensaios de caracterização, iguais a 308 MPa para o modelo com concreto convencional de acordo com De Nardin e El Debs (2009) e 318,5 MPa para o modelo investigado experimentalmente revestido com CARC-50.

Figura 4.15 - Diagrama Tensão x Deformação dos perfis de aço



Fonte: Própria autora



#### 4.5 MÉTODO DE SOLUÇÃO

Nesse estudo foi utilizado o ABAQUS/Standard, sendo empregado o método de solução iterativo de Newton-Raphson. A solução para uma análise não linear é obtida especificando uma carga/deslocamento em função do tempo e o ABAQUS divide a simulação em tempos de incrementos e tenta encontrar a configuração de equilíbrio aproximada no final de cada incremento. Portanto, para cada análise é atribuído um histórico de tempo e para viabilizá-la o ABAQUS requer limites máximos e mínimos de incrementos e um incremento inicial que, ao longo da simulação, vai ajustando automaticamente o valor do incremento seguinte. No que se refere ao dado do tempo total de incrementação para a simulação, esse foi mantido igual a 1 segundo. O número máximo de incrementos foi limitado a 10000, com o incremento inicial de 0,01 e máximo definido como 0,1, o incremento mínimo escolhido foi igual a  $1E-15$ .

Na tentativa de encontrar uma solução em equilíbrio, podem ser calculadas várias iterações. Assim, se no final de cada iteração o modelo não estiver em equilíbrio, o ABAQUS realiza outra iteração. Caso se verifique que, durante o processo, as iterações divergem subsequentemente, o processo iterativo é encerrado e é executado um incremento de tempo menor. De acordo com SYSTÈMES (2017) em um problema não linear o ABAQUS/Standard compara a força residual para a iteração a um valor de tolerância. Se esta força for menor que a tolerância residual de força, o ABAQUS/Standard aceita a solução como estando em equilíbrio. Por *default*, este valor de tolerância é definido como 0,5% de uma força média da estrutura, calculada ao longo do passo de carregamento.

Porém, antes de aceitar a solução, ele também verifica se a última correção de deslocamento é pequena em relação ao deslocamento incremental total. Se for maior que uma fração (1% por *default*) do deslocamento incremental, o ABAQUS/Standard executa outra iteração. Ambas as verificações de convergência devem ser satisfeitas antes que se diga que uma solução convergiu para aquele incremento de tempo. Se a solução de uma iteração não for convergente, outra iteração é realizada para tentar equilibrar as forças internas e externas.

#### 4.6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados aqui apresentados são referentes à calibração do modelo com concreto convencional, a partir do comportamento pontuado em De Nardin e El Debs (2009) e para o concreto reciclado, conforme investigação experimental realizada. Os parâmetros principais adotados para validação dos modelos numéricos foram panorama final de fissuração e

comparação das curvas Força x Deslocamento no meio do vão. De modo geral, a Tabela 4.5 apresenta os valores de força última e deslocamento máximo no meio do vão resultantes dos modelos numéricos e experimentais. A comparação entre os valores para cálculo de erro foram realizadas relativo à força máxima, conforme  $(F_{\text{num}} - F_{\text{exp}})/F_{\text{exp}}$ . As diferenças entre os resultados estão em torno de 5%.

**Tabela 4.5 - Capacidade resistente das VMPR estudadas**

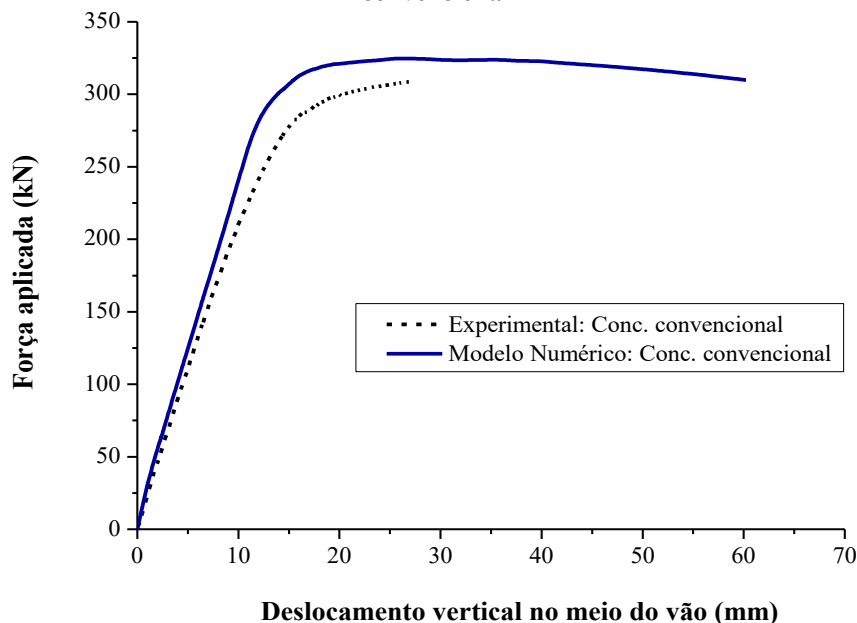
VMPR				
Tipo de revestimento	Resultados experimentais		Resultados numéricos	
	Força última (kN)	Desl. máx. (mm)	Força última (kN)	Desl. máx. (mm)
Concreto convencional	309,10	27,36	324,61 (+ 5,02%)	26,73 (- 2,29%)
CARC-50	325,46	32,98	341,30 (+ 4,64)	31,38 (- 4,85%)

Fonte: Própria autora

#### 4.6.1 VMPR com concreto convencional

A Figura 4.16 ilustra a curva Força aplicada x Deslocamento vertical no meio do vão simulada numericamente e obtida experimentalmente para a VMPR com concreto convencional. A partir do exposto, nota-se que o resultado numérico foi compatível com o experimental, com erro de força máxima em torno de 5%. As duas curvas se assemelham no trecho linear, estando quase sobrepostas até um nível de carga por volta de 10 kN.

**Figura 4.16 - Curva Força aplicada x Deslocamento vertical no meio do vão para VMPR com concreto convencional**

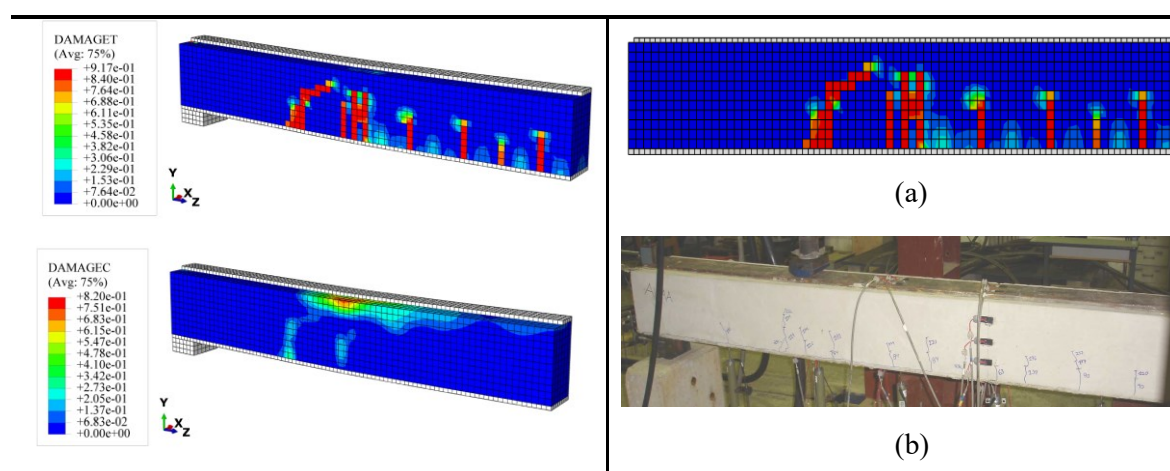


Fonte: Própria autora

O modelo numérico possui comportamento mais rígido que o experimental, porém em relação aos valores de força e deslocamento máximo, as estratégias de simulação adotadas apresentam-se coerentes com o observado. No tocante ao modo de falha, os planos de fissuração apresentados também foram similares entre si (Figura 4.17), caracterizados por fissuração do concreto, com início no meio do vão e propagação progressiva na direção dos apoios, analisado através da configuração do dano à tração no modelo numérico. Em relação ao dano à compressão, a região mais comprometida foi a próxima a área de aplicação de carga, em conformidade com o comportamento tradicional desses elementos estruturais.

Esse modo de falha é definido pela formação das primeiras fissuras aproximadamente verticais, na região central da viga se propagando à medida que há um aumento de força, em direção aos apoios, gerando as fissuras inclinadas. Esse panorama apresentou conformidade com a configuração da viga danificada resultante das análises numéricas realizadas.

