



**COMPORTAMENTO AO IMPACTO DO CONCRETO
EMBORRACHADO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO RECICLADAS DE
PNEUS**

KÉSSIO RAYLEN JERONIMO MONTEIRO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

COMPORTAMENTO AO IMPACTO DO CONCRETO
EMBORRACHADO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADO
COM FIBRAS DE AÇO RECICLADAS DE PNEUS

KÉSSIO RAYLEN JERONIMO MONTEIRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO
CIVIL

ORIENTADOR: RODRIGO DE MELO LAMEIRAS

BRASÍLIA/DF: ABRIL - 2024

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**COMPORTAMENTO AO IMPACTO DO CONCRETO EMBORRACHADO DE
ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO
RECICLADAS DE PNEUS**

KÉSSIO RAYLEN JERONIMO MONTEIRO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO
CIVIL.**

APROVADA POR:

Prof. Dr. Rodrigo de Melo Lameiras (PECC/ENC-UnB)
(Orientador)

Prof. Dr. Flávio de Andrade Silva (PUC-Rio)
(Examinador Externo)

Prof. Dr. Guilherme Alencar (PECC/ENC-UnB)
(Examinador Interno)

BRASÍLIA/DF, 29 DE ABRIL DE 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

MONTEIRO, KÉSSIO RAYLEN JERONIMO

Comportamento ao impacto do concreto emborrachado de ultra-alto desempenho reforçado com fibras de aço recicladas de pneus. [Distrito Federal] 2024.

xxii, 119 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2024).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Concreto de ultra-alto desempenho

2. Agregado de borracha

3. Fibras de aço recicladas de pneus

4. Concreto emborrachado

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Mestre)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MONTEIRO, K. R. J. (2024). Comportamento ao impacto do concreto emborrachado de ultra-alto desempenho reforçado com fibras de aço recicladas de pneus. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 119 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Késsio Raylen Jeronimo Monteiro

TÍTULO: Comportamento ao impacto do concreto emborrachado de ultra-alto desempenho reforçado com fibras de aço recicladas de pneus.

GRAU: Mestre

ANO: 2024

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Késsio Raylen Jeronimo Monteiro

Rua Álvaro Inácio, 179

Conjunto Esperança – CEP: 69915-118 – Rio Branco – AC – Brasil

E-mail: eng.kessio@gmail.com

*“Às vezes faço o que quero.
Às vezes faço o que tenho que fazer.”
(Charlie Brown Jr.)*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos à minha família, especialmente à minha mãe, Luana Monteiro, pelo apoio incondicional ao longo desta jornada. Também agradeço ao professor Rodrigo Lameiras e aos colegas do programa de pós-graduação em Estruturas e Construção Civil.

RESUMO

COMPORTAMENTO AO IMPACTO DO CONCRETO EMBORRACHADO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO RECICLADAS DE PNEUS

Autor: Késsio Raylen Jeronimo Monteiro

Orientador: Rodrigo de Melo Lameiras

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, 29 de abril de 2024.

Acredita-se que a utilização de concretos com fibras pode ser uma solução para um problema recorrente nas cidades brasileiras, que envolve a necessidade de substituir as grelhas de drenagem de ferro fundido, que são muito roubadas e as de concreto armado, devido às falhas, possivelmente devido ao seu baixo desempenho mecânico decorrente das cargas de impacto. Este estudo emprega conceitos de dosagem científica para produzir concretos de ultra-alto desempenho e concretos emborrachados de ultra-alto desempenho, a fim de avaliar sua eficácia em resistir a impactos em comparação com o concreto convencional. Três tipos de concretos foram utilizados: um convencional, um Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD) e um Concreto Emborrachado de Ultra-Alto Desempenho (CEUAD), que apresentaram resistência média à compressão de 61.67 MPa, 128.76 MPa e 108.15 MPa, respectivamente. Além disso, os concretos foram submetidos ao ensaio de queda de peso repetido, no qual foi observado que o CUAD e o CEUAD necessitam de aproximadamente sete vezes mais quedas para apresentarem falhas em comparação com o concreto convencional.

Palavras-chave: Concreto de ultra-alto desempenho, Agregado de borracha, Fibras de aço recicladas de pneus, Concreto emborrachado.

ABSTRACT

IMPACT BEHAVIOR OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE RUBBERIZED CONCRETE REINFORCED WITH RECYCLED STEEL FIBERS FROM TIRES

Author: Késsio Raylen Jeronimo Monteiro

Advisor: Rodrigo de Melo Lameiras

Postgraduate Program in Structures and Civil Construction

Brasilia, April 29th, 2024.

It is believed that the use of fiber-reinforced concrete could be a solution to a recurring problem in Brazilian cities, which involves the need to replace cast iron drainage grates, which are frequently stolen, and reinforced concrete ones, due to failures, possibly because of their low mechanical performance resulting from impact loads. This study employs concepts of scientific dosage to produce ultra-high performance concretes and ultra-high performance rubberized concretes to assess the impact efficiency of this material compared to conventional concrete. Three types of concretes were used in this study, a conventional one, a UHPC, and a UHPFRC, which showed average compressive strength of 61.67, 128.76, 108.15, respectively. In addition, the concretes were subjected to the repeated drop weight test, with it being verified that UHPC and UHPFRC require seven times more drops than conventional concrete.

Keywords: *Ultra-high performance concrete, Rubber aggregate, Recycled steel fibers from tires, Rubberized concrete.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivos.....	19
<i>1.1.1 Objetivo geral.....</i>	<i>19</i>
<i>1.1.2 Objetivos específicos.....</i>	<i>19</i>
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1 Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD)	20
2.2 Concreto Emborrachado de Ultra-Alto Desempenho (CEUAD)	22
2.3 Fibras recicladas.....	26
2.4 Dosagem pelo método do empacotamento compressível.....	30
<i>2.4.1 Densidade de empacotamento de partículas maiores que 100 μm.....</i>	<i>32</i>
<i>2.4.2 Densidade de empacotamento de misturas binárias com partículas maiores que 100 μm.....</i>	<i>33</i>
<i>2.4.3 Utilização de fibras no MEC.....</i>	<i>34</i>
<i>2.4.4 Densidade de empacotamento de partículas menores que 100 μm.....</i>	<i>35</i>
2.5 Efeito da Sílica ativa em compósitos cimentícios.....	35
2.6 Comportamento ao impacto de estruturas de concreto.....	37
<i>2.6.1 Determinação de resistência ao impacto do concreto.....</i>	<i>41</i>
<i>2.6.2 Comportamento ao impacto do concreto reforçado com fibras (CRF).....</i>	<i>47</i>
3 METODOLOGIA.....	50
3.1 Materiais.....	52
<i>3.1.1 Concreto autoadensável.....</i>	<i>52</i>
<i>3.1.2 CUAD e CEUAD.....</i>	<i>52</i>
<i>3.1.2.1 Fibras de aço recicladas de pneus.....</i>	<i>52</i>
<i>3.1.2.2 Cimento Portland.....</i>	<i>54</i>
<i>3.1.2.3 Sílica ativa.....</i>	<i>55</i>
<i>3.1.2.4 Fíler calcário.....</i>	<i>56</i>
<i>3.1.2.5 Agregado miúdo.....</i>	<i>57</i>
<i>3.1.2.6 Agregado miúdo de borracha reciclada de pneus (ABR).....</i>	<i>58</i>
<i>3.1.2.7 Aditivo.....</i>	<i>59</i>
<i>3.1.2.8 Água de amassamento.....</i>	<i>60</i>

3.2 Parâmetros para dosagem do concreto utilizando o BétonLabPro	60
3.2.1 Densidade de empacotamento de partículas maiores que 100 μm	60
3.2.2 Ensaio com misturas binárias para avaliar a validade da teoria do MEC quando se usa ABR	62
3.2.3 Ensaio com misturas binárias para determinar parâmetros necessários para consideração das fibras de aço reciclado de pneus na dosagem científica de CUAD e CEUAD	63
3.2.4 Densidade de empacotamento de partículas menores que 100 μm	65
3.2.5 Calibração dos parâmetros p e q	66
3.2.6 Calibração dos parâmetros K_p	68
3.2.7 Demais determinações do cimento	69
3.3 Inserção das propriedades dos materiais utilizados no BétonLabPro	69
3.3.1 Materiais	69
3.3.1.1 Cimento.....	69
3.3.1.2 Areia (A4).....	70
3.3.1.3 ABR.....	70
3.3.1.4 Fíler calcário.....	71
3.3.1.5 Sílica ativa.....	71
3.3.1.6 Superplastificante.....	71
3.3.2 Calibração dos parâmetros p, q e coeficiente K_p	71
3.4 Dosagem do CUAD e CEUAD pelo BétonLabPro	74
3.5 Produção das dosagens simuladas do CUAD e CEUAD	75
3.5.1 Ultrassonicação da sílica ativa	75
3.5.2 Alteração no procedimento de produção de concretos	76
3.5.3 Cura térmica	77
3.6 Produção de formas e moldagem dos corpos de prova	78
3.6.1 Resistência à compressão	78
3.6.2 Resistência à flexão	78
3.6.3 Resistência ao impacto em cilindros	79
3.6.4 Resistência ao impacto em grelhas	80
3.7 Determinação de resistências mecânicas	81
3.7.1 Resistência à compressão simples	81
3.7.2 Resistência à flexão de 3 pontos	81
3.7.3 Resistência ao impacto em cilindros	83

<i>3.7.4 Resistência ao impacto em grelhas</i>	85
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
4.1 Dosagem e produção do CUAD e CEUAD	87
<i>4.1.1 Resultados dos ensaios com misturas binárias para avaliar a validade da teoria do MEC quando se usa ABR</i>	87
<i>4.1.2 Resultados dos ensaios com misturas binárias para determinar parâmetros necessários para consideração da FARP na dosagem científica de CUAD e CEUAD</i>	89
<i>4.1.3 Densidade de empacotamento de partículas menores que 100 µm</i>	90
4.2 Simulações de dosagem realizadas com o software e produção de concretos	91
4.3 Propriedades mecânicas	92
<i>4.3.1 Resistência à compressão simples</i>	92
<i>4.3.2 Resistência à flexão de 3 pontos</i>	93
<i>4.3.3 Resistência ao impacto de cilindros</i>	96
<i>4.3.4 Resistência ao impacto em grelhas</i>	102
5 CONCLUSÃO	104
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representativo das diferenças de composição entre concreto convencional e CUAD.....	21
Figura 2 - Valores de resistência à compressão obtidos por Lyu <i>et al.</i>	25
Figura 3 - Apresentação das camadas de composição de pneus.....	27
Figura 4 - Comparação entre fibras de aço: a) recicladas de pneus e b) industriais.....	27
Figura 5 - Empacotamento de agregados para concretos.	31
Figura 6 - Procedimento do ensaio de compactação e vibração: a) Volume inicial do agregado e b) Volume final de agregado, após a realização do protocolo.....	33
Figura 7 - Fases visuais do ensaio de demanda d'água.	35
Figura 8 - Área de superfície específica e tamanho das partículas de componentes de concretos.	37
Figura 9 - Respostas locais e globais de vigas de concreto submetidas ao impacto: a) Propagação da onda de impacto e resposta local e b) Efeitos na estrutura e resposta global.	38
Figura 10 - Respostas locais e globais de estrutura de concreto armado submetida ao impacto de projétil.....	39
Figura 11 - Comportamento da estrutura sob: a) <i>soft impact</i> e b) <i>hard impact</i>	40
Figura 12 - Regimes de taxas de deformação.....	41
Figura 13 - Detalhe do equipamento do teste de queda de peso repetido (<i>Drop-Weight</i>): a) vista em planta; b) seção AA.	43
Figura 14 - Sugestões de modificação no ensaio.....	44
Figura 15 - Aparatos definidos para estudos com peso de queda repetido (<i>Drop-Weight</i>): a) Gonen; b) Raj, Nagarajan e Pallikkara; e c) Mahakavi e Chithra.	45
Figura 16 - Valores de energia de impacto necessária para ruptura das amostras.	45
Figura 17 - Aparato de ensaio de resistência ao impacto.	46
Figura 18 - Resultados de resistência encontrados por Liu e Wei.....	47
Figura 19 - Efeito da “ponte de fibras”.	47
Figura 20 - Distribuição de quedas para os concretos C60, M100 e CUAD: a) Valores médios para C60 e M100, e b) Valores médios para o CUAD.	49
Figura 21 - Fluxograma com as etapas do programa experimental.....	51
Figura 22 - Malha de aço reciclada de pneus: a) após a separação da borracha na beneficiadora de pneus e b) aspecto da malha como recebido, com borracha aderida.	52

Figura 23 - Procedimento de produção das FARP: a) Material após o aquecimento, b) Procedimento de corte do aço e c) Fibra de aço reciclada produzida.....	53
Figura 24 - Curva granulométrica do cimento Portland CP V – ARI.	55
Figura 25 - Curva granulométrica da sílica ativa.	56
Figura 26 - Curva granulométrica do fíler calcário.	57
Figura 27 - Areia natural após o procedimento de peneiramento mecânico.	57
Figura 28 - Curva granulométrica da areia utilizada na produção do CUAD e CEUAD.....	58
Figura 29 - Curva granulométrica do ABR.	59
Figura 30 - Aparato do ensaio de compactação e vibração: a) imagem do equipamento e b) detalhamento das dimensões (medidas em mm).	61
Figura 31 - Procedimento de validação do ABR como agregado.	62
Figura 32 - Misturas de areia e ABR para realização do ensaio.....	63
Figura 33 - Etapas necessárias para a inclusão da fibra no estudo.....	63
Figura 34 - Teor de saturação do cimento.	65
Figura 35 - Correção dos quantitativos de materiais realizado para ocuparem um volume total de 1 m ³	72
Figura 36 - Procedimento de calibração dos parâmetros p e q	73
Figura 37 - Procedimento de calibração do coeficiente K_p da sílica ativa.	73
Figura 38 – Propriedades requeridas para o traço de CUAD simulado.....	74
Figura 39 - Processo de ultrassonicação realizado no IQ-UnB.....	76
Figura 40 - Processo de mistura dos materiais secos.....	76
Figura 41 - Consistência do concreto após a produção.	77
Figura 42 - Procedimento de cura úmida.....	78
Figura 43 - Produção de amostras de CUAD para o ensaio de resistência à flexão.....	79
Figura 44 - Apresentação dos tipos de forma cilíndricas utilizadas no estudo. a) Forma 1; e b) Forma 2.....	79
Figura 45 - Apresentação dos tipos de forma utilizadas no estudo: a) Dimensões das formas de grelhas, em mm; e b) disposição da armadura para o CAA-CA.	81
Figura 46 - Configuração apresentada no ensaio de resistência à flexão (medidas em mm): a) Vista frontal e b) Vista posterior.	82
Figura 47 - Instrumentação do ensaio de resistência à flexão.	82
Figura 48 - Adaptação no corpo de prova para realização de medições quantitativas com: a) vista inferior e b) vista lateral (dimensões em mm).	84

Figura 49 - Detalhamento das peças auxiliares para medição das aberturas de fissura (dimensões em mm): a) esquema da peça de fixação dos transdutores ao corpo de prova, b) esquema da peça de anteparo, c) fotos das peças plásticas, d) foto das peças coladas ao corpo de prova; e) foto dos transdutores de deslocamento presos ao corpo de prova antes do ensaio.	84
Figura 50 - Configuração experimental para ensaio de impacto com cilindros (dimensões em mm).....	85
Figura 51 – Configuração experimental para ensaio de impacto com grelhas (dimensões em mm): a) Projeto do aparato; b) imagem do aparato, c) detalhe do aplicador linear de carga e implementação da cama de areia e aplicador de carga linear.....	86
Figura 52 – Comparação entre os resultados experimentais e analíticos da densidade de empacotamento de misturas binárias: a) A1 e ABR; b) A2 e ABR; c) A3 e ABR e; d) A4 e ABR.....	88
Figura 53 - Comportamento das misturas de areia e fibra.....	89
Figura 54 - Evolução dos deslocamentos de acordo com a aplicação de cargas para o CAA.	94
Figura 55 - Evolução dos deslocamentos de acordo com a aplicação de cargas para o CUAD.	95
Figura 56 - Evolução das fissuras de acordo com a aplicação de cargas para o CEUAD.....	95
Figura 57 - Tentativa de reforço das peças 1 e 2 com resina e fibra de carbono.....	97
Figura 58 - Proposta de leitura de deformação: a) Utilização de extensômetros elétricos para leitura de deformações e b) Aplicador linear completamente inserido no corpo de prova, após término do ensaio.	97
Figura 59 - Apresentação das amostras de concreto autoadensável sem armadura após o ensaio.	98
Figura 60 – Aspecto dos corpos de prova de CAA sem e com armadura após a realização dos ensaios: (a) vista superior do CP CAA-SA 2; (b) vista inferior do CP CAA-SA 1; (c) vista superior dos CP CAA-CA; (d) vista inferior dos CP CAA-CA.	99
Figura 61 - Apresentação das amostras após ensaio: a) CUAD - Vista superior, b) CUAD - Vista lateral; c) CUAD - Vista - inferior; d) CEUAD - Vista superior, e) CEUAD - Vista lateral; f) CEUAD: Vista - inferior.....	101
Figura 62 – Aspecto das grelhas após o ensaio: a) vista superior da grelha tradicional, de CAA-CA e b) vista superior da grelha de CEUAD.	102
Figura 63 - Aplicador linear de carga após o ensaio de impacto com grelhas.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos de traços de CUAD em kg/m ³	21
Tabela 2 - Quantidades sugeridas para dosagens de CUAD utilizando fibras de aço.....	22
Tabela 3 - Dosagens utilizadas por Pham <i>et al.</i> para produção de CEUAD em kg/m ³	23
Tabela 4 - Dosagens utilizadas por Zhang <i>et al.</i> para produção de CEUAD em kg/m ³	23
Tabela 5 - Dosagens utilizadas por Lyu <i>et al.</i> para produção de CEUAD em kg/m ³	24
Tabela 6 - Dosagem utilizada por Yu <i>et al.</i> para produção de CEUAD em kg/m ³	26
Tabela 7 - Dosagem utilizada por Zhuo <i>et al.</i> para produção de CEUAD em kg/m ³	29
Tabela 8 - Resultados para os ensaios de resistência à compressão e <i>slump flow</i>	30
Tabela 9 - Índice de empacotamento (K) para diferentes protocolos.....	32
Tabela 10 - Dosagem de concretos utilizados por Liu e Wei em kg/m ³	46
Tabela 11 - Características dos concretos e ensaios mecânicos.	50
Tabela 12 - Resultados dos ensaios para a caracterização física do aglomerante.	54
Tabela 13 - Resultados obtidos para a caracterização química do cimento.	55
Tabela 14 - Caracterização da sílica ativa.	56
Tabela 15 - Caracterização do fíler calcário.....	56
Tabela 16 - Ensaios de caracterização da areia utilizada na produção do CUAD e CEUAD. .	58
Tabela 17 - Ensaios de caracterização do ABR.....	59
Tabela 18 - Propriedades do aditivo superplastificante.....	60
Tabela 19 - Frações granulométricas dos agregados.	61
Tabela 20 - Quantidade de material para cada combinação de agregados submetidos ao ensaio.	62
Tabela 21 - Combinações de materiais utilizadas para o estudo.	64
Tabela 22 - Propriedades das FARP utilizado no cálculo do volume perturbado.	64
Tabela 23 - Parâmetros de dosagem necessários para o procedimento de dosagem.	66
Tabela 24 - Testes iniciais para determinação de parâmetros de dosagem em kg/m ³	67
Tabela 25 - Definição dos traços utilizados para a calibração dos coeficientes <i>p</i> e <i>q</i> do concreto em kg/m ³	67
Tabela 26 - Definição dos traços utilizados para a calibração do coeficiente <i>K_p</i> em kg/m ³	69
Tabela 27 - Propriedades do cimento inseridas no <i>BétonLabPro</i> (continua).....	69
Tabela 28 - Propriedades da areia inseridas no <i>BétonLabPro</i>	70
Tabela 29 - Propriedades do ABR inseridos no <i>BétonLabPro</i>	70

Tabela 30 - Propriedades do fíler calcário inseridas no <i>BétonLabPro</i>	71
Tabela 31 - Propriedades da sílica ativa inseridas no <i>BétonLabPro</i>	71
Tabela 32 - Propriedades do superplastificante inseridas no <i>BétonLabPro</i>	71
Tabela 33 - Apresentação dos traços modificados que foram inseridos no <i>software</i>	72
Tabela 34 - Densidade de empacotamento de cada faixa granulométrica da areia e do ABR. 87	
Tabela 35 - Densidade de empacotamento das misturas binárias entre diferentes frações granulométricas da areia e o ABR.	87
Tabela 36 - Erros entre valores teóricos e experimentais para densidades de empacotamento de misturas binárias entre diferentes faixas granulométricas de areia e ABR.	89
Tabela 37 - Influência das FARP nos valores de densidade de empacotamento real.	89
Tabela 38 - Valores de densidade de empacotamento teórico das misturas de areia e fibra.	90
Tabela 39 - Erros entre valores teóricos e experimentais para densidades de empacotamento de misturas de areia e fibra.	90
Tabela 40 - Valores de densidade de empacotamento para materiais em pó.	91
Tabela 41 – Dosagens e propriedades dos traços de CUAD simulados.	91
Tabela 42 - Propriedades do traço de CEUAD simulado.	92
Tabela 43 – Resistência à compressão de CAA, CUAD e CEUAD.	93
Tabela 44 - Valores de resistência à flexão para o concreto autoadensável.	94
Tabela 45 - Valores de resistência a flexão para o CUAD.	94
Tabela 46 - Valores de resistência a flexão para o CEUAD.	95
Tabela 47 – Número de quedas do martelo de carga para se atingir a ruptura nos corpos de prova de concreto autoadensável sem armadura (CAA-SA).	98
Tabela 48 – Número de quedas do martelo de carga para se atingir a ruptura nos corpos de prova de concreto autoadensável com armadura (CAA-CA).	99
Tabela 49 – Número de quedas do peso de carga para se atingir a ruptura nos corpos de prova de CUAD.	100
Tabela 50 – Número de quedas do martelo de carga para se atingir a ruptura nos corpos de prova de CEUAD.	100
Tabela 51 - Resultado do ensaio de impacto para grelhas.	102

1 INTRODUÇÃO

Por apresentar boa resistência à tração e ao cisalhamento, o uso do concreto armado e protendido sob condições de carga quase-estáticas ou estática, tem sido bem-sucedido. Entretanto, tem sido cada vez mais frequente a exposição das estruturas civis a impactos, explosões e incêndios, demonstrando a sua insuficiência frente a ação de cargas extremas, devido à baixa capacidade de absorção de energia e a natureza frágil do concreto (YOO; BANTHIA, 2019). Impactos acidentais podem ocorrer devido a colisão de veículos, aeronaves e embarcações, falhas de máquinas rotativas de alta velocidade e diversos outros fatores (ABID *et al.*, 2020).

No geral, o concreto convencional (CC) apresenta baixa resistência à tração, baixa ductilidade e baixa absorção de energia. Com isso, como uma das alternativas promissoras no desenvolvimento de elementos mais resistentes, tem-se adotado a utilização de fibras na matriz cimentícia, de modo a melhorar as propriedades gerais do concreto e a resistência ao impacto, uma vez que de acordo com o *ACI Committee 446* a resistência do concreto aumenta com a velocidade da formação de fissura (ACI, 2004). Isso ocorre devido o concreto reforçado com fibras (CRF) apresentar uma menor sensibilidade à taxa de carregamento (FANTILLI *et al.*, 2022).

O concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) apresenta uma inovação na técnica de produção, utilizando o método de empacotamento de agregados e fibras de aço e uma elevada resistência à compressão (SOUZA; GALVÃO, 2021). É importante ressaltar que para ser considerado um CUAD é necessário apresentar uma resistência à compressão de pelo menos 120 MPa (ASTM, 2017). Esses novos concretos consistem em uma evolução do concreto, utilizando alguns novos materiais e técnicas, no qual o seu objetivo consiste em melhorar a microestrutura do concreto e conferir melhor desempenho ao material, ou seja, não considerando somente a resistência mecânica, mas também a trabalhabilidade, a estética, o acabamento, a integridade e a durabilidade (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Sabe-se que adições de fibras melhoram significativamente as propriedades gerais do concreto, principalmente a ductilidade, resistência pós-fissuração e resistência ao impacto. Além disso, a busca por soluções sustentáveis na construção é crescente, sendo diversos estudos que abordam a utilização ou reutilização de materiais, como é o caso dos agregados de borracha de pneus descartados e da utilização de fibras recicladas, que possam reduzir o impacto causado pelo setor (KAZMI *et al.*, 2021; SHAHJALAL *et al.*, 2021; SENTHIL, SANJITH, 2022; KARIMI

et al., 2022; JUVERIA *et al.*, 2023; KALOUSH, CAMINHO, ZHU, 2005; SAINZ-AJA *et al.*, 2022; SAMARAKOON *et al.*, 2019; e CHEN *et al.*, (2023).

Alguns estudos verificaram que a adição do agregado de borracha reciclada (ABR) ao concreto é capaz de melhorar ainda mais o comportamento ao impacto do concreto reforçado com fibras (CRF). O concreto emborrachado (CE) consiste na substituição parcial de agregados convencionais por partículas de ABR por possuir uma maior capacidade de absorção de energia (KALOUSH; CAMINHO; ZHU, 2005). Apesar disso, a utilização do ABR gera uma perda significativa de resistência à compressão e à flexão, porém, devido ao ganho na resistência ao impacto, alguns autores consideraram utilizá-lo como agregado para concretos de alto desempenho (CAD) e de ultra-alto desempenho (CUAD) (PHAM *et al.*, 2021; e Zhang *et al.*, 2022). Apesar de se verificar um crescente interesse da comunidade técnico-científica pelo concreto emborrachado de ultra-alto desempenho (CEUAD), percebe-se que ainda que existem poucas investigações sobre a utilização de fibras de aço recicladas de pneus (FARP) na composição.

Acredita-se que é possível utilizar o CEUAD para solucionar um problema comum que vem ocorrendo no Distrito Federal, que consiste na necessidade da troca das grelhas de drenagem. Conforme relatado pela Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil (R7, 2022), devido aos roubos frequentes o Distrito Federal teve um prejuízo de R\$ 384 mil com o furto de 400 grelhas de drenagem em diversas regiões administrativas. Por isso, as grelhas tradicionais de ferro fundido têm sido trocadas por grelhas confeccionadas em concreto armado (DF, 2021). No entanto, esses elementos têm apresentado falhas com pouco tempo de uso devido ao fato de estarem constantemente submetidos a cargas de impacto, seja pelo trânsito de veículos, pessoas, vandalismo ou pelo inadequado manuseio durante o processo de limpeza das valas.

Desta forma, o presente trabalho investiga se a utilização do CEUAD consiste em uma alternativa vantajosa para o aumento da resistência ao impacto e, conseqüentemente, da vida útil desses elementos, além disso, as fibras utilizadas na pesquisa são oriundas do processo de reciclagem de pneus, buscando uma alternativa de descarte desse material para o setor e uma economia no processo de produção do CUAD e CEUAD, uma vez que as fibras comumente utilizadas nesses materiais não são vendidas comercialmente no Brasil, sendo necessário importa-las de outros países.

O presente trabalho foi realizado como parte das atividades do grupo de pesquisa “*Composite Materials for Resilient and Sustainable Structures – CMRSS*”, vinculado à Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – PECC/UnB, e liderado pelo professor Rodrigo de Melo Lameiras. Apesar do grupo já ter competências para a produção e dosagem científica de concretos autoadensáveis com fibras e caracterização do comportamento pós-fissuração de concretos reforçados com fibras, nenhuma pesquisa foi realizada no grupo de pesquisa para determinar a resistência ao impacto desses materiais (CARDOSO, 2020). Este trabalho também foi o primeiro no grupo de pesquisa e no PECC/UnB a trabalhar com CUAD, CEUAD e com FARP.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Determinar o comportamento ao impacto do concreto emborrachado de ultra-alto desempenho (CEUAD) reforçado com fibras de aço recicladas de pneus (FARP).

1.1.2 Objetivos específicos

Esta pesquisa teve como objetivos específicos:

- Avaliar a validade das metodologias de dosagem científica de concretos para dosar CUAD e CEUAD;
- Verificar a viabilidade da utilização de fibras de aço recicladas de pneus (FARP) na obtenção do CEUAD;
- Investigar a viabilidade de se utilizar uma configuração experimental e instrumentação do ensaio de determinação da resistência ao impacto de concretos capazes avaliar quantitativamente o progresso das deformações e aberturas de fissuras;
- Verificar o efeito do agregado de borracha reciclada (ABR) no comportamento ao impacto e estático do concreto emborrachado de ultra-alto desempenho (CEUAD);
- Comparar as propriedades e características de grelhas de drenagem convencionais com as produzidas com CEUAD reforçado com fibras de aço recicladas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura sobre os principais conceitos abordados e pertinentes ao desenvolvimento da dissertação. São abordados os seguintes assuntos: CUAD, CEUAD, métodos de empacotamento de materiais para procedimentos de dosagem científica de concretos, ABR, FARP, utilização da sílica ativa e comportamento ao impacto de elementos estruturais.