**Figura 4.17 - Panorama principal de fissuração do modelo numérico e experimental de VMPR com concreto convencional (a) Modelo numérico (b) Modelo experimental**



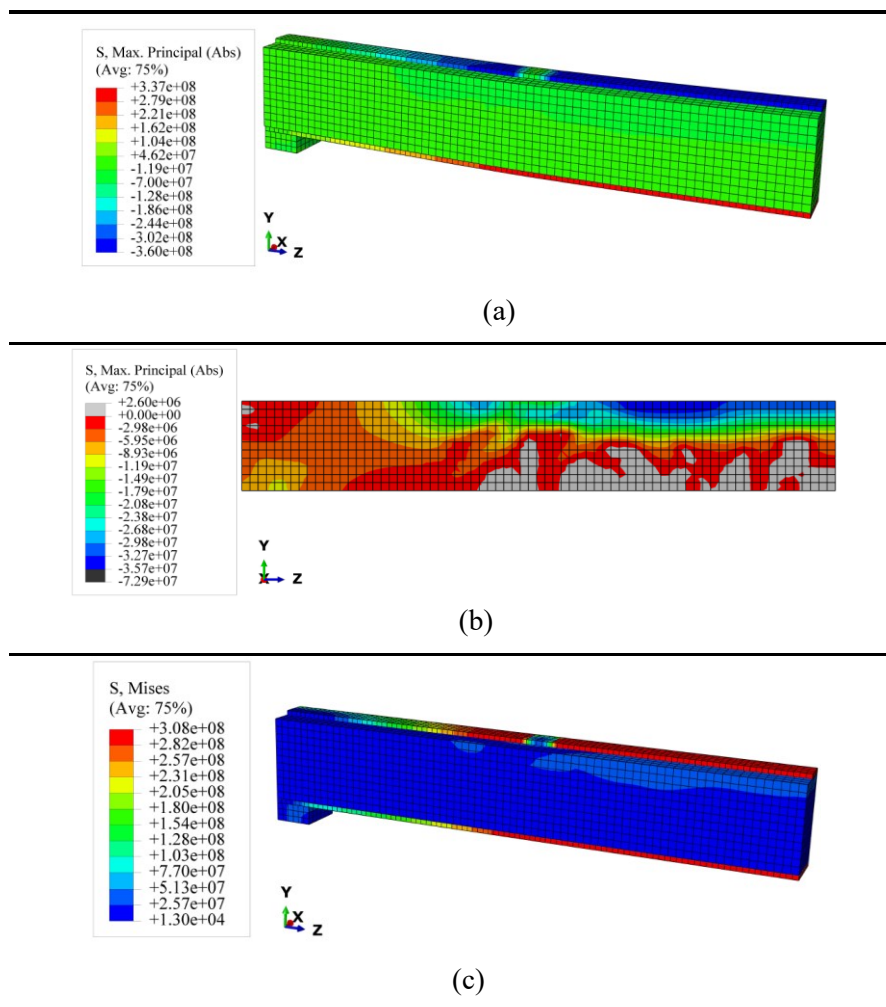
Fonte: Própria autora

A Figura 4.18a apresenta as principais distribuições de tensões provenientes do modelo numérico. Os valores máximos de tensões de compressão e tração foram desenvolvidas no perfil metálico, como esperado do elemento misto e também observado por meio da análise experimental. Ao analisar a tendência das tensões máximas separadamente no revestimento de concreto (Figura 4.18b), pode-se notar que a maior ordem de grandeza das tensões de compressão estão localizadas na área entre aplicação de carregamentos e são ligeiramente superiores à resistência à compressão do material, caracterizando um esmagamento do concreto nessa região.

No que tange às tensões de tração (hachuradas em cinza na Figura 4.18b), os valores máximos apresentados são praticamente iguais ao valor dessa propriedade mecânica do concreto, indicando um comportamento limite. O esmagamento do concreto observado na região comprimida, próximo da aplicação de carga é coerente com o esperado e relatado em De Nardin e El Debs (2009) que pontua a influência significativa do concreto na resistência à compressão da seção, o que reitera a representatividade da simulação numérica.

É importante destacar que apesar da não representação geométrica dos *stud bolts* o comportamento global da estrutural foi representativo ao analisar o comportamento estrutural do elemento submetido à flexão. Quando atingida a carga última, as mesas do perfil metálico já encontram-se em maior área com níveis de tensões que refletem plastificação, conforme Figura 4.18c. A análise das deformações do modelo experimental também indicam esse comportamento, caracterizando o escoamento e posterior plastificação do material.

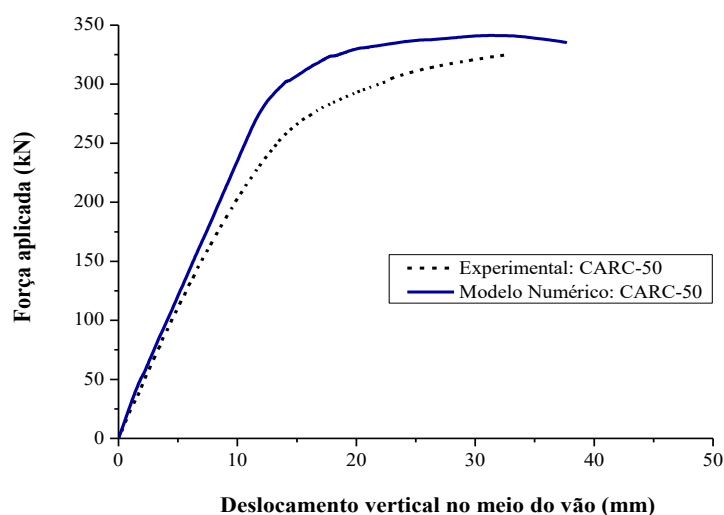
**Figura 4.18 - Distribuição de tensões do modelo numérico para VMPR com concreto convencional (a) VMPR com concreto convencional (b) Concreto (c) Perfil de aço**



#### 4.6.2 VMPR com CARC-50

Quanto a simulação da VMPR com concreto reciclado, a Figura 4.19 ilustra a comparação entre as curvas Força aplicada x Deslocamento no meio do vão para o modelo numérico e experimental. É possível identificar que para baixos níveis de carregamento aplicado o comportamento das curvas são similares, porém, para força em torno de 15 kN, as curvas começam a se diferenciar de forma mais notória. Observa-se que o modelo numérico apresenta comportamento mais rígido que o experimental, assim como observado para o concreto convencional, mas ambos conseguem captar de forma global a tendência da VMPR e seu comportamento estrutural quando submetida à flexão. Em termos quantitativos, comparando as forças últimas alcançadas, o modelo numérico também apresentou erro em torno de 5 %, sendo um bom representativo da capacidade resistente do elemento misto.

**Figura 4.19 - Curva Força aplicada x Deslocamento vertical no meio do vão para VMPR com CARC-50**

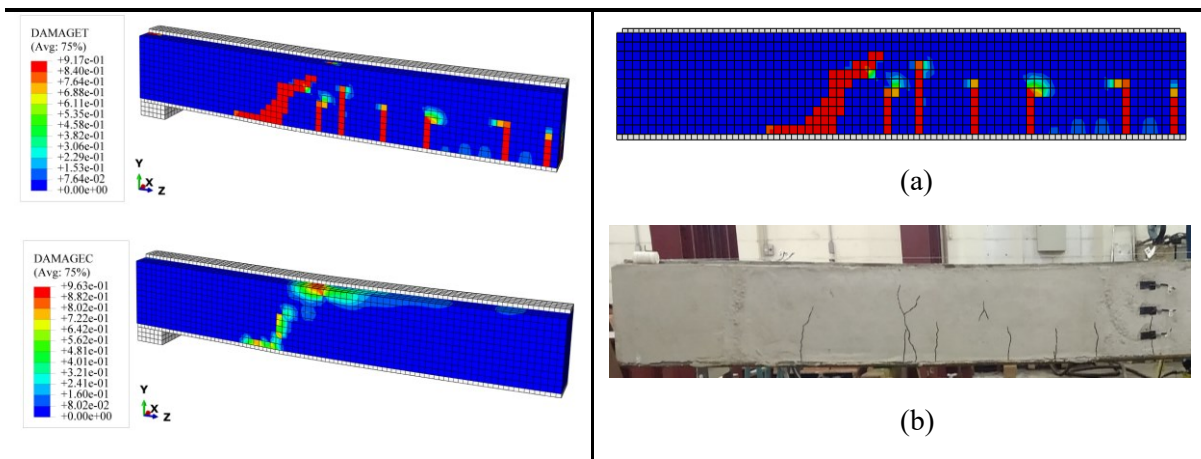


Fonte: Própria autora

Em relação ao panorama de fissuração, de forma análoga ao elemento com concreto convencional, a VMPR com concreto reciclado apresentou fissuras com início no trecho de momento fletor constante e com o aumento da aplicação de carregamento apresentou fissuras inclinadas nos trechos de esforço cortante constante, próximo aos apoios. A Figura 4.20 ilustra o panorama de fissuração apresentado pelo modelo numérico, com enfoque para o dano à tração e à compressão. O dano à tração apresenta-se mais acentuado, visto que o tipo de fissura foi mais significativamente acentuado por consequência do modo de ruptura dominante. Em relação ao dano à compressão, de forma análoga ao observado para o modelo com concreto convencional, concentrou-se entre as regiões de aplicação de carga.