2.1 Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD)

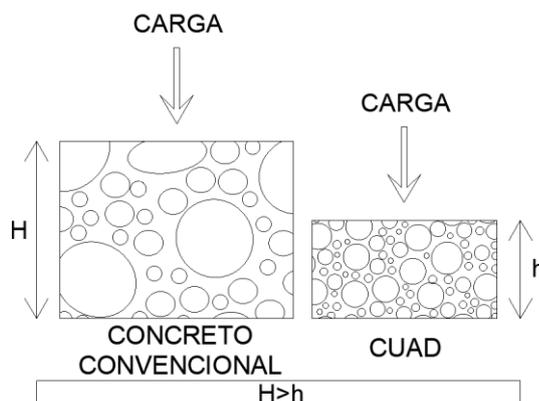
Com os avanços tecnológicos e facilidade de obtenção de matéria prima foi possível incorporar diversos elementos no concreto. Tem sido cada vez mais comum o uso de diferentes tipos de aditivos, adições minerais e fibras para se obter propriedades específicas. Esses avanços também têm viabilizado a utilização de novas técnicas de produção, como é o caso dos concretos autoadensáveis. A premissas dessas novas gerações de concretos são basicamente permitir a execução de estruturas mais duráveis, esbeltas e seguras para seus usuários (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Esses concretos que apresentam capacidade resistentes superiores e surgiram com a ideia de se obter um produto que fosse tão resistente e durável quanto uma rocha, mas que fosse possível moldá-lo em diferentes formas e dimensões de maneira fácil. O CUAD consiste em uma evolução do concreto convencional (CC) e do concreto de alto-desempenho (CAD), ao utilizar conceitos inovadores na sua produção, como a utilização de fibras e aditivos especiais. O princípio é basicamente a utilização de fibras de aço e a exclusão do agregado graúdo na sua composição, com as partículas finas, o que facilita a utilização das fibras (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). Azmee e Shafiq (2018) explicam que esse concreto é geralmente composto por fibras, superplastificante e sílica ativa, utilizada como material cimentício suplementar, misturados por uma quantidade mínima de água, representado por um valor baixo para o fator água/cimento (a/c), e caracterizado pela presença de agregados finos de areia com dimensões de 0.15 a 0.6 mm de diâmetro.

Azmee e Shafiq (2018) explicam ainda que ao se eliminar o agregado graúdo consegue-se evitar possíveis vazios internos e os efeitos de zonas de transições e consegue conferir ao material uma maior superfície específica, o que permite uma distribuição de tensões mais homogênea sobre as partículas e evita falhas na sua microestrutura. Os agregados utilizados devem apresentar também um ótimo empacotamento das partículas, otimizando a densidade do

material inerte usuários (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011). Essa otimização do empacotamento também foi sugerida por Mishra e Singh (2019), que explicam que é possível se utilizar estruturas mais esbeltas para um mesmo carregamento somente com a mudança das dimensões dos agregados e redução da quantidade de água, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema representativo das diferenças de composição entre concreto convencional e CUAD.



Fonte: Adaptado de Mishra e Singh (2019).

Ainda não existe um consenso sobre a resistência mínima que um CUAD deve apresentar, sendo que diversos estudos apontam que é necessário apresentar uma resistência à compressão de pelo menos 120 MPa (ASTM, 2017; ZANG *et al.*, 2022; LIU, WEI, 2022; MISHRA, SINGH, 2019; ZHUO *et al.*, 2023; e BAJABER, HAKEEM, 2021). A Tabela 1 apresenta algumas dosagens para CUAD que serviram como referência para este estudo.

Tabela 1 - Estudos de traços de CUAD em kg/m³.

Autores	C	A	M	RR	SA	AQ	PS	SP (%)	FA	W	a/c
Habel e Gauvreau (2008)	967	675			251	-	-	3.61	430	244*	-
Prem <i>et al.</i> (2012)	788				197	315			156		0.22
Pham <i>et al.</i> (2021)	995	1051			238	-	-	6.73	156	180	-
Soares (2021)	1000	1074		10.8	80			2.43		181	
Liu e Wei (2022)	715	1180			135	165	-	1.00	156	-	0.2
Yang <i>et al.</i> (2022)	712	1020			231	-	-	4.31	156	109	-
Zhang <i>et al.</i> (2022)	848	933			212	-	212	2.95	-	170	0.16
Chen <i>et al.</i> (2023)	788	1100			200			2.66	156	182	-
Junior (2023)	875	914	-	-	207.6	99	-	-	-	216.6	0.20

C: Cimento, A: Areia de sílica ou quartzo, M: Metacaulim, RR: Redutor de retração, SA: Sílica ativa, AQ: Areia de quartz
PS: Pó de sílica, SP: Superplastificante, FA: Fibras de aço e W: água. *Total de água.

Fonte: Elaboração própria.

Além disso, Bajaber e Hakeem (2021) apresentaram uma sugestão de materiais convencionalmente utilizados na literatura para produção de CUAD, esses materiais

consistiram basicamente na utilização de areia, cimento, sílica ativa, água, superplastificante e fibras de aço.

Essa proposta de utilização de materiais corrobora com a sugestão de parâmetros de dosagem sugerida por Voort (2008), que foi mencionada por Bajaber e Hakeem (2021) e Tayeh *et al.* (2013). A faixa típica de materiais sugerida, apresentando quantidades mínimas e máximas recomendadas, é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidades sugeridas para dosagens de CUAD utilizando fibras de aço.

Componentes	Faixa Típica (kg/m ³)
Areia Fina	490-1390
Cimento Portland	610-1080
Sílica Ativa	50-334
Água	126-261
Superplastificante	9-71
Fibras de Aço	40 -250

Fonte: Voort (2008).

Mishra e Singh (2019) sugerem ainda que os valores otimizados encontrados na literatura são para o fator a/c, quantidade de fibras e de superplastificante, respectivamente, em 0.18-0.22, 1%-2% do volume total e 1.5%-2.4% em relação a massa do cimento.

Com relação aos estudos realizados no país, diversos foram realizados para verificar a viabilidade de produção e utilização do CUAD (JUNIOR, 2023; CHRIST *et al.*, 2023a; CHRIST *et al.*, 2023b; CHRIST, TUTIKIAN, HELENE, 2022; BARBOSA, 2021; e SOARES 2021).

2.2 Concreto Emborrachado de Ultra-Alto Desempenho (CEUAD)

Desde 2006 a União Europeia (UE) proibiu o descarte de pneus em aterros sanitários, levando os fabricantes a buscarem alternativas para sua reutilização, esse fato levou a uma extensa busca pela incorporação desses materiais na construção civil, principalmente do agregado de borracha (ABR), devido a facilidade da transformação, e da malha de aço (MATTOS, 2006).

No Brasil, o gerenciamento de resíduos sólidos é regulamentado pela Lei Nº 12.305, conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que especifica que os geradores de resíduos sólidos estabeleçam ações de gestão integrada ou gerenciamento (BRASIL, 2010).

Diversos autores buscaram incluir o ABR na produção de vários tipos de concretos. (WANG, XIA, LI, 2016; OKONTA, TSHUKUTSOANE, KARIMI, 2024; GANJIAN, KHORAMI, MAGHSOUDI, 2024; QADIR, NOAMAN, 2024; AGHAMOHAMMADI *et al.*, 2024; XIE *et*

al., 2024; e JIN *et al.*, 2024). São apresentados a seguir alguns autores que estudaram a utilização do ABR para produção de CEUAD, sendo que geralmente é determinada a dosagem de um CUAD, como concreto de referência, e realizada a substituição do agregado miúdo de areia por ABR.

Pham *et al.* (2021) desenvolveu o CUAD e CEUAD, substituindo a areia por ABR nos teores de 0%, 10%, 20% e 40%, mantendo o volume total constante e substituindo o equivalente em volume da massa de areia pelo ABR. O ABR utilizado no estudo apresentava diâmetros menores que 0.6 mm e massa específica de 1150 kg/m³, enquanto a areia apresentava diâmetros menores que 0.3 mm. Neste estudo também foram utilizadas fibras de aço comerciais em proporção fixa de 2%, ou seja, 156 kg/m³. Os resultados indicaram uma redução significativa na resistência à compressão, de 136.1 MPa para 103.8 MPa e 67.8 MPa, ao aumentar os teores de substituição para 20% e 40%, respectivamente. Detalhes das proporções de dosagem estão disponíveis na Tabela 3.

Tabela 3 - Dosagens utilizadas por Pham *et al.* para produção de CEUAD em kg/m³.

Descrição	Cimento	Areia	ABR	Sílica Ativa	Água	Super plastificante	Fibra de Aço comercial
CUAD-ABR0	995	1051	0	238	180	67	156
CUAD-ABR10	995	946	51	238	180	67	156
CUAD-ABR20	995	841	103	238	180	67	156
CUAD-ABR40	995	631	206	238	180	67	156

Fonte: Pham *et al.* (2021).

Zhang *et al.* (2022) desenvolveu o CUAD e CEUAD sem utilização de fibras, substituindo a areia por ABR nos teores de 0%, 5%, 10% e 15%, mantendo o volume total constante e substituindo o equivalente em volume da massa de areia pelo ABR. O ABR utilizado no estudo apresentava diâmetros menores que 0.42 mm e massa específica de 1000 kg/m³, enquanto a areia apresentava partículas com diâmetros menores que 0.6 mm e o pó de sílica variaram de 106 a 120 µm. Os detalhes das proporções de dosagem podem ser encontrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dosagens utilizadas por Zhang *et al.* para produção de CEUAD em kg/m³.

Descrição	Cimento	Areia	ABR	Sílica Ativa	Água	Super plastificante	Pó de Sílica
CUAD-ABR0	848	933	0	212	170	25	212
CUAD-ABR5	848	886	29	212	170	25	212
CUAD-ABR10	848	840	58	212	170	25	212
CUAD-ABR15	848	793	87	212	170	25	212

Fonte: Zhang *et al.* (2022)

Verificou-se que nos teores de 5%, 10% e 15% a fluidez reduziu em 19%, 30% e 42%, a resistência à compressão reduziu 8.0%, 16.9% e 24% e a resistência à flexão reduziu 6.1%, 16.1% e 17.1%. A resistência à compressão diminuiu de 138.5 MPa para 107.2 MPa ao substituir 15% da areia por ABR (ZHANG *et al.*, 2022).

Lyu *et al.* (2023) avaliaram a utilização do ABR para produção de CUAD e CEUAD com e sem a presença de fibras nas propriedades microestruturais e resistência à compressão após submetidos a diferentes temperaturas, 21°C, 300°C e 600°C, sendo as dosagens apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Dosagens utilizadas por Lyu *et al.* para produção de CEUAD em kg/m³.

Descrição	Cimento	Areia	Pó de Quartzo	ABR	Sílica Ativa	Água	SP	AMV	FI
F0-ABR0	922	912	101	0	248	172	29.25	5.85	0
F0-ABR20	922	710	101	88	248	172	29.25	5.85	0
F2-ABR0	922	812	101	0	248	172	29.25	5.85	157
F2-ABR10	922	811	101	44	248	172	29.25	5.85	157
F2-ABR20	922	710	101	88	248	172	29.25	5.85	157

SP: Superplastificante; AMV: Aditivo modificador de viscosidade; FI: Fibras de aço industriais.

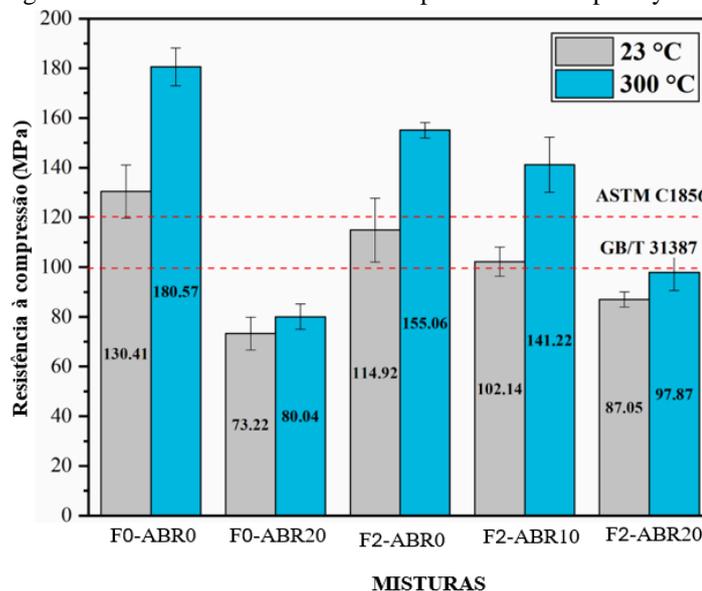
Fonte: Lyu *et al.* (2023).

Primeiramente o concreto foi produzido em temperatura ambiente e colocado em câmara úmida com temperatura de 21°C e 95% de umidade por 24 horas, sendo posteriormente desmoldado e mantido submerso em água até completar 28 dias de idade. Os corpos de prova que necessitaram ser aquecidos até 300°C e 600°C foram submetidos ao aquecimento a uma taxa de 7 °C /min em forno elétrico com capacidade de aquecimento de 800 °C. Uma vez alcançada a temperatura desejada o forno foi desligado e a porta foi selada, esfriando naturalmente por 24 horas.

Após o aquecimento a 300°C, todos os corpos de prova permaneceram intactos e nenhuma fissura foi encontrada nas superfícies. Entretanto, ao aumentar a temperatura para 600°C, os corpos de prova com 20% de ABR foram os únicos a se manterem íntegros ou com pequenas fragmentações. Os corpos de prova com 0% de ABR, independente de possuir ou não fibras, apresentaram fragmentação em pequenos pedaços e até mesmo pó. Os corpos de prova com 10% de ABR apresentaram um núcleo mais consistente, mas com diversas fragmentações que impossibilitaram a realização de ensaios. Já os corpos de prova com 20% de ABR, os sem fibra apresentaram fragmentações nos cantos e laterais, enquanto os que possuíram fibras, no teor de 2%, não apresentaram danos visualmente detectáveis.

Com relação as amostras que foram submetidas as temperaturas de 21°C e 300°C, os valores obtidos para a resistência à compressão podem ser visualizados na Figura 2.

Figura 2 - Valores de resistência à compressão obtidos por Lyu *et al.*



Fonte: Adaptado de Lyu *et al.* (2023).

Com relação às misturas, verifica-se um aumento da resistência à compressão após serem submetidas a uma temperatura de 300°C, esse fato pode ser explicado devido ter ocorrido um estreitamento nas microfissuras devido a expansão térmica dos componentes e consequentemente uma diminuição da porosidade total. Entretanto, a pressão interna nos poros resultou em microfissuras nas proximidades do ABR, o que explica obter resistências menores quando presentes na composição. Com relação a inclusão de 2% fibras, verificou-se que na temperatura ambiente a resistência reduziu 11.87% e que após submetido a temperatura de 300°C reduziu 14.12%. Já quando se analisa a utilização do ABR, verificou-se que na temperatura ambiente a resistência reduziu 43.85% e que após submetido a temperatura de 300°C reduziu 55.67%, com 20% de ABR. Com relação as amostras submetidas a temperatura de 600°C, o ABR derreteu e aumentou a porosidade do concreto, fazendo com que a pressão interna fosse reduzida, o que explica a diminuição do lascamento e fragmentação quando aumentada a temperatura (LYU *et al.*, 2023).

Yu *et al.* (2023) avaliou a utilização de agentes de acoplamento de silano nos teores de 1%, 1.5%, 2%, 2.5%, 3% e 5% em um CEUAD, a dosagem do concreto pode ser verificada na Tabela 6. A utilização desse agente como um pré-tratamento para o ABR criou uma barreira de proteção para o agregado e reduziu o surgimento de uma nova fase de hidratação do concreto,

que geralmente surge pela presença da água aderida. A resistência à flexão do CEUAD foi aumentada em 12.3% com concentração de 2.5% do agente.

Tabela 6 - Dosagem utilizada por Yu *et al.* para produção de CEUAD em kg/m³.

Descrição	Cimento	Areia	ABR	Sílica Ativa	Água	Superplastificante
CEUAD	880	900	66	188	175	30

Fonte: Yu *et al.* (2023).

Os autores Pham *et al.* (2021), Zhang *et al.* (2022) e Lyu *et al.* (2023) chegaram em um consenso sobre a resistência à compressão mínima para se obter um CEUAD, devendo apresentar um valor superior a 100 MPa. Esse valor também é estabelecido pela norma chinesa GB/T 31387 (2015), que estabelece os requisitos técnicos e métodos de teste para os concretos de pós reativos, que consistem basicamente em um dos tipos de CUAD. Percebe-se então que existe a possibilidade da utilização do ABR para o desenvolvimento de concretos mais resistentes e sustentáveis.

2.3 Fibras recicladas

A preocupação com a busca por alternativas sustentáveis de construir não é recente, diversos estudos abordam a busca pela utilização, ou reutilização, de materiais que venham a proporcionar uma redução no impacto causado pelo setor, principalmente no modelo de construção baseado na utilização do concreto armado. Com isso, estudos como adição de materiais oriundos de outros setores foram abordados ao longo dos anos, sendo bastante significativo a incorporação de resíduos industriais. Com a utilização das fibras no concreto essa situação não foi diferente, buscando melhorar sua capacidade de resistência e até sua durabilidade foram testadas fibras compostas por diversos materiais. São diversos os autores que buscaram estudar a aplicação de fibras recicladas e FARP (ZHANG, LIU, YARLAGADDA, 2017; WU *et al.*, 2000; PILAKOUTAS *et al.*, 2004; MARTINEZ *et al.*, 2013; ZAMANZADEH *et al.*, 2015; FRAZÃO, 2019; KHEYRODDIN, ARSHADI, KHEDRI, 2021; SAINZ-AJA *et al.*, 2022; QIN, KAEWUNRUEN, 2022; FANTILLI, DEHKORDI, 2022; e RAJ *et al.*, 2022).

A FARP tem sido usada com sucesso no concreto para melhorar o seu comportamento pós-fissuração e a sua capacidade de absorção de energia. Apesar dos estudos, sabe-se que a transformação da malha de aço de pneus em fibras ainda apresenta algumas dificuldades, principalmente por necessitar de um tratamento mais específico, esse fato faz com que muitas vezes as fibras sejam vendidas como sucata, com preços relativamente baixos. No geral, as

fibras de aço resultantes deste processo são caracterizadas por diferentes diâmetros, comprimentos e formatos (FRAZÃO, 2019). A Figura 3 apresenta as camadas que compõem os pneus.

Figura 3 - Apresentação das camadas de composição de pneus.



Fonte: Artacho (2015).

Apesar dos resultados promissores, os estudos sobre a utilização de fibras recicladas precisam evoluir bastante, principalmente para dar garantia ao setor da sua utilização, uma vez que são diversos os fatores que podem alterar seu desempenho no concreto. A Figura 4 apresenta a diferença entre fibras de aço recicladas de pneu e industriais.

Figura 4 - Comparação entre fibras de aço: a) recicladas de pneus e b) industriais.



Fonte: Frazão *et al.* (2018).

Alguns autores têm buscado alternativas para produção de FARP, como é o caso de Zamanzadeh *et al.* (2015) e Frazão (2019). Zamanzadeh *et al.* (2015) empregou o método de criogenia, submetendo o pneu pré-triturado a temperaturas muito baixas, em torno de $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esse processo faz com que o material se torne extremamente frágil, possibilitando sua redução por meio de esmagamento. Posteriormente, a borracha é separada do pneu por um procedimento eletromagnético (PILAKOUTAS *et al.*, 2004). Frazão (2019) empregou o método de pirólise, que consiste no aquecimento do material a altas temperaturas, levando a liberação de gases, resíduos sólidos de carbono, óleos e aço (MARTINEZ *et al.*, 2013). O estudo estabeleceu que

a temperatura de 350°C é a ideal para o tratamento das fibras recicladas, pois além de apresentar uma eficiência significativa na separação da borracha aderida, gera poucos danos às propriedades microestruturais do aço.

Frazão *et al.* (2018) produziu concretos convencionais com um teor constante de 1% de FARP e fibras de aço industriais. As fibras industriais apresentavam comprimento de 33 mm e diâmetro de 0.55 mm e as recicladas apresentava geometrias irregulares, mas foi definido o comprimento de 20 mm de comprimento e 0.15 mm de diâmetro. Os resultados indicaram uma ligeira redução na resistência à compressão, atingindo valores de 39.42 MPa para as fibras recicladas e 48.87 MPa para as fibras industriais.

Samarakoon *et al.* (2019) comparou concretos convencionais utilizando FARP e fibras de aço industriais nas proporções de 0%, 0,5% e 1%, em volume, em ensaio de flexão de vigas de 4 pontos. As fibras industriais apresentavam comprimento de 35 mm e diâmetro de 0.55 e as fibras recicladas apresentava geometrias irregulares, mas foi definido o comprimento médio de 37 mm de comprimento e 0.42 mm de diâmetro. Verificou-se que a resistência à flexão do concreto aumentou quando utilizados 0.5% e 1% de fibras, em relação ao concreto sem fibras, com fibras recicladas aumentando 4.8% e 12.6% e as fibras industriais aumentando 17.4% e 20.2%, respectivamente. Os concretos com fibra apresentaram um comportamento dúctil semelhante, com flechas do meio do vão atingindo 91.7 mm e 97.7 mm, respectivamente, para o concreto reforçado com fibras recicladas e industriais nos teores de 1%.

Gul e Nasser (2019) compararam concretos convencionais produzidos com fibras de aço recicladas de pneus e fibras de aço industriais nas proporções de 1% e 5%, em volume, em ensaios de resistência à compressão e impacto dinâmico. As fibras recicladas apresentavam geometrias irregulares, mas foi definido o comprimento de 25 a 101 mm, sem especificação de diâmetros. Os resultados mostraram que ocorreu uma redução de 20% e 38% na resistência à compressão e de 14% e 42% na resistência ao impacto dinâmico, quando utilizadas, respectivamente, 1% e 5% de fibras recicladas em vez das fibras industriais. Além disso, observou-se um aumento na resistência à compressão e ao impacto ao aumentar o teor de fibras industriais de 1% para 5%. No entanto, esse efeito não foi observado para as fibras recicladas, onde houve reduções nos valores de resistência quando o teor de fibras recicladas aumentou de 1% para 5%. Essas reduções podem ser atribuídas ao comprimento das fibras recicladas.

Chen *et al.* (2023) realizou um estudo sobre CUAD, variando os teores de 1%, 2%, 3% e 4% de FARP, mantendo 2% de fibras industriais como referência. As fibras de aço industriais apresentavam 0.2 mm de diâmetro e 13 mm de comprimento, enquanto as FARP apresentavam 0.22 mm de diâmetro e comprimentos que variavam de 3.1-15.6 mm. Em relação à fluidez, medida pelo ensaio *slump flow*, observou-se uma redução de 3.1%, 5.1% e 10.9% nos concretos com teores de 2%, 3% e 4% de FARP, respectivamente, em comparação com o teor de 1% de FARP. Quanto a resistência à compressão os valores aumentaram em 2.7%, 6.4% e 9.8% para os teores de 2%, 3% e 4% de FARP, em relação ao teor de 1% de FARP. Além disso, em relação aos teores de 2% de fibras, as industriais demonstraram um aumento de 11.1% e 40.5% nos resultados de compressão e flexão, respectivamente, em comparação com ao mesmo teor de FARP.

Zhuo *et al.* (2023) analisou a resistência à compressão de CUAD e CEUAD produzidos com FARP e fibras industriais, com as dosagens de materiais apresentados na Tabela 7. Esse foi o único trabalho encontrado durante a realização da revisão bibliográfica que apresentava FARP na composição do CEUAD. O ABR utilizado apresentava dimensões entre 74 e 864 μm e massa específica de 1120 kg/m^3 . A areia e pó de quartzo apresentavam massa específica de 2650 kg/m^3 e absorção de água de 0.87%. As fibras de aço industriais apresentavam comprimento de 13 mm e 0.2 mm de diâmetro, enquanto as FARP apresentavam comprimentos variados e um valor médio de 8.31 mm e 0.30 mm de diâmetro. Para o CUAD com teor de 2% de fibra, a mudança de fibra industrial pela reciclada gerou uma redução de 139.79 MPa para 130.30 MPa. Com relação a substituição de 5% de areia por ABR, e teor fixo de 2% de fibra reciclada, a resistência reduziu de 130.3 MPa para 110.04 MPa. Além disso, com o aumento do teor de ABR observou-se uma redução na fluidez do concreto. Os resultados para os ensaios de resistência à compressão e fluidez, medidas através do ensaio *slump flow*, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 7 - Dosagem utilizada por Zhuo *et al.* para produção de CEUAD em kg/m^3 .

Descrição	Cimento	Areia	Pó de Quartzo	ABR	Sílica Ativa	Água	SP	FI	FR
FI1-ABR0	871.69	679.92	453.28	-	217.92	203.98	32.69	157	-
FR2-ABR0	871.69	679.92	453.28	-	217.92	203.98	32.69	-	157
FR2-ABR5	871.69	645.92	430.62	23.95	217.92	203.98	32.69	-	157
FR2-ABR20	871.69	543.94	362.62	95.78	217.92	203.98	32.69	-	157
FR2-ABR35	871.69	441.95	294.63	167.62	217.92	203.98	32.69	-	157
FR2-ABR50	871.69	339.96	226.64	239.45	217.92	203.98	32.69	-	157
FR1-ABR20	871.69	543.94	362.62	95.78	217.92	203.98	32.69	-	78.50
FR3-ABR20	871.69	543.94	362.62	95.78	217.92	203.98	32.69	-	235.5

SP: Superplastificante; FI: Fibras de aço industriais; FR: Fibras de aço recicladas.

Fonte: Zhuo *et al.* (2023).

Tabela 8 - Resultados para os ensaios de resistência à compressão e *slump flow*.

Descrição	Resistência à compressão (MPa)	<i>Slump flow</i> (mm)
FI1-ABR0	139.79	210
FR2-ABR0	130.3	225
FR2-ABR5	110.04	220
FR2-ABR20	65.83	200
FR2-ABR35	48.35	187
FR2-ABR50	34.69	175
FR1-ABR20	64.37	190
FR3-ABR20	68.14	185

Fonte: Zhuo *et al.* (2023).

Desta forma, foi possível verificar que a utilização da FARP reduz as propriedades mecânicas dos concretos, quando comparadas às fibras industriais. Além disso, a inclusão de teores maiores de FARP não resultaram em aumentos significativos nos valores de resistência à compressão.

2.4 Dosagem pelo método do empacotamento compressível

O procedimento de dosagem consiste em definir proporções ideais de materiais com o intuito de obter propriedades já conhecidas para a mistura, seja no estado fresco ou endurecido, sendo que esse procedimento busca sempre atender aos conceitos de economia, desempenho e durabilidade (SOUZA, 2021). Diversos estudos têm abordado a utilização de procedimentos científicos para a dosagem de concretos. No entanto, são recentes os estudos sobre procedimentos científicos de produção de CUAD reforçado com fibras, como o realizado por Wang (2024), que buscou desenvolver uma estrutura de empacotamento para esse tipo específico de concreto.

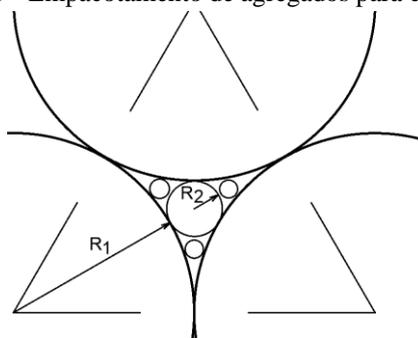
Um dos métodos científicos de dosagem de concretos com fibras utilizados pelo grupo de pesquisa “*Composite Materials for Resilient and Sustainable Structures – CMRSS*”, vinculado à Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – PECC/UnB, é o método do empacotamento compressível, que se baseia na otimização do empacotamento de partículas, conseguindo deixar o procedimento mais eficiente e atingindo uma densidade de empacotamento máxima. Essa metodologia, proposta por De Larrard (1999) já é utilizada para produção de concretos convencionais, de alto desempenho, autoadensáveis, entre outros. (DE LARRARD, SEDRAN, 2002; FORMAGINI, 2003; SILVA, 2004; CARDOSO, 2020; PEREIRA, 2021; SOUZA, 2021; COSTA, 2021; e GOMES, 2024).