Como pode-se observar, um padrão de fissuração ligeiramente mais danificado foi observado para o elemento com concreto reciclado, coerente com sua característica de menor rigidez em comparação ao concreto convencional, mas essa característica não apresentou influências relevantes na capacidade resistente global do elemento. Quanto ao dano à compressão, este se concentrou na região entre as aplicações de carga, como foi observado para o modelo com concreto convencional.

**Figura 4.20 - Panorama principal de fissuração do modelo numérico e experimental de VMPR com CARC-50 (a) Modelo numérico (b) Modelo experimental**



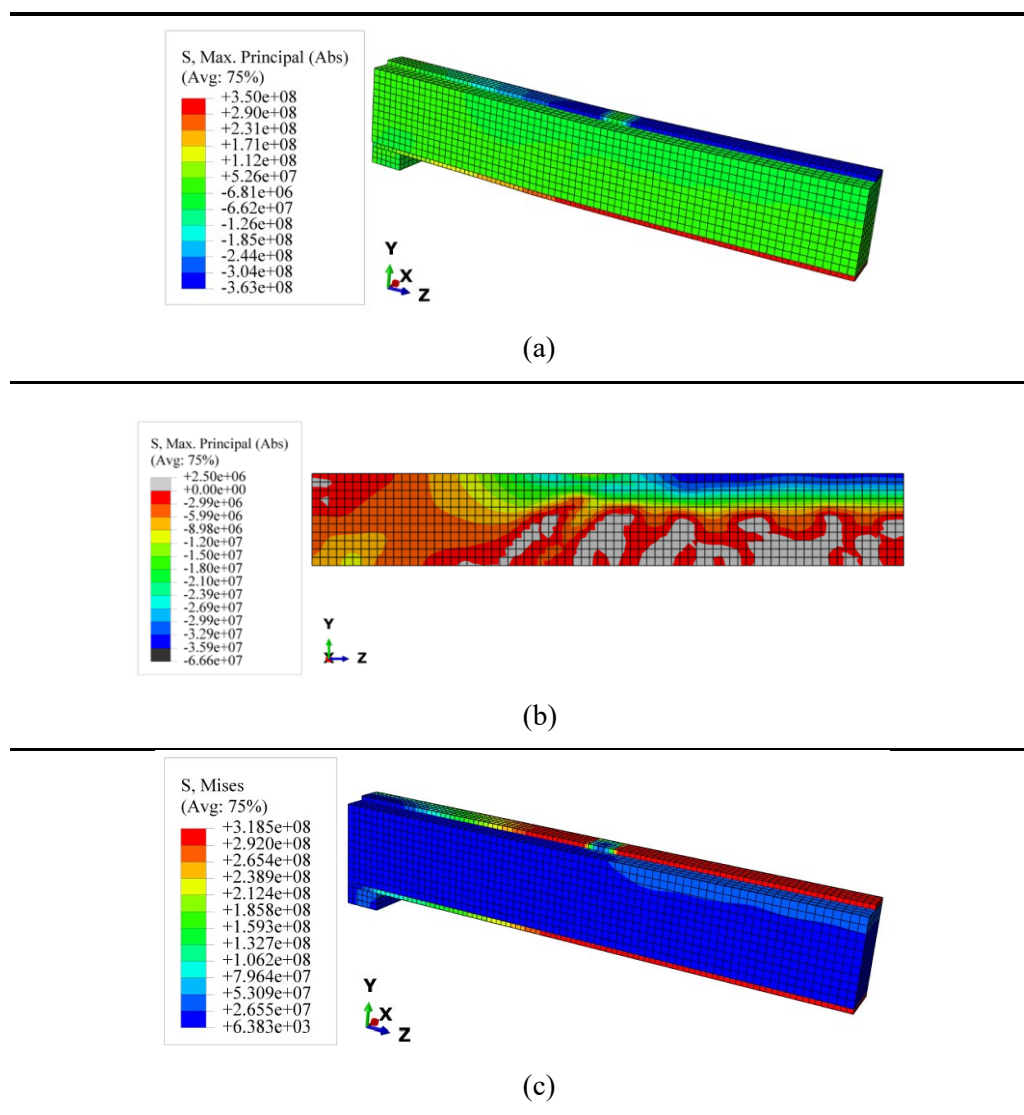
Fonte: Própria autora

As tensões principais do elemento modelado estão concentradas no perfil metálico (Figura 4.21a), com maior intensidade no trecho de momento fletor constante, diminuindo à medida que aproxima-se do apoio, coerente com o esperado a partir dos esforços solicitantes. Analisando isoladamente a distribuição de tensões no concreto, por meio da Figura 4.21b, pode-se notar uma distribuição de áreas tracionadas (hachuradas em cinza) em conformidade porém ligeiramente superior à observada na simulação do concreto convencional. Acredita-se que esse comportamento deve-se à natureza mais deformável do CARC-50.

As tensões de compressão, como esperado, concentram-se entre os pontos de aplicação de força, coerente com o dano à compressão analisado nesta região. É interessante pontuar que as tensões máximas apresentadas no modelo encontram-se próximas às resistentes provenientes dos ensaios mecânicos, reforçando uma situação limite de carregamento. A respeito da distribuição das tensões isoladamente no perfil de aço, observa-se que este indica plastificação na região mais solicitada, trecho de momento fletor constante, o que representa o ocorrido experimentalmente, a partir da análise das deformações na viga metálica ilustradas nas Figura 3.40a e Figura 3.41a. Perante o exposto, pode-se inferir

resultados positivos acerca das estratégias de modelagem numérica adotadas, assim como dos modelos constitutivos aplicados para representação de ambos os materiais componentes do elemento estrutural.

**Figura 4.21 - Distribuição de tensões do modelo numérico para VMPR com CARC-50 (a) VMPR com concreto CARC-50 (b) Concreto (c) Perfil de aço**



Fonte: Própria autora

#### 4.7 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Após realização de estudo comparativo entre o elementos estruturais de acordo com o tipo de revestimento, a fim de avaliar a influência de algumas propriedades na capacidade resistente da VMPR com CARC-50, foi desenvolvido um estudo paramétrico com variação de algumas características geométricas do perfil de aço e também com o tipo de concreto aplicado e tensão de escoamento do perfil de aço. O Quadro 4.1 apresenta os valores que

foram avaliados de acordo com o parâmetro em estudo. É importante notar estudo paramétrico foi realizado por meio de uma análise comparativa entre curvas Força aplicada x Deslocamento no meio do vão. O modelo adotado como de referência foi o modelo validado diante da investigação experimental desenvolvida neste estudo, caracterizado pela curva numérica apresentada na Figura 4.19.

**Quadro 4.1- Fatores avaliados durante análise paramétrica**

Parâmetros				
$t_w$ (mm)	$t_f$ (mm)	h (mm)	Tipo de concreto	$f_{yd}$ (MPa)
4,75	6,30	200	CREF-0	250
<b>Ref. : 6,30</b>	8,00	<b>Ref. : 250</b>	CARC-30	300
10,00	<b>Ref. : 12,50</b>	300	<b>Ref. : CARC-50</b>	<b>Ref. : 318,50</b>
12,50	16,00	400		345

Fonte: Própria autora

#### 4.7.1 Espessura da alma do perfil de aço

Esta análise foi realizada adotando valores de espessura comumente apresentados na literatura para chapas de aço finas e grossas a fim de compor um perfil soldado. Todas as outras propriedades foram mantidas constantes. Como esperado, as propriedades geométricas do perfil influenciaram de forma significativa na capacidade resistente do elemento misto, uma vez que este absorve grande parcela dos esforços solicitantes. É perceptível que este aumento de espessura refletiu diferenças relevantes na força última (Tabela 4.6), com acréscimo e decréscimo máximo em torno de 16% e 10%, respectivamente, em relação ao modelo numérico de referência.