De acordo com De Larrard (1999), a dosagem de concretos é, em sua maioria, uma questão de compacidade e densidade de empacotamento. Nesse contexto, o método proposto tem como objetivo principal realizar uma dosagem de concreto otimizada, buscando uma proporção entre os grãos que resulte na máxima massa unitária possível.

As vantagens do método do empacotamento compressível, destacando sua fundamentação na observação dos fenômenos, na formulação de hipóteses, na criação de modelos matemáticos representativos desses fenômenos e na validação experimental desses modelos. O método abrange ainda possibilidade de incorporação de novos materiais, uma vantagem para a produção de novos tipos de concretos. Sua utilização pode ser testada por meio da análise de uma extensa quantidade de dados experimentais. Além disso, uma característica considerada vantajosa é a viabilidade de implementação computacional, permitindo a dosagem por meio de *softwares* especializados, como o *BétonLabPro* (SILVA, 2004).

O Método de Empacotamento Compressível (MEC) fundamenta-se em dois blocos essenciais: o empacotamento virtual, que representa a compacidade teórica considerada como a máxima possível para uma partícula específica, e o empacotamento real, que corresponde à compacidade efetivamente alcançada no processo adotado na produção do concreto. A correlação entre esses dois tipos de empacotamento é estabelecida por meio de um protocolo adotado durante o processo (CARDOSO, 2020). A Figura 5 apresenta um esquema representativo do empacotamento de grãos, princípio básico do método do empacotamento compressível que será utilizado para dosagem.

Figura 5 - Empacotamento de agregados para concretos.



Fonte: Adaptado de Walraven (1999).

Um conceito fundamental para a compreensão do Método de Empacotamento Compressível (MEC) é o da compacidade virtual de empacotamento (β). Essa medida representa a máxima compacidade que uma mistura granular monodispersa (partículas de tamanhos aproximadamente iguais) pode atingir, ao empilhar os grãos um a um, sem modificar sua forma

original, em um volume infinito. Outro conceito crucial é o da classe de grãos dominante, responsável por assegurar a continuidade sólida da mistura. Sem essa classe, a mistura se tornaria uma suspensão, resultando em falta de empacotamento. Além disso, o empacotamento máximo de uma mistura ocorre quando os grãos menores preenchem completamente os espaços vazios deixados entre os grãos de maior dimensão (DE LARRARD, 1999; PEREIRA, 2021). O empacotamento máximo obtido com o MEC pode ser determinado pela densidade de empacotamento e é definido utilizando metodologias diferenciadas para partículas maiores e menores que 100 μm (PEREIRA, 2021).

De acordo com De Larrard (1999), um procedimento importante é a definição do protocolo de compactação para misturas monodispersas, sendo determinado através do coeficiente K. O índice de empacotamento (K), empregado para estabelecer uma relação entre a compacidade teórica e a experimental, leva em conta a energia associada ao processo experimental de empacotamento (PEREIRA, 2018). A Tabela 9 apresenta os valores de K para diferentes protocolos de ensaio.

Tabela 9 - Índice de empacotamento (K) para diferentes protocolos.

Protocolo de ensaio	K
Lançamento simples	4,1
Lançamento + golpes com bastão	4,5
Vibração	4,75
Demanda d'água	6,7
Vibração + compactação	9
Concreto compactado ao rolo	12
Empacotamento virtual	∞

Fonte: De Larrard (1999).

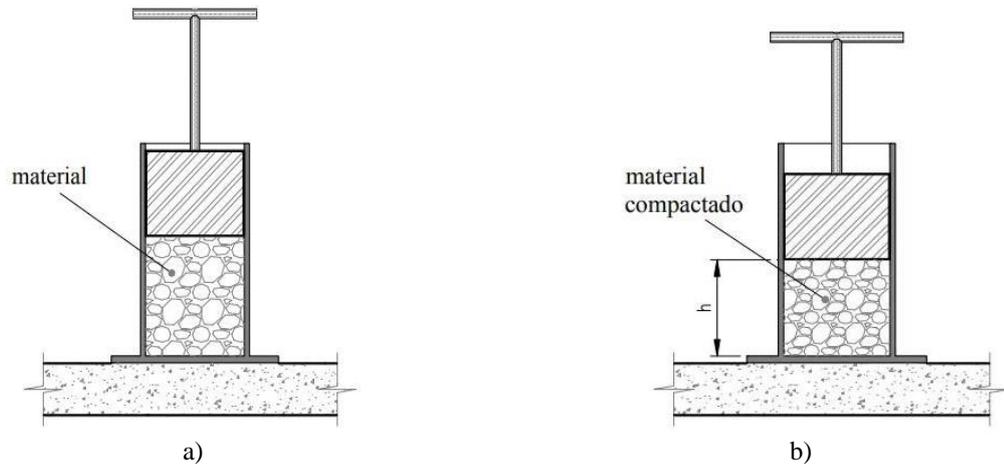
Dessa maneira, à medida que esse índice aumenta, a compacidade experimental se aproxima mais da compacidade virtual. Valores de K iguais ou superiores a 9 apresentaram erros médios menores que 1% para grãos arredondados (CARDOSO, 2020).

2.4.1 Densidade de empacotamento de partículas maiores que 100 μm

O ensaio de compactação e vibração é utilizado para a determinação da densidade de empacotamento de materiais com partículas maiores que 100 μm . O procedimento consiste na utilização de um volume padrão de agregado, inserido em um tubo cilíndrico metálico de 150 milímetros de diâmetro e 226,50 milímetros de altura, fixo sobre uma mesa vibratória. Durante o processo, a amostra é comprimida por um peso cilíndrico maciço de 149 milímetros de diâmetro e 19,71 quilogramas (PEREIRA, 2021). A representação do processo pode ainda ser

visualizada de forma esquemática na Figura 6, no qual no início a amostra apresenta um volume inicial maior do que após a realização do protocolo de empacotamento.

Figura 6 - Procedimento do ensaio de compactação e vibração: a) Volume inicial do agregado e b) Volume final de agregado, após a realização do protocolo.



Fonte: Silva (2004).

Dessa forma, ao realizar o ensaio de compactação e vibração adotando um valor pré-determinado para o protocolo de empacotamento é possível calcular a densidade de empacotamento real das misturas, utilizando a equação 1.

$$\Phi = \frac{4 M_s}{\pi \cdot D_c^2 \cdot h \cdot \rho_s} \quad (1)$$

Onde:

Φ - Densidade de empacotamento real;

ρ_s - Densidade do material;

M_s - Massa do material seco;

D_c - Diâmetro interno do cilindro;

h - Distância entre a altura final da camada do material compactado e a borda do recipiente.

Posteriormente, é possível determinar a compacidade virtual do agregado utilizando a equação 2, uma vez que a equação relaciona as determinações de compacidade com o protocolo de compactação definido anteriormente.

$$K = \frac{1}{(\beta/\Phi)-1} \quad (2)$$

Onde:

Φ - Densidade de empacotamento real;

K - Índice de compactação, característica do protocolo de empacotamento;

β - Compacidade virtual do agregado.

2.4.2 Densidade de empacotamento de misturas binárias com partículas maiores que 100 μm

Quando se possui as informações dos resultados da densidade de empacotamento experimental de cada agregado é possível prever o comportamento das misturas binárias em diferentes teores. Esse método é utilizado quando o diâmetro dos agregados de uma das classes não é muito maior que o diâmetro da outra ($d_1 \geq d_2$), pois ocorre o que chamamos de interação parcial. Nesse caso, se um grão classe 2 for inserido entre um conjunto de grão maiores, e se não for mais capaz de caber no vazio, haverá uma diminuição do volume dos grãos da classe 1 (CARDOSO, 2020). Conhecidos os demais parâmetros, a densidade de empacotamento virtual da mistura (φ) pode ser determinada pela equação 3.

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{y_i/\beta_i}{1/\varphi - 1/\gamma_i} \quad (3)$$

Onde:

K - Índice de compactação, característica do protocolo de empacotamento;
 Y_i - Proporção da classe i na mistura binária;
 β_i - Compacidade virtual do agregado i;
 φ - Densidade de empacotamento virtual de misturas binárias;
 γ_i - Compacidade virtual da mistura quando a classe 1 é dominante.

2.4.3 Utilização de fibras no MEC

O procedimento de inclusão das fibras utilizado foi baseado no estudo realizado por Cardoso (2020), utilizando a metodologia de volume perturbado. A inclusão de fibras causa uma perturbação no empacotamento dos materiais e é definida através da densidade de empacotamento da combinação do agregado e do teor de fibra que será utilizado.

Para a determinação dos valores experimentais, pode-se realizar o ensaio de compactação e vibração de misturas de agregado e fibras, para isso, deve-se definir um volume fixo de agregado e realizar a inclusão das fibras nos teores que serão utilizados. Além disso, quando se possui informações sobre as características físicas da fibra e a densidade de empacotamento experimental do agregado é possível realizar a projeção do volume perturbado através da equação 4.

$$\beta_f = \beta (1 - \varphi_f - N_{sf} \cdot V_p) \quad (4)$$

Onde:

β_f - Compacidade virtual média de β , em uma mistura afetada pela inclusão das fibras;
 φ_f - Porcentagem de fibras no esqueleto granular;
 N_{sf} - Número de fibras por unidade de volume;
 V_p - Volume perturbado de uma fibra;
 β - Compacidade virtual do agregado não perturbada.

2.4.4 Densidade de empacotamento de partículas menores que 100 μm

Para determinar a densidade de empacotamento de partículas menores que 100 μm , seguiu-se o procedimento sugerido por De Larrard (1999) e descrito por Pereira (2021), conforme a Figura 7. Para a realização deste ensaio e da produção dos concretos, foi utilizado o misturador planetário Hobart, modelo N50, com motor de 1725 RPM. O equipamento possui três velocidades: baixa, média e alta. Foram inseridas 350 gramas do material analisado e uma quantidade inicial de 30 mililitros de água, sendo a mistura agitada em baixa velocidade durante 1 minuto. Em seguida, pequenas adições de água são efetuadas de forma sequencial, enquanto o material ainda está sendo agitado. Essas adições prosseguem até que se observe a formação do estado capilar no material, indicando que o nível de umidade desejado havia sido alcançado. O resultado do ensaio de demanda de água é necessário para compor o banco de dados do *software*, não sendo comparado com valores simulados.

Figura 7 - Fases visuais do ensaio de demanda d'água.



Fonte: Pereira (2021).

O ensaio é considerado subjetivo, já que a determinação do ponto de saturação é feita visualmente. Devido a essa característica do ensaio, a adição de água é realizada em pequenas quantidades, de forma a permitir que as mudanças de fase sejam perceptíveis visualmente (SOUZA, 2021).

2.5 Efeito da Sílica ativa em compósitos cimentícios

A sílica ativa (SF) é um material pozzolânico altamente reativo devido às suas características distintas, como um teor elevado de SiO_2 , um grau significativo de amorfismo e uma granulometria extremamente fina. Esse material desempenha um papel dual na microestrutura dos materiais cimentícios: primeiramente, atua de maneira pozzolânica, considerada uma reação química, na qual a sílica ativa interage com o CH (hidróxido de cálcio) liberado durante a hidratação do cimento, resultando na formação adicional de C-S-H (silicato de cálcio

hidratado), que tem a tendência de preencher os vazios capilares. Em segundo lugar, exerce um efeito de fíler, considerado físico, ao densificar a microestrutura. Isso ocorre porque as pequenas partículas da sílica ativa ocupam os espaços entre os grãos do cimento Portland, reduzindo assim a porosidade do material (LOTHENBACH *et al.*, 2011; e SOUZA, 2021).

A sílica ativa é um dos materiais cimentícios suplementares altamente reativos, podendo ser encontrado na forma densificada e não densificada, apresentando uma densidade aparente no estado solto de 150 e 350 kg/m³ e entre 350 e 700 kg/m³ (ABNT, 2012; e FRAGA *et al.*, 2020).

De acordo com o fabricante, TECNOSIL, as principais vantagens do produto estão relacionadas à sustentabilidade, pois resultam na redução do consumo de cimento. Além disso, no contexto das propriedades mecânicas, a substância demonstra a capacidade de conferir baixa permeabilidade, aprimorar a aderência entre a pasta e as armaduras, assim como entre a pasta e os agregados, e aumentar a coesão. Quando se trata da durabilidade de concretos e argamassas, o produto é eficaz em melhorar o desempenho, inibindo agressões químicas, prevenindo a penetração de íons cloreto, aumentando a resistência mecânica, apresentando alta resistência em ambientes agressivos, reduzindo a exsudação e aprimorando a resistência à abrasão (SOUZA, 2021).

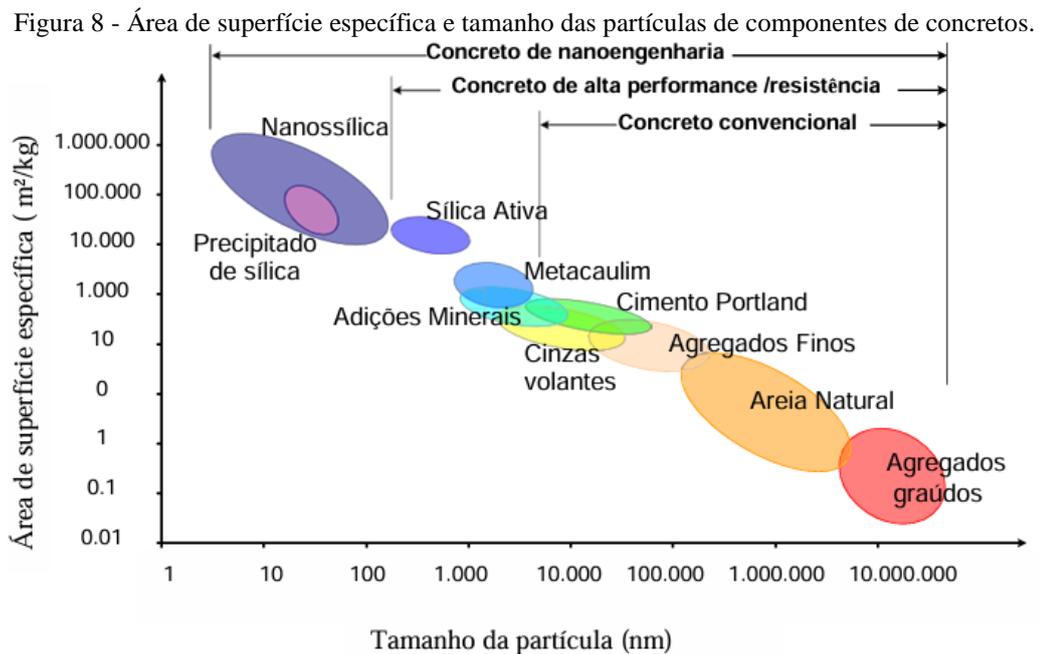
A sílica ativa é composta por partículas extremamente finas e apresenta uma propensão significativa ao aglomeramento, o que reduz a eficácia de sua utilização. Nesse sentido, quanto mais disperso esse material estiver, maiores serão os benefícios para as características do concreto. Portanto, indica-se a utilização de sílica ativa não densificada, uma vez que essa forma consegue aprimorar a microestrutura do material, otimizando seus resultados, além disso, ainda se faz necessário a utilização de algum método para dispersar os aglomerados e assim aumentar o seu potencial de reatividade (FRAGA *et al.*, 2020).