**Tabela 4.6 - Comparação de força máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) conforme variação de  $t_w$**

Análise Paramétrica - $t_w$		
$t_w$ (mm)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$(F_{m\acute{a}x} - F_{ref})/F_{ref}$
4,75	285,22	-16,43%
10,00	363,54	+ 6,52%
12,5	375,47	+ 10,01%

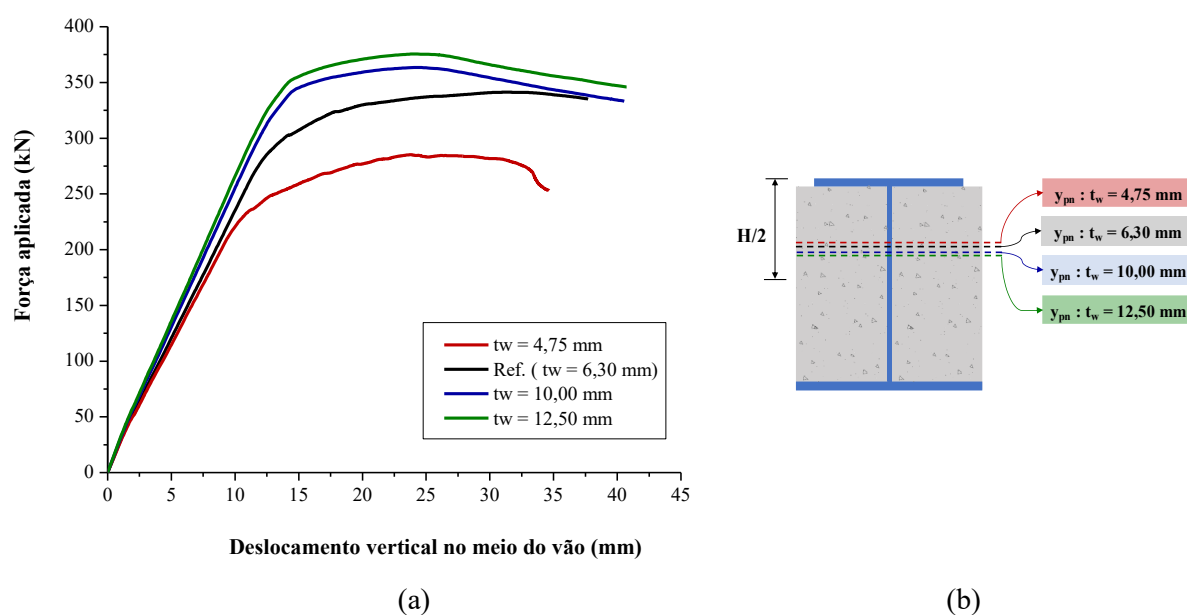
Fonte: Própria autora

A Figura 4.22 ilustra as curvas resultantes de cada modelo simulado e também a variação da posição da PNA (eixo neutro plástico) calculada de acordo com o modelo analítico proposto por Assi, Abed e Hunaiti (2002), visto que foi o que melhor se aproximou



do momento fletor atingido experimentalmente para VMPR com CARC-50. A análise do PNA foi realizada com o intuito de verificar como o equilíbrio das forças deu-se de acordo com a variação da espessura da alma do perfil metálico. Observa-se um ligeiro ganho de rigidez à medida que  $t_w$  foi aumentando. É interessante pontuar que com o aumento de  $t_w$  o PNA foi se aproximando do meio da seção transversal, indicando uma maior contribuição do concreto para resistir aos esforços de compressão. De modo geral, os PNA não apresentaram diferenças muito relevantes com variação desse parâmetro.

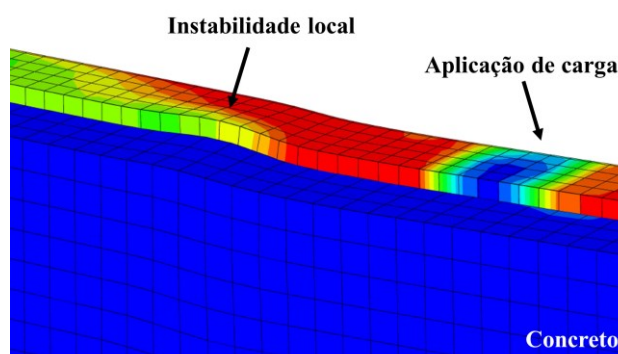
**Figura 4.22 - (a) Curvas de acordo com espessura da alma ( $t_w$ ) do perfil de aço (b) Posição do PNA conforme variação de  $t_w$**



Fonte: Própria autora

No tocante ao comportamento da curva proveniente do modelo numérico com  $t_w$  igual a 4,75 mm, observa-se no trecho pós-pico uma queda brusca de rigidez, ocasionada por uma instabilidade local concentrada na mesa superior do perfil metálico.

**Figura 4.23 – Instabilidade local observada na análise para  $t_w = 4,75$  mm**



Fonte: Própria autora

Como o escopo desse trabalho é o modo de ruptura por flexão, não existem dados suficientes para melhor justificar o fenômeno, porém acredita-se que este deu-se por conta da esbeltez do perfil de aço aliado ao nível de degradação do concreto, visto que dentre os modelos estudados apenas este apresentou tal comportamento e o fenômeno ocorre no trecho após alcance da força última, apresentando alto nível de fissuração do concreto na sessão analisada.

#### 4.7.2 Espessura das mesas do perfil de aço

Nesta análise avaliou-se três valores de espessura das mesas do perfil de aço, um abaixo e dois acima da espessura do modelo numérico de referência. É importante pontuar que tanto para a mesa inferior, quanto superior foram admitidas os mesmos valores de espessura. A Figura 4.24 ilustra as curvas provenientes da aplicação desses parâmetros. O aumento gradual dos valores adotados indicou um também aumento da rigidez das curvas resultantes, apontando uma maior capacidade resistente dos elementos estruturais, quanto maior a espessura das mesas, como pode ser observado na Tabela 4.7. Em comparação ao modelo de referência, observa-se uma queda mais brusca em relação ao decréscimo da espessura ao se comparar com o aumento gerado com a consideração de uma maior espessura das mesas do perfil metálico.

**Tabela 4.7 - Comparação de força máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) conforme variação de  $t_f$**

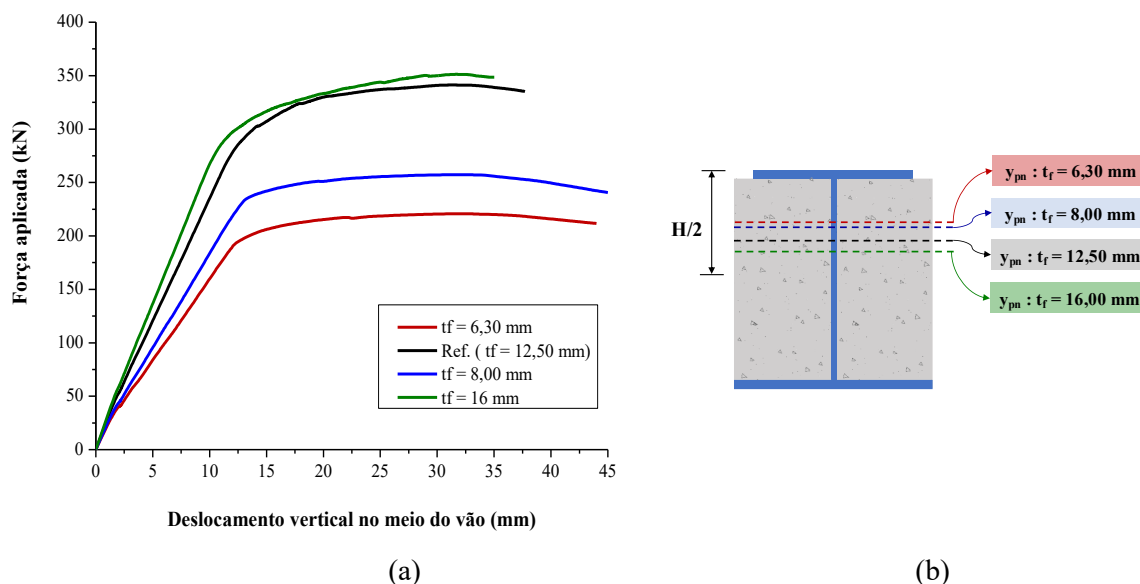
<b>Análise Paramétrica - <math>t_f</math></b>		
<b><math>t_f</math> (mm)</b>	<b><math>F_{m\acute{a}x}</math> (kN)</b>	<b><math>(F_{m\acute{a}x} - F_{ref})/F_{ref}</math></b>
6,30	220,82	- 35,30%
8,00	257,23	- 24,63%
16	351,26	+ 2,92%

Fonte: Própria autora

Este comportamento é coerente com o esperado diante do modelo analítico adotado, de forma análoga ao aplicado na seção 4.7.2, já que, conforme é observado pelas posições das linhas neutras plásticas (Figura 4.24b), com o aumento do valor de  $t_f$  há uma maior contribuição da parcela de concreto na resistência à compressão, a fim de contemplar o equilíbrio de forças na seção transversal. Em termos quantitativos, a diferença de força última foi mais significativa que a observada para as mudanças de espessura da alma do perfil de aço, com valor máximo em torno de 35%. Ao comparar a influência das duas espessuras no comportamento da curva, percebe-se um maior impacto proveniente da variação das

espessuras das mesas do perfil, que pode ser justificado a partir da sua contribuição para equilíbrio da seção transversal e posterior cálculo de força resistente.

**Figura 4.24 - (a) Curvas de acordo com espessura da alma ( $t_f$ ) do perfil de aço (b) Posição do PNA conforme variação de  $t_f$**



Fonte: Própria autora

### 4.7.3 Altura do perfil de aço

A variação da altura do perfil metálico apresenta grande influência na capacidade resistente do elemento estrutural estudado. A partir da Tabela 4.8 é notório que dentre os parâmetros geométricos aqui avaliados este foi o que mais influenciou na rigidez das curvas resultantes e nos valores de força última alcançados, com diferença máxima em torno de 73%, para altura igual a 400 mm, as demais apresentaram diferenças em torno de 20%.

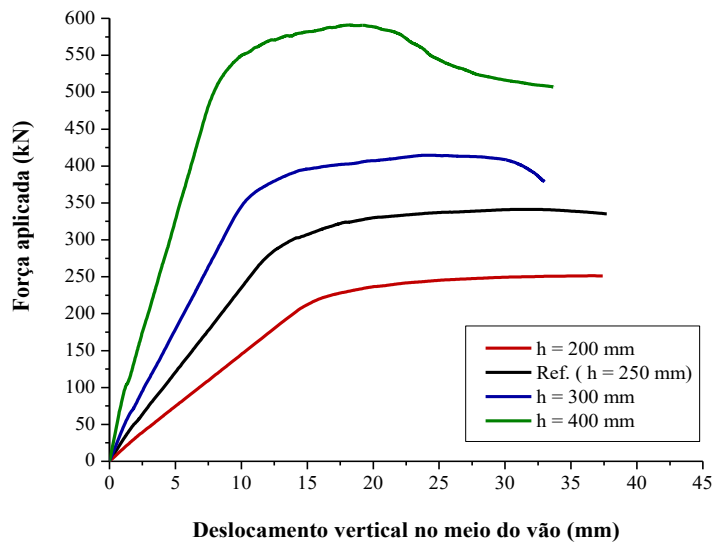
Esta curva resultante da maior altura adotada indicou uma instabilidade local no trecho pós-pico diferentemente dos demais modelos simulados, análoga a observada na Figura 4.23, apresentando alta danificação do concreto presente nessa região. Assim como pontuado anteriormente, mais estudos são necessários para melhor detalhar e justificar esse comportamento.

**Tabela 4.8 - Comparação de força máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) conforme variação de  $h$**

Análise Paramétrica - $h$		
$h$ (mm)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$(F_{m\acute{a}x} - F_{ref})/F_{ref}$
200,00	251,30	- 26,37%
300,00	414,61	+ 21,48%
400	591,10	+ 73,19%

Fonte: Própria autora

**Figura 4.25 - Curvas de acordo com a altura do perfil de aço (h)**



Fonte: Própria autora

#### 4.7.4 Tipo de concreto

Além do CARC-50, produzido e analisado neste trabalho para revestimento da viga mista, um estudo apresentado em Marques (2022) foi desenvolvido concomitantemente no mesmo grupo de pesquisa e analisou os traços CREF-0 e CARC-30, aplicados a pilares mistos parcialmente revestidos. Com o objetivo de parametrizar o tipo de concreto foram utilizadas a caracterização dos concretos presentes em Marques (2022), a partir das curvas Tensão x Deformação resultantes dos ensaios de compressão uniaxiais, assim como a energia de fratura calculada de acordo com cada traço, seguindo a mesma metodologia aqui aplicada para o CARC-50. Os modelos constitutivos usados em todos os modelos numéricos foram os mesmos adotados para o CARC-50 e a Tabela 4.9 resume as principais características mecânicas dos elementos analisados conforme tipo de concreto.

**Tabela 4.9 - Propriedades dos concretos estudados na análise paramétrica**

Propriedade	CREF-0	CARC-30	Ref. : CARC-50
$f_{cm}$ (MPa)	39,1	36,50	35,37
$f_{tm}$ (MPa)	3,36	3,11	2,84
$f_y$ (MPa)	318,50	318,50	318,50
$E_c$ (MPa)	24710,41	23488,49	23992,35
$E_y$ (MPa)	200000	200000	200000
$\epsilon_{c1}$	2,68 ‰	2,63 ‰	2,42 ‰
$G_f$ (N/mm)	0,0870	0,0681	0,0954

Fonte: Adaptado de Marques (2022)

A partir da Tabela 4.9 constata-se que as propriedades mecânicas dos três concretos em análise comparativa estão próximas entre si. Em equivalência das demais características observa-se que o tipo de concreto não apresentou influência significativa na capacidade resistente dos elementos simulados (Tabela 4.10) com diferenças inferiores a 2% em força máxima.

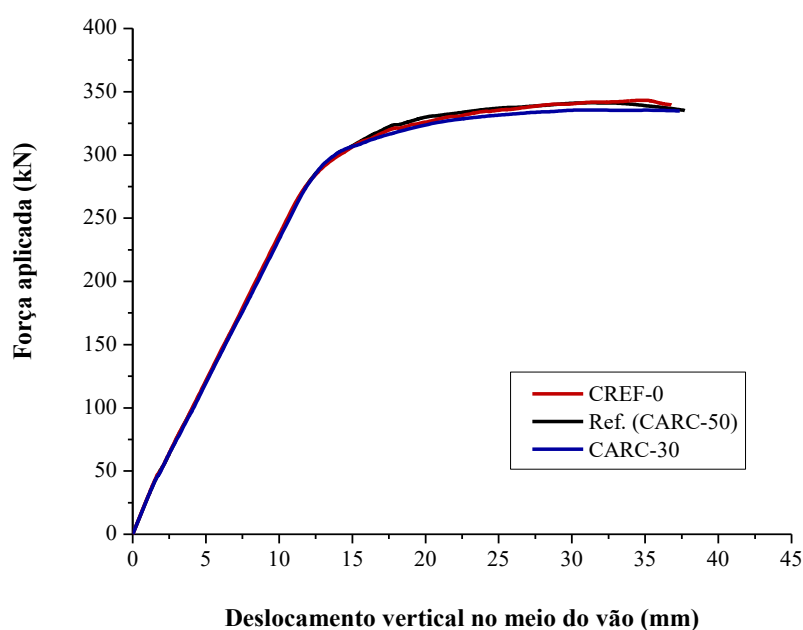
**Tabela 4.10 - Comparação de força máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) conforme variação do tipo de concreto**

Análise Paramétrica - Tipo de concreto		
Tipo de concreto	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$(F_{m\acute{a}x} - F_{ref})/F_{ref}$
CREF-0	343,26	+ 0,58%
CARC-30	335,50	-1,70%

Fonte: Própria autora

As curvas Força aplicada x Deslocamento no meio do vão para os três concretos estudados estão apresentadas na Figura 4.26. A influência do tipo de concreto na rigidez das curvas foi mínima, assim como observado em termos de capacidade resistente. Essa análise fortalece a viabilidade de utilização do concreto com agregados reciclados aliado a elementos de aço, alcançando uma eficiente e satisfatória capacidade resistente comparado ao elemento revestido com concreto produzido com agregados naturais.

**Figura 4.26 - Curvas de acordo com o tipo de concreto**



Fonte: Própria autora

#### 4.7.5 Tensão de escoamento do aço

Nesta etapa buscou-se analisar a influência da tensão de escoamento do perfil metálico,  $f_{yd}$ , na capacidade resistente dos elementos estudados. Foram analisados tensões iguais a 250 MPa, 300 MPa e 345 MPa, escolhidas conforme valores nominais mínimos apresentados no Anexo A da ABNT NBR 8800 (2008). Essa propriedade mecânica do aço influenciou os resultados de força última, como pontuado na Tabela 4.11, com diferença máxima em torno de 17%.

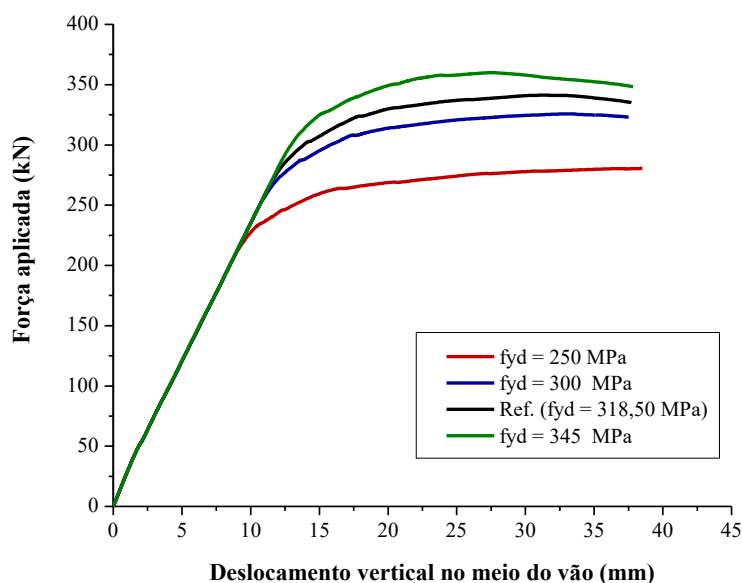
**Tabela 4.11 - Comparação de força máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) conforme variação da resistência do perfil de aço ( $f_{yd}$ )**

Análise Paramétrica - $f_{yd}$		
$f_{yd}$ (MPa)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$(F_{m\acute{a}x} - F_{ref})/F_{ref}$
250	280,49	-17,82%
300	341,30	-4,53%
345	409,37	5,46%

Fonte: Própria autora

A Figura 4.27 apresenta os gráficos Força aplicada x Deslocamento no meio do vão para os modelos simulados. É perceptível que a rigidez das curvas não apresentam variações expressivas e que as diferenças observadas dentre os comportamentos dos modelos estão presentes próximas às forças de pico e no trecho pós-pico. Nessas regiões o perfil metálico passa a assumir majoritariamente a resistência do elemento estrutural uma vez que o concreto já encontra-se com alto grau de danificação.