A ultrassonicação consiste em uma estratégia de melhoria da dispersão das partículas de sílica ativa. FRAGA *et al.* (2020) realizou um estudo sobre a aplicação desse método de dispersão em pastas contendo cimento e sílica ativa não densificada. A primeira mistura continha 100% de cimento, denominada REF; a segunda continha 90% de cimento + 10% de sílica ativa sem ultrassonicação, denominada SA10; e a terceira continha 90% de cimento + 10% de sílica ativa após a ultrassonicação, denominada SA10U. Os autores concluíram que das três misturas, a SA10 apresentou a menor resistência a compressão e que o processo de ultrassonicação fez com que a resistência à compressão da mistura SA10U fosse maior que a de referência. Os valores

de resistência média à compressão aos 28 dias para as misturas REF, SA10 e SA10U são, respectivamente, 66.8 MPa, 55.7 MPa e 71.9 MPa.

Para desenvolver o CUAD e o CEUAD, a sílica ativa é utilizada como um dos materiais cimentícios suplementares mais comuns, principalmente devido à sua granulometria (HABEL, GAUVREAU, 2008; PREM *et al.*, 2012; PHAM *et al.*, 2021; SOARES, 2021; LIU, WEI, 2022; YANG *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2022; CHEN *et al.*, 2023; e JUNIOR, 2023). Isso ocorre porque, além de contribuir com a reação pozolânica, a sílica ativa também atua como um fíler, ajudando no empacotamento dos outros componentes do concreto devido ao seu tamanho de partícula menor.

De acordo com Souza (2021) a utilização de partículas com granulometrias menores influencia diretamente nas características de resistência dos materiais. Essa afirmação vai de encontro com o Sobolev (2010) que explica que a utilização de materiais com partículas menores produz concretos de alta performance ou resistência, como pode ser visto na Figura 8.



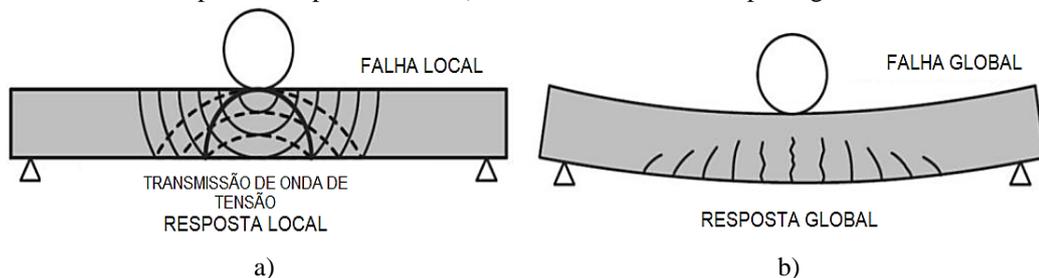
2.6 Comportamento ao impacto de estruturas de concreto

Atualmente existe uma grande necessidade de conhecer as respostas das estruturas quando expostas a condições de cargas dinâmicas e extremas, como as cargas de explosões e de impacto. Isso ocorre devido as estruturas estarem, ao longo da sua vida útil, suscetíveis diferentes carregamentos de impacto, por exemplo: ao impacto lateral devido à queda de rochas,

objetos pesados, impactos de veículos e embarcações e até impactos de projéteis (ZHANG *et al.*, 2021).

No geral, o carregamento de impacto consiste em um tipo de carregamento dinâmico e extremo, com durações muito menores que as de terremotos. Os tipos de impacto podem ser caracterizados de acordo com a sua intensidade e duração, sendo: a) carregamento quase-estático, no qual a estrutura atinge sua resposta máxima antes de terminar a duração do impacto; b) carregamento dinâmico, no qual a estrutura atinge sua resposta máxima quase ao mesmo tempo que termina a duração do carregamento de impacto; e c) carregamento impulsivo, no qual a duração do impacto termina antes de atingir a estrutura e a resposta máxima da estrutura. Com isso, verifica-se que a estrutura pode apresentar diferentes comportamentos, incluindo respostas localizadas e globais, de acordo com tipo de impacto a que foi submetido (ZHANG *et al.*, 2021). A Figura 9 apresenta as respostas de comportamento de estruturas submetidas ao impacto.

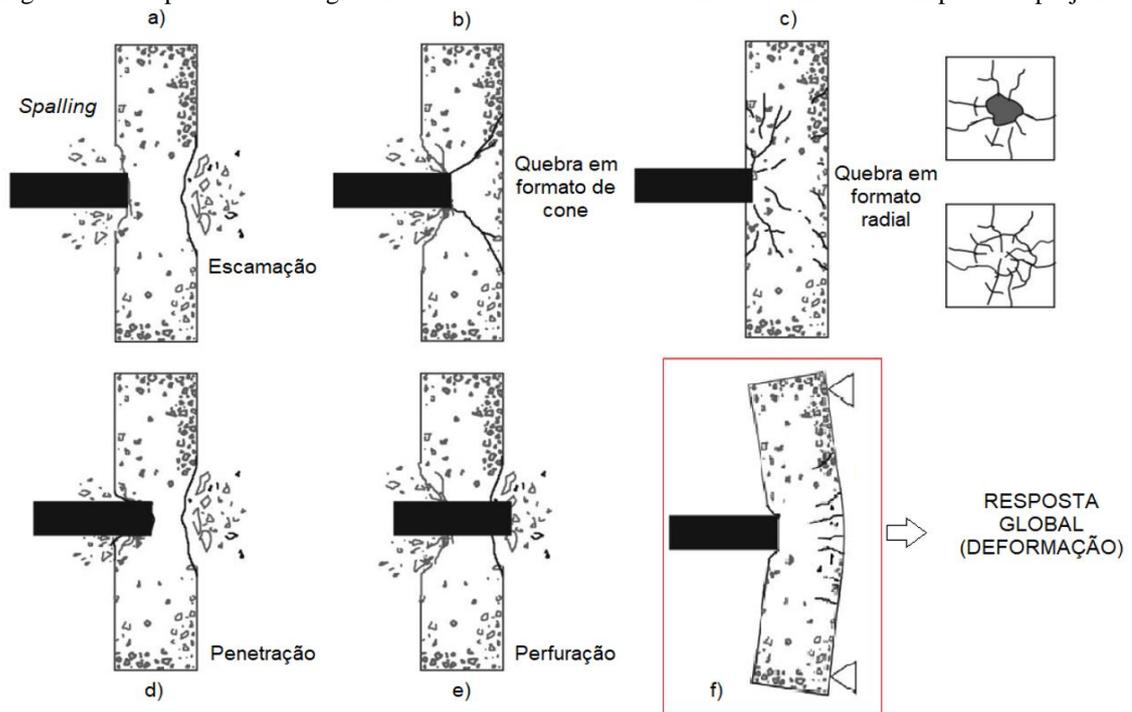
Figura 9 - Respostas locais e globais de vigas de concreto submetidas ao impacto: a) Propagação da onda de impacto e resposta local e b) Efeitos na estrutura e resposta global.



Fonte: FUJIKAKE *et al.* (2009).

Após a aplicação da carga de impacto, as respostas das estruturas de concreto podem apresentar três níveis de processos dinâmicos, sendo: a) efeito local concentrando, gerando penetração e/ou perfuração; b) efeito local prolongado devido à punção e tamponamento, podendo ser considerada como uma fase intermediária entre os efeitos locais e globais; e c) a resposta da estrutural geral. A resposta global da estrutura consiste em um dos grandes problemas estudados pela dinâmica estrutural, sendo que a análise de comportamento ao impacto se concentra nos efeitos locais e intermediários (LU, 2018). A Figura 10 apresenta os efeitos locais e globais de uma parede espessa de concreto armado submetida a uma carga de impacto de projétil.

Figura 10 - Respostas locais e globais de estrutura de concreto armado submetida ao impacto de projétil.



a) fragmentação do concreto; b) quebra do concreto em formato de cone; c) quebra do concreto em formato radial; d) penetração do elemento no concreto; e) perfuração do concreto; e f) Deformação e fissuras como resposta global da estrutura.

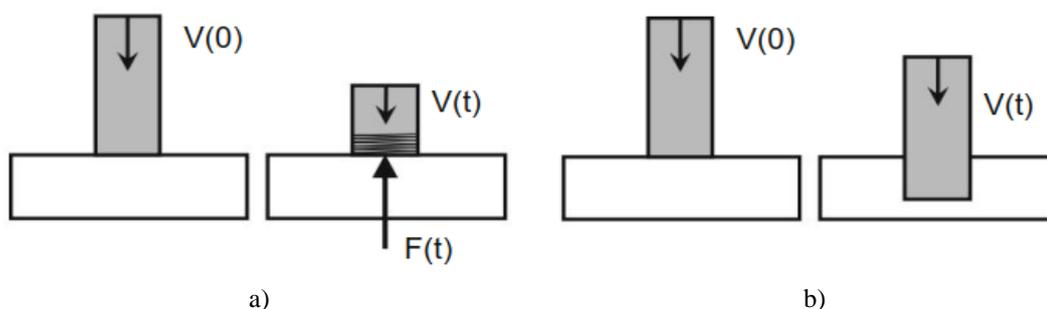
Fonte: Adaptado de Lu (2018).

Podemos observar a existência de diferentes respostas ao impacto, sendo: a) o concreto se fragmenta devido ao impacto exceder a resistência à compressão na face frontal, e pode ocorrer a escamação na face traseira devido a onda de estresse refletida (ver Figura 10a); b) devido ao alto impacto exercido a capacidade bruta de cisalhamento do elemento é excedida, causando rachaduras ou formação do cone de cisalhamento (ver Figura 10b); c) a formação do cone é frequentemente associado com a fratura em ambas as faces do elemento, com uma marcação característica radial (ver Figura 10c); d) ocorre a penetração do projétil através da fragmentação e tunelamento (ver Figura 10d); e) o projétil consegue perfurar completamente o elemento, apresentando uma velocidade residual na saída (ver Figura 10e); e f) ocorre uma deformação global da estrutura, com a presença de trincas, sendo frequentemente presente em elementos relativamente flexíveis (ver Figura 10f) (LU, 2018).

Um conceito bastante importante no estudo de comportamento ao impacto consiste nos conceitos de *soft impact* e *hard impact*. No *soft impact* a estrutura resistente permanece indeformada durante o processo, de modo que a energia cinética gerada pelo corpo que bate o faz deformar. No caso do *hard impact*, o corpo que bate é virtualmente rígido e a energia

cinética é absorvida pela estrutura resistente, completamente ou parcialmente, fazendo com que a estrutura deforme (LU, 2018). A Figura 11 apresenta os dois tipos de impacto.

Figura 11 - Comportamento da estrutura sob: a) *soft impact* e b) *hard impact*.



Fonte: Lu (2018).

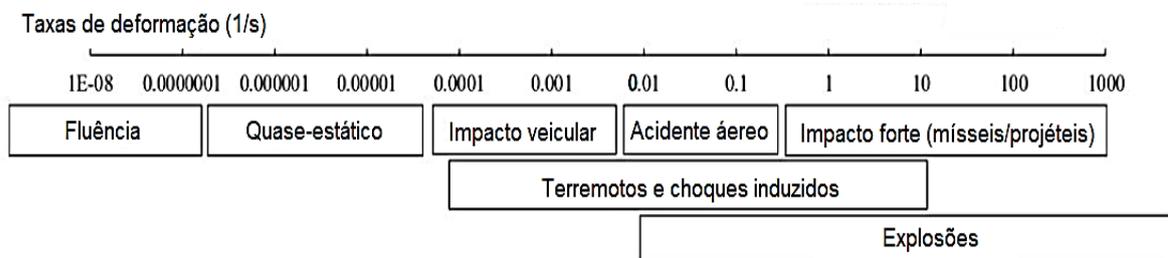
O comportamento ao impacto também pode ser classificado de acordo com a velocidade de aplicação da carga, podendo ser considerado impacto de alta ou baixa velocidade. Para velocidades na ordem de 10 m/s as falhas são semelhantes ao processo estático, ocorrendo somente uma maior tendência de ocorrência de dano local ou falha por cisalhamento, desta forma, em impactos de baixa velocidade a resposta local da estrutura é controlada pelo efeito global. No impacto de alta velocidade o dano local é significativo, e pode passar de fragmentação para penetração e perfuração, conforme a velocidade de impacto aumente (RP, 1976).

O concreto consiste em um material quase-frágil, composto geralmente por agregados graúdos, areia e cimento. A sua falha envolve processos mecânicos complexos, podendo ocorrer rachaduras e trincas. Com a aplicação de cargas que geram altas taxas de deformação, a velocidade de aplicação e o acúmulo de tensão interagem com o acúmulo e propagação do dano, mostrando a sensibilidade à taxa de deformação nas propriedades macroscópicas do concreto (LU, 2018). O crescente interesse pelos estudos sobre os efeitos da taxa de deformação está associada com aspectos de segurança das estruturas, que podem ser submetidas a cargas rápidas e acidentais.

Verificou-se que sob condições de impacto ocorre uma maior quantidade de fraturamento do que em condições estáticas, além disso, foi observado que concretos constituídos por agregados com partículas menores apresentam uma menor sensibilidade as taxas de carregamento (ZIELINSKI, 1984). Esse fato pode ser justificado pela resistência dos agregados tender a ser cada vez mais solicitada quando submetidos a aplicação de cargas, o que contribui para o

aumento da resistência à compressão em situações dinâmicas (LU, 2018). A Figura 12 apresenta regimes de taxas usuais de deformação do concreto armado.

Figura 12 - Regimes de taxas de deformação.



Fonte: YOO e BANTHIA (2019).

O comportamento das armaduras com barra de aço também é considerado de grande importância, pois influenciará nas deformações das estruturas de concreto e na sua capacidade de absorver energia sob carregamentos de impacto, ademais, além da resistência à tração e compressão, a aderência das barras de aço deformadas também é influenciada pelas taxas de carregamento (ZIELINSKI, 1984).