**Figura 4.27 - Curvas de acordo com a tensão de escoamento do perfil de aço**



Fonte: Própria autora

#### 4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante análise numérica, foram simulados modelos tridimensionais das VMPR. Relações constitutivas analíticas foram adotadas para representar o comportamento não linear dos concretos e o modelo elasto-plástico perfeito foi aplicado para representação do comportamento do perfil metálico. A interação entre o perfil de aço e o concreto foi estabelecida por meio da definição de propriedades de contato nas direções normal e tangencial. Essa estratégia de simulação não contou com a representação geométrica dos conectores de cisalhamento, gerando resultados satisfatórios com menor esforço computacional.

Inicialmente, foram realizadas análises de sensibilidade para definição da malha a ser adotada e do coeficiente de atrito para caracterizar o contato tangencial entre o perfil metálico e o volume de concreto. Posteriormente, foi realizada a calibração do modelo com concreto convencional, apresentado em De Nardin e EL Debs (2009). Conforme os resultados obtidos, acredita-se que a abordagem foi satisfatória, com plano de fissuração e força máxima similares às ensaiadas em laboratório. O erro em termos de força última encontra-se aproximadamente em 5%. Seguindo as abordagens adotadas para o modelo calibrado com concreto convencional partiu-se para calibração do modelo com concreto reciclado. Foram adotadas estratégias análogas às aplicadas para o modelo parcialmente revestido com concreto com agregados naturais.

As principais diferenças encontraram-se na representação do comportamento à compressão uniaxial do CARC-50, onde foi realizada a calibração da curva de Carreira e Chu (1985) a partir dos ensaios experimentais realizados, a fim de melhor representar o comportamento do material reciclado. A energia de fratura, estimada de acordo com o Model Code (CEB, 1990) para o concreto convencional, foi adotada para o concreto reciclado como resultado dos ensaios de flexão dos prismas, conforme seção 3.3.2. As curvas Força aplicada x Deslocamento no meio do vão apresentaram comportamentos próximos entre si, com diferença entre forças máximas do modelo numérico e experimental também por volta de 5%. Diante disso, considerou-se satisfatórias as estratégias adotadas para representar o comportamento estrutural das VMPR, com concreto convencional e reciclado.

Após a etapa de calibração dos modelos, uma análise paramétrica foi realizada. Foram avaliadas a influência de algumas propriedades geométricas do perfil de aço, do tipo de concreto e da tensão de escoamento do aço. A partir dos resultados numéricos, observou-se que a altura do perfil metálico, juntamente com a espessura das mesas da viga de aço, foram

os parâmetros que mais tiveram influência no comportamento da curva Força aplicada x Deslocamento no meio do vão. Com base na variação do tipo de concreto, onde foram avaliados os teores de substituição iguais a 0% , 30% e 50%, notou-se diferenças pouco relevantes no comportamento da curva. Diante disso, por meio da análise numérica foi possível a obtenção de resultados representativos dos modelos experimentais e também análises complementares, importantes para ampliar os estudos.



## 5 CONCLUSÕES

A destinação dos RCD é uma preocupação recorrente ao se analisar a quantidade desse material coletado anualmente, que majoritariamente não recebe o manejo adequado. Ao incorporar resíduos de concreto como agregado graúdo no desenvolvimento de novos concretos, compõe-se um material com cunho sustentável e potencial aplicação estrutural.

A abordagem de utilizar concreto de ARC em estruturas mistas de aço e concreto apresenta-se como uma forma de potencializar as vantagens dos materiais e minimizar suas desvantagens. Assim, esse trabalho teve como objetivo principal estudar o comportamento à flexão de VMPR com concreto de ARC. Para isso, foram realizadas etapas de revisão bibliográfica, análise experimental, análise numérica e um estudo paramétrico, com o intuito de investigar a influência de algumas propriedades geométricas do perfil metálico, tipo de concreto e tensão de escoamento do aço no comportamento estrutural do elemento.

A partir da revisão bibliográfica realizada, observou-se que o ARC possui natureza mais porosa e heterogênea comparado ao agregado natural. Foram percebidas análises divergentes acerca da influência do ARC nessas propriedades, o que reforça a contribuição do presente trabalho para ampliar os estudos desenvolvidos nesse âmbito científico. Ao analisar a influência do ARC no comportamento à flexão de vigas observou-se uma queda na rigidez dos elementos estruturais, aumento na deformabilidade, porém capacidades resistentes e planos de fissuração similares aos desenvolvidos em elementos de vigas tradicionais.

A segunda etapa da metodologia proposta foi a investigação experimental. Essa fase do estudo contou inicialmente com uma breve caracterização dos materiais, onde o ARC apresentou comportamento semelhante ao observado na revisão bibliográfica. Após caracterização dos materiais, foi desenvolvida uma análise preliminar dos teores de substituição do agregado graúdo natural por ARC, onde foram estudados teores de 0%, 30%, 50% e 100%. Os concretos produzidos foram avaliados com enfoque na trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade.

Como resultado, foi notório que o teor com menor desempenho nas propriedades avaliadas foi o de 100% de substituição, seguindo as tendências da literatura. Dentre os demais teores de substituição, o concreto produzido com agregados naturais apresentou o melhor desempenho, no entanto resultados similares foram alcançados com o reciclado produzidos com teores iguais a 30% e 50%. Desta forma, o teor de substituição de 50% foi escolhido para aplicação na VMPR, já que alcançou desempenhos mecânicos satisfatórios no quesito estrutural.

A realização do ensaio de flexão a quatro pontos constituiu a última fase do programa experimental. O comportamento da VMPR com CARC-50 foi similar ao apresentado pela VMPR com concreto convencional. As principais diferenças entre as vigas foram observadas no menor escorregamento medido no elemento com concreto reciclado, em conformidade com vertentes apresentadas durante revisão bibliográfica. Foi observado um maior deslocamento vertical da viga com CARC-50, mas esse pode ser justificado pela também maior capacidade resistente alcançada pelo modelo e maior deformabilidade do ARC, como pontuado durante revisão bibliográfica.

No que se refere ao panorama de fissuração desenvolvido, ambas as vigas apresentaram as primeiras fissuras na região central, entre carregamentos, e, com o decorrer da carga aplicada, essas fissuras foram se encaminhando para a região dos apoios. Os dois elementos apresentam ruptura por flexão. Assim, pode-se considerar mínimas as influências do concreto de ARC no comportamento à flexão do elemento estrutural. Ao analisar os métodos analíticos propostos para previsão do momento fletor resistente da viga, todos apresentaram resultados satisfatórios, com a melhor previsão proposta por Assi, Abed e Hunaiti (2002).

Após investigação experimental, foi desenvolvida uma análise numérica das VMPR, através do *software* ABAQUS. Foi adotada a não representação dos conectores de cisalhamento com o intuito de amenizar os problemas numéricos e modelar de forma simplificada a influência desses no comportamento misto da estrutura. Foram calibrados os modelos de VMPR com concreto convencional, apresentado em De Nardin e El Debs (2009), e com concreto reciclado, desenvolvido nesse trabalho. Resultados esperados foram obtidos para os dois modelos, com erro em força máxima em torno de 5%. Os modelos numéricos foram capazes de reproduzir de forma satisfatória o plano de fissuração e capacidade resistente dos elementos estruturais.

Após calibração dos modelos numéricos foram desenvolvidos estudos paramétricos a fim de investigar a influência dos parâmetros estudados no comportamento estrutural da VMPR com CARC-50. Foram avaliados a espessura da alma, espessura das mesas e altura do perfil metálico, assim como tipo de concreto e tensão de escoamento do aço. Dentre as propriedades geométricas do perfil avaliadas a que mais interferiu no comportamento da curva Força aplicada x Deslocamento no meio do vão foi a altura do perfil metálico, apresentando diferença máxima de força última em torno de 74%, ao comparar com o modelo de referência. Em relação ao tipo de concreto, foram simulados concretos com teores de 0% e 30% de substituição da parcela gráuda do agregado natural por ARC e esses tiveram pouca

interferência na capacidade resistente do elemento estrutural. Para a tensão de escoamento do aço as influências foram mais significativas apenas no trecho do pico e pós pico, com diferença máxima de força última por volta de 18%.

Perante considerações obtidas, acredita-se que os objetivos geral e específico desse trabalho foram atingidos. Constatou-se resultados coerentes com os observados na literatura, com pouca influência do ARC no comportamento à flexão das VMPR. Além disso, verificou-se que maiores influências na capacidade resistente do elemento foram provenientes da altura do perfil de aço. O teor de ARC do concreto implicou em diferenças pouco significativas no comportamento da curva Força aplicada x Deslocamento no meio do vão. Já a tensão de escoamento do aço influenciou principalmente na força máxima dos elementos analisados. Assim, este estudo possui caráter colaborativo para as análises acerca da viabilidade de aplicação do concreto reciclado em VMPR.

### 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de fomentar pesquisas no âmbito da aplicação do concreto de ARC em VMPR, ampliando as análises iniciadas nesse estudo e impulsionar o desenvolvimento científico, apresentam-se a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Ampliar investigação experimental com aplicação de armadura passiva no modelo físico;
- b) Ampliar análises experimentais de teores de substituição do agregado natural por ARC para produção de concretos a serem aplicados nas VMPR;
- c) Realização de ensaios de *push-out*, com o intuito de avaliar a interação entre os materiais e a influência do concreto reciclado no comportamento misto das vigas, com enfoque principal no cisalhamento longitudinal;
- d) Aperfeiçoar modelo numérico a partir da representação de mais tipos de concreto de ARC;
- e) Modelar numericamente os conectores de cisalhamento para comparar estratégias de simulação.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREU, A.; MIREN, E. Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 227-235, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: execução de camadas de pavimentação: procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6118:2014**. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6892-1**: Materiais metálicos — Ensaio de Tração - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: concreto de cimento Portland, preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522-2**: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 2: Módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16915**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16917**: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972**: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. São Paulo, Brasil. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em 25 jan. 2022.

AJDUKIEWICZ, A.B; KLISZCZEWICZ, A.T. Comparative Tests of Beams and Columns Made of Recycled Aggregate Concrete and Natural Aggregate Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 5, n. 2, p. 259-273, 2007.

ALBERTE, E. P. V.; HANDRO, J. B. Estado do conhecimento acerca de especificações técnicas e normativas para agregados reciclados de RCD. **Ambiente Construído [online]**. 2021, v. 21, n. 3, p. 305-320.

ALVA, G.M.S.; MALITE, M. Comportamento estrutural e dimensionamento de elementos mistos aço-concreto. **Caderno de Engenharia de Estruturas São Carlos**, v.7, n. 25, p. 51-84, 2005.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto com agregados reciclados. In: Instituto Brasileiro do Concreto. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1ª ed., São Paulo: Arte Interativa, 2011, v. 02, p. 1731-1768.

ASSI, I.M; ABED, S.M; HUNAITI, Y.M. Flexural strength of Composite Beams Partially Encased in Lightweight Concrete. **Journal of Applied Sciences**, v. 02, p. 320-323, 2002.

BODI, J. Experiência Brasileira com Entulho Reciclado na Pavimentação. In: Reciclagem na construção civil, alternativa econômica para a proteção ambiental, 29., São Paulo, 1997. **Anais...** São Paulo: Núcleo de Desenvolvimento de Pesquisas POLI /UPE, p. 56-63, 1997.

BORGHI, T. M. **Contribuição ao estudo do piso misto de pequena altura: análise numérica das tipologias**. 2020. 177p. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia Civil (Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

BIRTEL, V.; MARK, P. Parameterised Finite Element Modelling of RC Beam Shear Failure. **Anais...** ABABQUS USER'S CONFERENCE. 2006.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente, Resolução No 307 – Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>. Acesso em 10 jan. 2021.

BRASIL. **Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário

Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em 5 mar. 2021.

BUTLER, L.; WEST, J. S.; TIGHE, S. L. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 10, p. 1037-1049, 2011.

BUTLER, L.; WEST, J. S.; TIGHE, S. L. Effect of Recycled Concrete Aggregate Properties on Mixture Proportions of Structural Concrete. **Transportation Research Record**, n. 2290, p. 105-114, 2012.

BUTLER, L.; WEST, J. S.; TIGHE, S. L. Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1292-1301, 2013.

CARREIRA, D. J.; CHU, K. H. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. **ACI Journal**, v. 82(6), n. 6, p. 797-804, 1985.

CAVALCANTI, L. A. **Estudo teórico-experimental da contribuição da armadura para a capacidade resistente de vigas parcialmente revestidas**. 2010, 151p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 2010.

CAVALCANTI, L. A.; DE NARDIN, S. Análise experimental e comparativa da contribuição da armadura para a capacidade resistente de vigas parcialmente revestidas. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 13, n. 58, p. 99-114, 2011.

CHAVES, I. A. **Viga mista de aço e concreto constituída por perfil formado a frio preenchido**. 2009, 138f. Dissertação (Mestrado), Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

CHOI, W.G; YUN, H.D. Long-term deflection and flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate. **Materials & Design**, v. 51, p. 742-750, 2013.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB) – **CEB Model Code 1990**, 1990.

DE NARDIN, S.; EL DEBS, A. L. H. de C. Study of partially encased composite beams with innovative position of stud bolts. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 65, p. 342-350, 2009.

DE NARDIN, S.; EL DEBS, A. L. H. de C. State of the art of steel-concrete composite structures in Brazil. **Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers – Civil Engineering**, [s.l.], v. 166, n. 6, p.20-27, nov. 2013.

DERESA, S.T. *et al.* A review of experimental results on structural performance of reinforced recycled aggregate concrete beams and columns. **Advances in Structural Engineering**, v. 23, n. 15, p. 3351-3369, 2020.

ELGHAZOULI, A.Y.; TREADWAY. J. Inelastic behaviour of composite members under combined bending and axial loading. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 64, n. 09, p. 1008-1019, 2008.

ESTRUTURAS UFPR. **Estudo de estrutura composta por barras e cabos usando o**

**abaqus 6.12 student edition.** 2017. Disponível em <http://www.estruturas.ufpr.br/wpcontent/uploads/MEF/AulasAbaqus/Aula6-parte2.pdf>. Acesso em 23 jan. 2021.

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

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1994-1-1: Eurocode 4** - Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules for buildings. Brussels, Belgium, 118 p, 2004.

ETXEBERRIA, M. VÁSQUEZ, E. MARÍ, A. BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregate and production processo on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 735-742, 2007.

FERREIRA, L.; DE BRITO, J.; BARRA, M. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. **Magazine of Concrete Research**, v. 63, n. 8, p. 617-627, 2011.

GENIKOMSOU, A. S.; POLAK, M. A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 98, p. 38-48, 2015.

GERIN, M. T. **Comportamento de pilares mistos preenchidos com concreto de resíduos de concreto submetidos a compressão axial centrada: efeito do teor de substituição e da forma de aplicação da força.** 2020. 151p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

GERIN, M. T.; SALES, A.; DE NARDIN, S. Mechanical and Physical properties of recycled aggregate concrete. **Revista Tecnológica**, v. 29, n.1, p. 259-274, 2020.

GHORBEL, E.; WARDEH, G. e FARES, H. Mechanical and fracture properties of recycled aggregate concrete in design codes and empirical models. **Structural Concrete**, v. 20, p. 2156- 2170, 2019.

GONZÁLEZ-TABOADA, I.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; CARRO-LÓPEZ, D. Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis. **Materiales de Construcción**, v. 66 [323], July-Sep-2016.

HAMAD, B.S. *et al.* Studies of the effect of recycled aggregates on flexural, shear, and bond splitting beam structural behavior. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, 2018.

HEGGER, J.; GORALSKI, C. Structural Behavior of Partially Concrete Encased Composite Sections with High Strength Concrete. **In: Proceedings of 5th International Conference in Composite Construction in Steel and Concrete**, p. 346-355, Mpumalanga, South Africa, 2006.

HOSSER, D.; DORN, T.; EL-NESR, O. Experimental and Numerical Studies of Composite Beams Exposed to Fire. **Journal of Structural Engineering**, v. 120, n. 10, p. 2871-2892, 1994.



IGNJATOVIĆ, I.S; MARINKOVIĆ, S.B; MIŠKOVIĆ, Z.M e SAVIĆ, A.R. Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams under short-term loading. **Materials and Structures**, v. 46, n. 6, p. 1045-1059, 2013.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE (*fib*). **Model Code for concrete structures 2010**. Fédération International du Béton, Lausanne, Switzerland. 2013.

JIA, Y. D. *et al.* Experimental Research on Behavior of Composite Beams of Steel-Reinforced Recycled Concrete Experimental Research on Behavior of Composite Beams of Steel-Reinforced Recycled Concrete. **Advanced Materials Research**, v. 639–640, p.145–148, 2013.