Com relação ao CRF, a sua resistência também é sensível à taxa de carregamento, devido ser mais resistente ao crescimento de fissuras e trincas, e pelo caminho da trinca ser alterado e encurtado devido às fibras (YOO; BANTHIA, 2019). Foram verificadas algumas descobertas úteis, como: a) ao incorporar as fibras existe uma maior resistência ao crescimento de trincas, independente do comprimento da trinca; b) a resistência ao crescimento da trinca aumenta de acordo com o aumento da energia aplicada e da taxa de carregamento; c) uma taxa de impacto mais alta conduz a um aumento da extensão da fissura mais rapidamente; e d) a incorporação de fibras diminui a taxa de crescimento de trincas (BINDIGANAVILE; BANTHIA, 2005). Além disso, devido às fibras estarem dispostas por toda a extensão dos elementos estruturais, esta proporciona maior resistência às cargas estáticas, dinâmicas e de impacto que o concreto armado convencional, que devido à necessidade de cobrimento das barras longitudinais apresenta regiões externas sem reforço, o que facilita a formação de fissuras, trincas e repostas locais mais graves que o CRF.

2.6.1 Determinação de resistência ao impacto do concreto

Para a determinação da resistência ao impacto existem vários métodos de ensaios, como o *Split-Hopkinson*, Charpy e Izod, testes de impacto balístico e *Drop-Weight* (YOO; BANTHIA, 2019).

O teste *Split-Hopkinson* é adotado para avaliar os comportamentos dinâmicos de tração e compressão do concreto. Em geral, as premissas básicas consistem em: a) propagação do pulso de tensão e b) na verificação da uniformidade de tensão entre as barras e o corpo de prova. Esse teste inclui várias barras de aço, sendo circulares e sólidas, que estão alinhadas com o corpo de prova, estando este no meio de duas barras longas. Aplica-se um pulso de tensão pela arma de pressão que passa pelas barras e pelo corpo de prova, sendo este pulso medido de ambos os lados e comparado, desta forma, consegue-se verificar como a transmissão e absorção de energia diferem de acordo com o objeto de estudo.

Os testes de Charpy e Izod são ensaios que foram desenvolvidos inicialmente para realizar testes em metais, pelo fato de o pêndulo de Charpy ser facilmente instrumentado e utilizado, podendo fornecer informações sobre dissipação e absorção de energia. O corpo de prova consiste geralmente em uma viga, com espessura considerável, que pode conter um entalhe. No geral, as diferenças entre os testes consistem na condição de apoio, pois no teste de impacto de Izod o corpo de prova é engastado na vertical, com a viga estando em balanço, e apresenta variação no formato do martelo e no ensaio de Charpy o corpo de prova consiste em uma viga biapoiada (SILVA, 2004).

Os testes de impacto balístico podem ser feitos através de armas de pressão a gás, como o nitrogênio, com a velocidade de impacto determinada utilizando sensores ópticos (SILVA, 2004). Pode-se ainda avaliar quantitativamente a resistência ao impacto usando danos locais à placa ou laje de concreto, verificando os diâmetros das crateras das faces frontal e traseira, a profundidade de penetração, velocidade residual do projétil e perda de peso (YOO; BANTHIA, 2019).

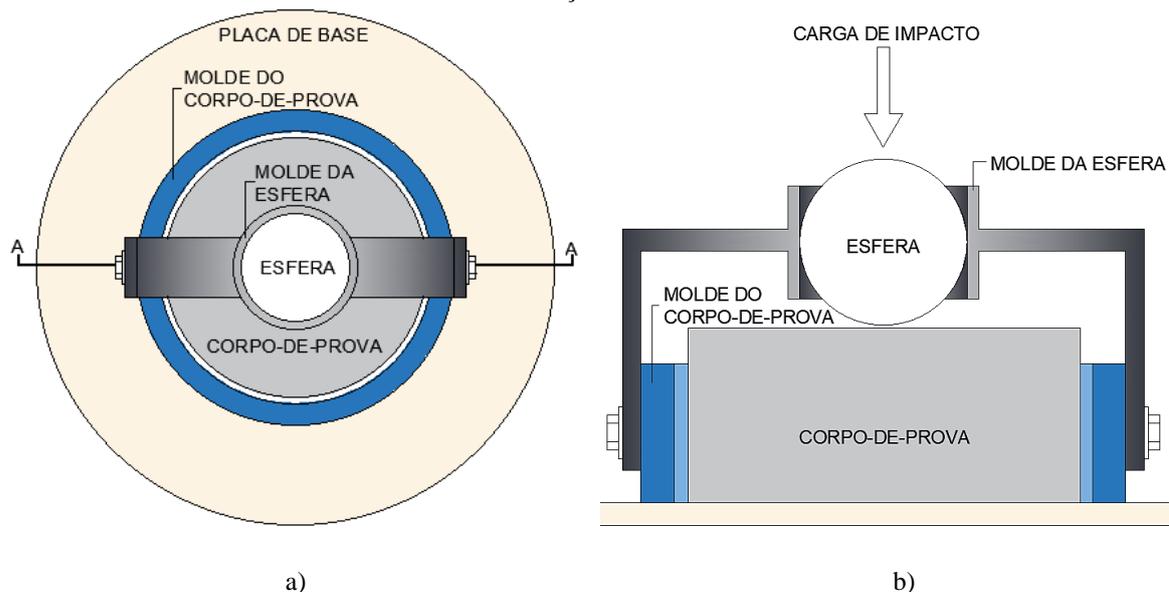
O ensaio utilizado neste trabalho consiste no *Drop-Weight*, que segue a recomendação do ACI COMMITTEE 544 (2002) e consiste em um dos mais simples ensaios de impacto. Sua premissa consiste na aplicação de um impacto repetido, quantificando o número de golpes necessários para causar níveis de deformação especificados ou a fratura do material.

Com relação ao equipamento do ensaio, a ACI COMMITTEE 544 (2002) cita ser necessário apresentar: 1) um peso de 10 lb (4,54 kg) que deve cair de uma altura de 18-in (457 mm); 2) uma esfera de aço de 2 ½" (63,5 mm) de diâmetro; 3) uma placa de base plana com suporte de posicionamento. 4) Molde de encaixe do corpo de prova de 6" (152 mm) de diâmetro interno por 2 ½" (63,5 mm) de espessura. Os corpos de prova devem apresentar espessura de 2 ½" (63,5

mm) por 6" (152 mm), utilizando apenas uma camada. As amostras podem ser confeccionadas com moldes de espessura 2 ½" (63,5 mm) ou podem ser retiradas de corpos de prova cilíndricos de tamanho convencional, que são os utilizados em ensaios de compressão, sendo essa última a opção mais recomendada. No caso da utilização de fibras que apresentem comprimento maior que 20 mm, deve-se utilizar as amostras retiradas de cilindros de tamanho convencional para minimizar o efeito parede que leva a um alinhamento preferencial das fibras.

O peso de queda é deixado cair repetidamente até que se obtenha o número de golpes necessários para gerar a primeira rachadura e a falha final. Vale ressaltar que os resultados desse teste apresentam uma alta variabilidade, influenciada principalmente pelo tipo de mistura, teor e tipo de fibra (ACI COMMITTEE 544, 2002). A Figura 13 apresenta a instrumentação deste ensaio.

Figura 13 - Detalhe do equipamento do teste de queda de peso repetido (*Drop-Weight*): a) vista em planta; b) seção AA.



Fonte: Adaptado da ACI COMMITTEE 544 (2002).

Abid *et al.* (2020) apresentou 3 fatores que podem influenciar na alta dispersão dos resultados deste ensaio, sendo: a) a configuração da aplicação de carga sobre uma esfera, no qual as fissuras podem surgir em qualquer direção; b) O critério de consideração para finalização do ensaio, que pode sugerir uma contagem equivocada de quedas, uma vez que geralmente a finalização ocorre quando o corpo de prova atinge o molde em pelo menos 3 pontos; e c) As diferenças nas técnicas de produção do corpo de prova, que pode ser produzido nas dimensões sugeridas pelo teste ou retirado de corpos de prova cilíndricos utilizados nos ensaios de resistência à compressão. Com isso, os autores sugeriram algumas modificações no ensaio para

que a divergência dos resultados seja minimizada. As principais modificações consistiram na utilização de uma cama de areia para que o corpo de prova não fique em contato direto com a placa metálica de base, mudança da utilização da esfera por barras com comprimento igual ao diâmetro das amostras e utilização de entalhes que facilitem a aplicação das forças, conforme Figura 14. A utilização da cama de areia consiste em revestimento na parte inferior no corpo de prova que possibilita uma redução na variação dos resultados do ensaio e a utilização da aplicação linear de carga garante que a formação das fissuras aconteça no sentido da aplicação, permitindo a facilidade de validação do ensaio e a possibilidade de incrementos de medições quantitativas.

Figura 14 - Sugestões de modificação no ensaio.

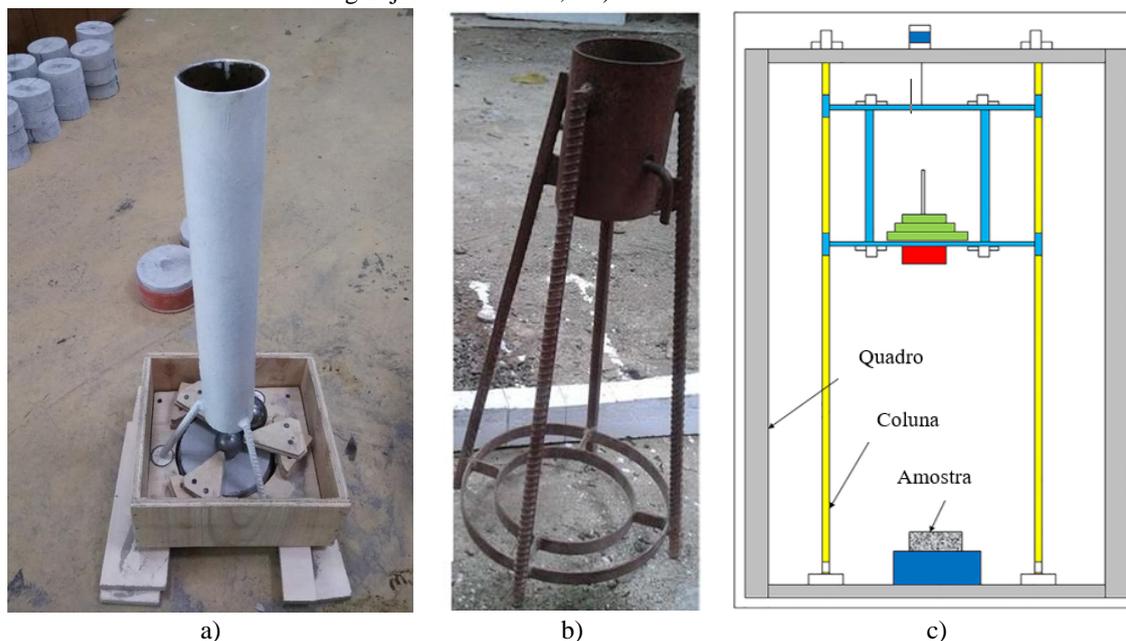


Fonte: Abid *et al.* (2020).

Os resultados mostraram que a utilização da cama de areia gerou uma menor dispersão dos resultados e que a eficiência da sua utilização era influenciada pelo tipo de corpo de prova e forma de aplicação da carga, sendo mais eficaz nos testes com utilização de entalhes e aplicação de carga em cruz ou linha (ABID *et al.*, 2020). Outra modificação importante foi sugerida por Liu e Wei (2021) no qual adotaram a utilização de um peso de queda de 22 lb (10 kg) nos ensaios com CUAD.

Outros estudos também usaram como referência as recomendações da ACI COMMITTEE 544 (2002), ver Figura 15. Gonen (2018) definiu um aparato para resistência ao impacto baseado em quedas repetidas e definiu uma metodologia para verificação da resistência ao congelamento do concreto emborrachado contendo 1%, 2% 3% e 4% de substituição de agregados miúdos por ABR.

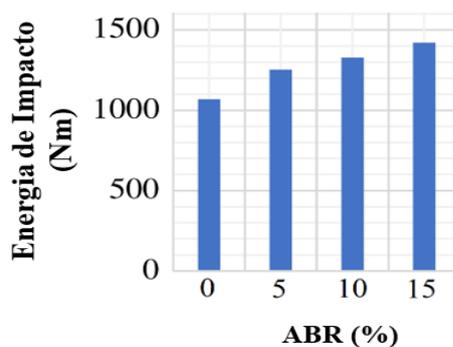
Figura 15 - Aparatos definidos para estudos com peso de queda repetido (*Drop-Weight*): a) Gonen; b) Raj, Nagarajan e Pallikkara; e c) Mahakavi e Chithra.



Fonte: Gonen (2018); Raj, Nagarajan e Pallikkara (2022); e adaptado de Mahakavi e Chithra (2019).

Raj, Nagarajan e Pallikkara (2022) realizaram um estudo sobre resistência ao impacto de concreto comum utilizando o ABR em teores de 0%, 5%, 10% e 15%, mantendo o volume total constante e substituindo o equivalente em volume da massa de areia pelo ABR. Os corpos de prova foram produzidos nas dimensões $\Phi 150 \times 63.5\text{mm}$, além disso, apresentava um peso de queda de 3.54 kg que caía de uma altura de 440 mm, ver Figura 15. Os autores verificaram que acima de 15% de substituição de areia por ABR o concreto sofreu uma redução significativa nos valores de resistência à compressão, cerca de 26%. Foi verificado também que o aumento da energia de impacto necessária para a ruptura dos corpos de prova cresceu juntamente com o teor de ABR, com um aumento de cerca de 30% com a utilização de 15% de ABR. Os valores de energia de impacto podem ser verificados na Figura 16.