JIANG, Y. *et al.* Experimental study and theoretical analysis of partially encased continuous composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 117, p. 152-160, 2016.

KINDMANN, R.; BERGMANN, R. Effect of Reinforced Concrete Between the Flanges of the Steel Profile of Partially Encased Composite Beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v.27, p.107-122, 1993.

KOCHEM, R. F. F.; DE NARDIN, S. Numerical model of beam-to-column composite connection between slim floor system and composite column. **Rev. IBRACON Estrut.**, v.13, n.2, p. 348-379,2020.

KODAIRA, A. *et al.* Fire Resistance of Composite Beams Composed of Rolled Steel Profile Concreted Between Flanges. **Fire Science and Technology**, v. 23, n. 03, p. 192-206, 2004.

KOTINDA, T. I. **Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas: ênfase ao estudo da interface laje-viga**. 2006. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

KUSTER JUNIOR, J. S. **Avaliação da incorporação de agregado reciclado na composição de concretos autoadensáveis**. São Carlos, 2018. Dissertação (Mestrado em estruturas e construção civil). Universidade Federal de São Carlos, 2018.

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.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Porto Alegre, 2001. Tese (Doutorado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. **Reciclagem do Entulho de Construção Civil para Utilização como Agregado de Argamassas e Concretos**. São Paulo, 1997. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. São Paulo, 2002.

LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, p. 36-44,2008.

- LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in China. Part II. Structural behaviour of recycled aggregate concrete and engineering applications. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, p. 107-112, 2009.
- LI, W. *et al.* Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches. **Constr. Build. Mater.**, v. 35, p.1045–1055, 2012.
- LI, W. *et al.* Structural Behaviour of Composite Members with Recycled Aggregate Concrete — An Overview. **Advances in Structural Engineering**, v.18(6), p. 919-938, 2015.
- LIMAZIE, T; CHEN, S. Numerical procedure for nonlinear behavior analysis of composite slim floor beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 106, p. 209-219, 2015.
- LIU, C. *et al.* Experiment study on bond slip behavior between section steel and RAC in SRRC structures. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 104-114, 2018.
- LIU, C. *et al.* Numerical Study of Bond Slip between Section Steel and Recycled Aggregate Concrete with Full Replacement Ratio. **Applied Sciences**, v. 10, n. 3, 2020.
- LUBLINER, J. *et al.* A plastic-damage model for concrete. **International Journal of Solids and Structures**, v. 25, n. 3, p. 299–326, 1989.
- MALITE, M. **Sobre o comportamento estrutural de vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis de chapa dobrada**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.
- MARQUES, B. B. **Estudo experimental e numérico de pilares mistos parcialmente revestidos com concreto de resíduos reciclados de concreto e reforço de fibras de aço**. 2022. 213 p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia de Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.
- MICHAŁ, S.; ANDRZEJ, W. Calibration of the CDP model parameters in Abaqus. In: **The 2015 world congress on advances in structural engineering and mechanics (asem15)**. 2015.
- MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, v.9, n.1, 2009.
- NAKAMURA, S.; NARITA, N. Bending and shear strengths of partially encased composite I-girders, **Journal of Constructional Steel Research**, v. 59, p. 1435–1453, 2003.
- PATHIRANA, S. W. *et al.* Flexural behaviour of composite steel–concrete beams utilising blind bolt shear connectors. **Engineering Structures**, v. 114, p. 181- 194, 2016.
- PEREIRA, M. F. **Análise experimental e numérica de pilares mistos parcialmente revestidos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- PETRAUSKI, M. C. **Simulação numérica do comportamento de vigas mistas de aço e concreto com conectores CRESTBOND**. 2016. 214 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016.

- PILOTO, P.A.G. *et al.* Experimental investigation of the fire resistance of partially encased beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 80, p. 121-137, 2013.
- PILOTO, P.A.G. *et al.* Experimental bending tests of partially encased beams at elevated temperatures. **Fire Safety Journal**, v. 92, p. 23-41, 2017.
- PINTO, T. P. P. **Utilização de Resíduos de Construção: estudo do uso em argamassas**. São Paulo, 1986. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1986.
- POON, C.S., SHUI, Z.H. & LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v.18, p.461–468, 2004.
- QIN, W. Y.; CHEN, Y. L.; CHEN, Z. P. Experimental Study on Flexural Behaviors of Steel Reinforced Recycled Coarse Aggregate Concrete Beams. **Applied Mechanics and Materials**, v. 166–169, p. 1614–1619, 2012.
- RAMOS, A. L. **Análise numérica de pisos mistos aço-concreto de pequena altura**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2010.
- RANGEL, C. S *et al.* Flexural Behavior of RC Beams made from Normal and High-strength Recycled Aggregate Concrete. In: 4th Workshop on The New Boundaries of Structural Concrete, 2016, Anacapri. **The New Boundaries of Structural Concrete**. Galazzano: IMREADY, p. 433-442, 2016.
- RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 50, p. 71-81, 2007.
- REGINATO, L. **Contribuição ao projeto de consolos de concreto com base em simulações numéricas**. 2020. 184 p. Dissertação (Mestrado em Ciências - Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas)) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.
- RILEM Draft Recommendation. 50-FMC Committee Fracture Mechanics of Concrete. Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. **Matériaux et Constructions**, v. 33, p. 347-351, 1985.
- ROSSI, A. *et al.* Numerical assessment of lateral distortional buckling in steel-concrete composite beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 172, 2020.
- SÁNCHEZ, M. **Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural**. 2004. 514 f. Tese (Doutorado) - Universidade Politécnica de Madrid, Madrid, 2004.
- SANTOS, D. P. *et al.* Optimized design of RC deep beams based on performance metrics applied to strut and tie model and in-plane stress conditions. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 16, n. 7, 2019.
- SATO, R. *et al.* Flexural Behavior of Reinforced Recycled Concrete Beams. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 5, n.1, p. 43-61, 2007.

SEO, D.S.; CHOI, H.B. Effects of the old cement mortar attached to the recycled aggregate surface on the bond characteristics between aggregate and cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 72–77, 2014.

SYSTEMES, D. **Abaqus Analysis User's Manual, Version 6.14**. [S.l.]: Dassault Systèmes Providence, 2017.

SIMÕES, Y. S., ROCHA, F. M.; MUNAIAR, J. Numerical comparison between the thermo-structural behavior of steel and partially encased steel and concrete composite columns in fire. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. v. 11, n. 04, p. 876-901, 2018.

SOUZA, P. T. **Análise teórica e experimental de pisos mistos de pequena altura compostos por vigas metálicas e lajes alveolares de concreto**. 2016. 154 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SOUZA, A. S. C. SILVA, E. N. Simulação numérica do comportamento de vigas mistas de aço e concreto protendidas [ Numerical behavior analysis of prestressed steel-concrete composite beams ]. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 15, n. 1, 30 jul. 2018.

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

TENÓRIO, J. J. L. *et al.* Concrete produced with recycled aggregates. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo , v. 5, n. 5, p. 692-701, Oct. 2012 .

TOPCU, I.B.; SENDEL, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, 34(8), p. 307-1312, 2004.

VERÍSSIMO, G. de S. **Desenvolvimento de um conector de cisalhamento em chapa dentada para estruturas mistas de aço e concreto e estudo do seu comportamento**. 2007. 316 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

WANG, B. *et al.* A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 171, 2021.

WENG, C.C.; YEN, S.I.; JIANG, M.H. Experimental Study on Shear Splitting Failure of Full-Scale Composite Concrete Encased Steel Beams. **Journal of Structural Engineering**, v. 128, n. 9, 2002.

WOSATKO, A. *et al.* Role of dilatancy angle in plasticity-based models of concrete. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 19, n. 4, p. 1268-1283, 2019.

YANG, I. H. Structural Behavior of Concrete Beams Containing Recycled Coarse Aggregates under Flexure. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2020, 2020.

YANG, Y.F; HAN, L.H. Compressive and flexural behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubes (RACFST) under short-term loadings. **Steel and Composite Structures**, v. 6, n. 3, p. 257–284, Jun. 2006.

YU, T. *et al.* Finite element modeling of confined concrete-II: Plastic-damage model. **Engineering Structures**, v. 32, n. 3, p. 680–691, 2010.

XIAO, J. LI, J. ZHANG, C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1187-1194, 2005.

ZHANG, L.; YANG, Y. Experimental and numerical investigation of short-term behavior of partially precast and partially encased composite beams. **Slovak Journal of Civil Engineering**, v. 28, p. 29-39,2020.

ZHENG, H.; CHEN, Z.; XU, J. Bond behavior of H-shaped steel embedded in recycled aggregate concrete under push-out loads. **International Journal of Steel Structures**, v.16, p. 347–360, 2016.

ZORDAN, S. E. **A Utilização do Entulho como Agregado, na Confecção do Concreto.** Campinas, 1997. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.