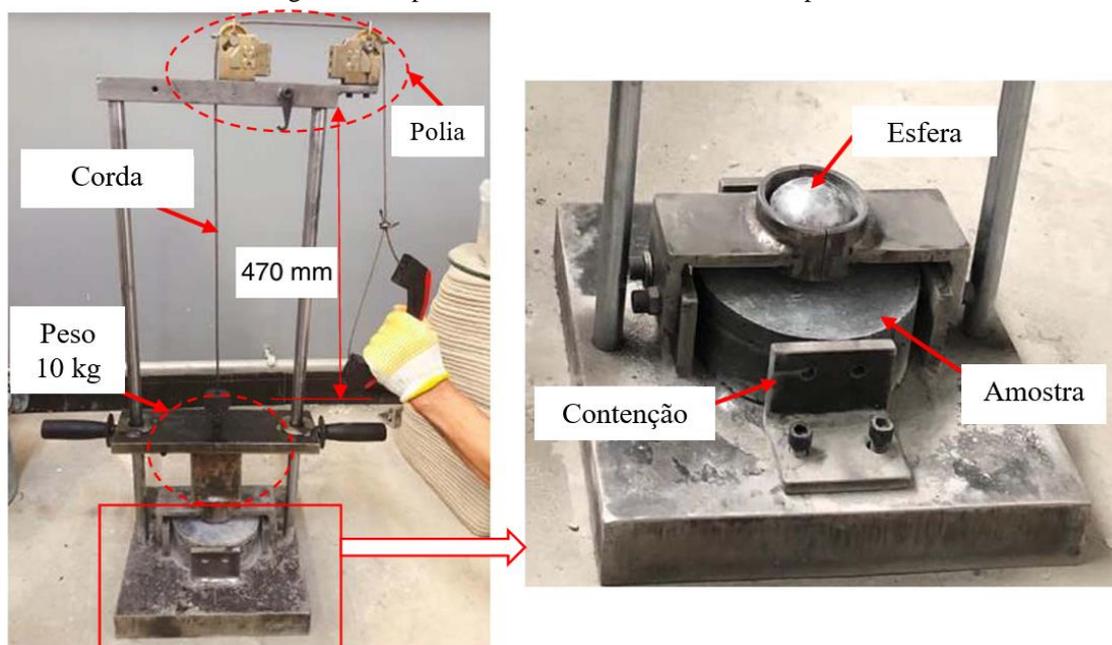
Figura 16 - Valores de energia de impacto necessária para ruptura das amostras.



Fonte: Adaptado de Raj, Nagarajan e Pallikkara (2022).

Mahakavi e Chithra (2019) definiu um aparato de resistência ao impacto para avaliar teores de 0%, 0.25%, 0.5% e 0.75% de fibras com gancho ondulada, ver Figura 15. No geral, apesar de apresentarem o mesmo fundamento metodológico, que consiste em um peso conhecido que cai em queda livre de uma altura pré-determinada, existem diversas variações nos aparatos e formas de aplicações de cargas nos estudos sobre o ensaio *Drop-Weigth*. Dos trabalhos encontrados na literatura, o de Liu e Wei (2022) apresentaram uma proposta de estudo sobre impacto semelhante ao utilizado nesta pesquisa, conforme Figura 17.

Figura 17 - Aparato de ensaio de resistência ao impacto.



Fonte: Adaptado de Liu e Wei (2022).

Os autores produziram 3 tipos de concretos para o estudo, concreto convencional, CUAD sem fibras e CUAD com fibras, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Dosagem de concretos utilizados por Liu e Wei em kg/m³.

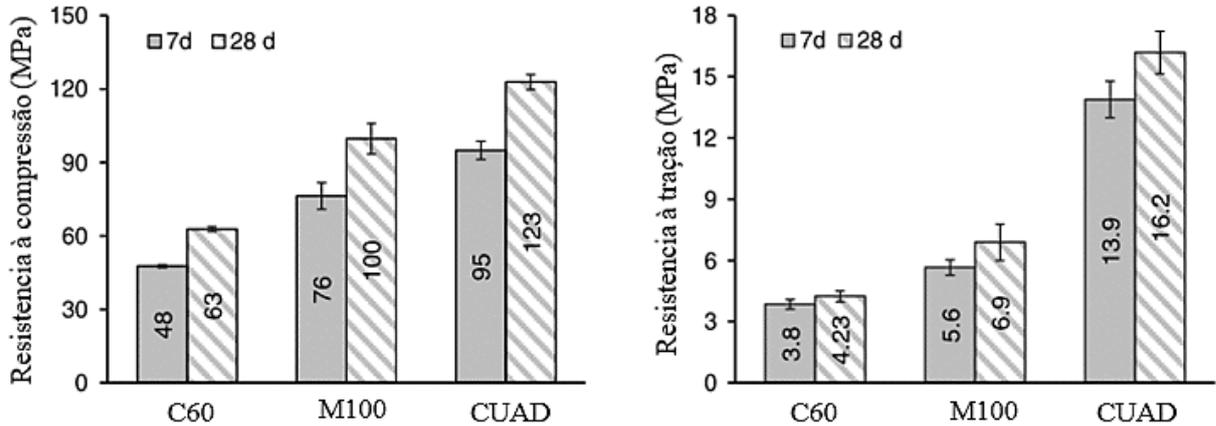
Descrição	Cimento	Areia	Brita	Pó de Quartzo	Sílica Ativa	a/c	SP (%)	FI
Concreto Convencional (C60)	480	660	1095	0	0	0.42	0	0
MATRIZ CUAD (M100)	715	1180	0	165	135	0.2	1	0
CUAD	715	1180	0	165	135	0.2	1	157

Fonte: Liu e Wei (2022).

Para a determinação da resistência à compressão, impacto e tração, foram fabricados corpos de prova cúbicos com dimensões de 100 × 100 × 100 mm para ambos os ensaios. O procedimento de produção dos concretos envolveu a vibração por 15 segundos, seguida pela cobertura com filme plástico e o período de cura em temperatura ambiente por 24 horas. Após esse processo,

os corpos de prova foram desmoldados e mantidos em câmara úmida até as idades necessárias para a realização dos testes (LIU; WEI, 2022). Os resultados das resistências a compressão e tração podem ser verificados na Figura 18.

Figura 18 - Resultados de resistência encontrados por Liu e Wei.

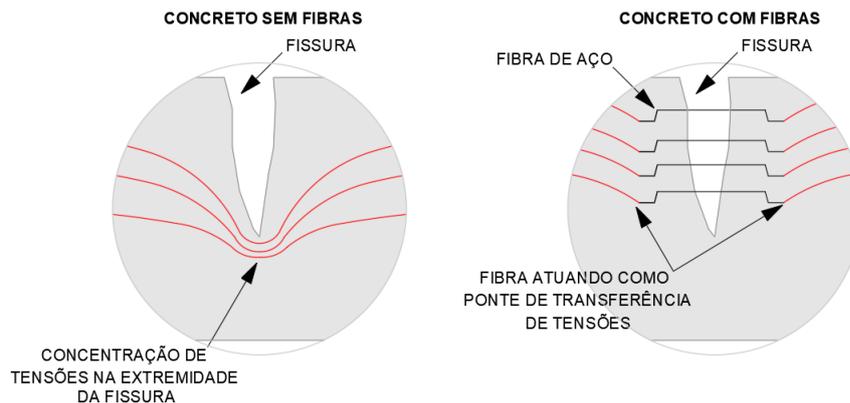


Fonte: Adaptado de Liu e Wei (2022).

2.6.2 Comportamento ao impacto do concreto reforçado com fibras (CRF)

A adição de fibras com elevado módulo de elasticidade, alta resistência e teores adequados no concreto reduz significativamente a sua fragilidade característica, devido a ação das “pontes de fibras”, que atuam na transferência de tensões, apresentadas esquematicamente na Figura 19.

Figura 19 - Efeito da “ponte de fibras”.



Fonte: Adaptado de Medeiros (2018).

Esse efeito reduz a velocidade de propagação das fissuras, que passam a apresentar um comportamento pseudo-dúctil, ou não frágil, com uma maior capacidade resistente na etapa de pós-fissuração (MEDEIROS, 2018).

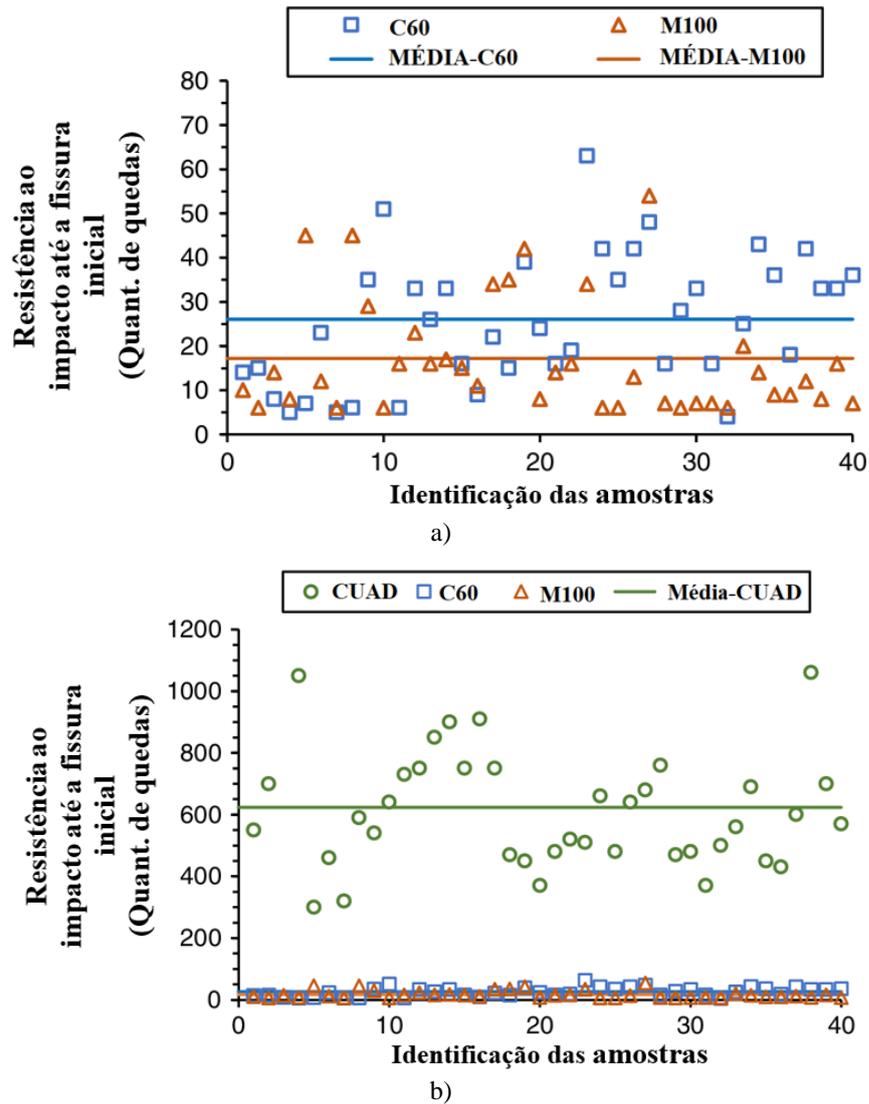
Conforme descrito anteriormente, Pham *et al.* (2021) desenvolveu o CUAD e CEUAD, reforçados com fibras industriais, substituindo a areia por ABR nos teores de 0%, 10%, 20% e 40%, do volume, conforme apresentado na Tabela 3. Os autores analisaram a absorção de energia utilizando o ensaio *Split-Hopkinson*, que consiste na aplicação de um impacto de alta velocidade e *hard impact*, e verificaram que os resultados foram sensíveis à taxa de deformação e que essa sensibilidade aumentou com aumento do teor de ABR. Os valores para a absorção de energia (kN/m^2) variam para os corpos de prova sujeitos a diferentes pressões e teores de ABR. Para uma pressão de 300 kPa, os valores observados são: com 0% de ABR, 612.9, 749.4 e 664.6 kN/m^2 , e com 40% de ABR, 626.0 e 943.8 kN/m^2 . Já para uma pressão de 400 kPa, os valores são: com 0% de ABR, 1133.9 e 871.3 kN/m^2 , e com 40% de ABR, 1457.1, 1277 e 1102.6 kN/m^2 .

Chen *et al.* (2023) analisou a energia dissipada utilizando o ensaio *Split-Hopkinson*, que consiste na aplicação de um impacto de alta velocidade e *hard impact*. Verificaram que os valores de energia dissipada foram muito maiores quando utilizada fibra industrial, no teor fixo de 2% do volume, no qual foram registrados valores de 103.89, 145.7, 175.25 e 208.67 J, respectivamente. Quando consideradas somente as FARP, os valores aumentaram de acordo com o aumento do teor de fibra reciclada. Para 1% de FARP, os valores foram de 68.97, 89.02, 127.59 e 151.0 J; 2% de FARP foram de 75.95, 100.59, 129.17 e 165.15 J; 3% de FARP foram de 89.63, 130.43, 167.02 e 198.15; e 4% de FARP foram de 84.96, 120.28, 154.35 e 179.98.

Liu e Wei (2022) realizaram ainda o estudo sobre resistência ao impacto, os autores seguiram as recomendações da ACI COMMITTEE 544 (2002), ou seja, baixa velocidade e *soft impact*, sendo o aparato apresentado na Figura 17. Os autores perceberam que existe uma certa dificuldade na utilização deste ensaio para utilização com concretos com alta resistência, e optaram pela quantificação da quantidade de quedas necessárias para realizar a primeira fissura. As quantidades mínimas e máximas de quedas realizadas para o surgimento da primeira fissura nas amostras são, respectivamente, 4 e 63 para o C60, 6 e 54 para o M100 e 300 e 1240 para CUAD. A Figura 20 apresenta a distribuição de quedas realizadas no estudo.

Desta forma, verifica-se que a utilização das fibras no concreto proporciona um aumento na sua resistência característica, além de um aumento da absorção de energia, pelo efeito das pontes de fibra.

Figura 20 - Distribuição de quedas para os concretos C60, M100 e CUAD: a) Valores médios para C60 e M100, e b) Valores médios para o CUAD.



Fonte: Adaptado de Liu e Wei (2022).

3 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos do trabalho, foram utilizados quatro diferentes materiais ao longo da pesquisa realizada: concreto autoadensável sem armadura (CAA-SA), concreto autoadensável com armadura (CAA-CA), concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) e concreto emborrachado de ultra-alto desempenho (CEUAD). O CAA foi obtido numa empresa de construção enquanto o CUAD e o CEUAD foram dosados e produzidos nos laboratórios da UnB. Os principais ensaios realizados foram ensaios de impacto, com cilindros de 149 mm de diâmetro e 65 mm de altura, e ensaios preliminares de impacto com grelhas de drenagem. Também foram realizados ensaios mecânicos de caracterização dos diferentes concretos utilizados: ensaios de compressão e de flexão. A Tabela 11 apresenta um resumo dos concretos utilizados na pesquisa e o número de corpos de prova por ensaio mecânico realizado. Detalhes sobre os materiais utilizados e a descrição dos ensaios realizados são apresentados nas seções subsequentes.

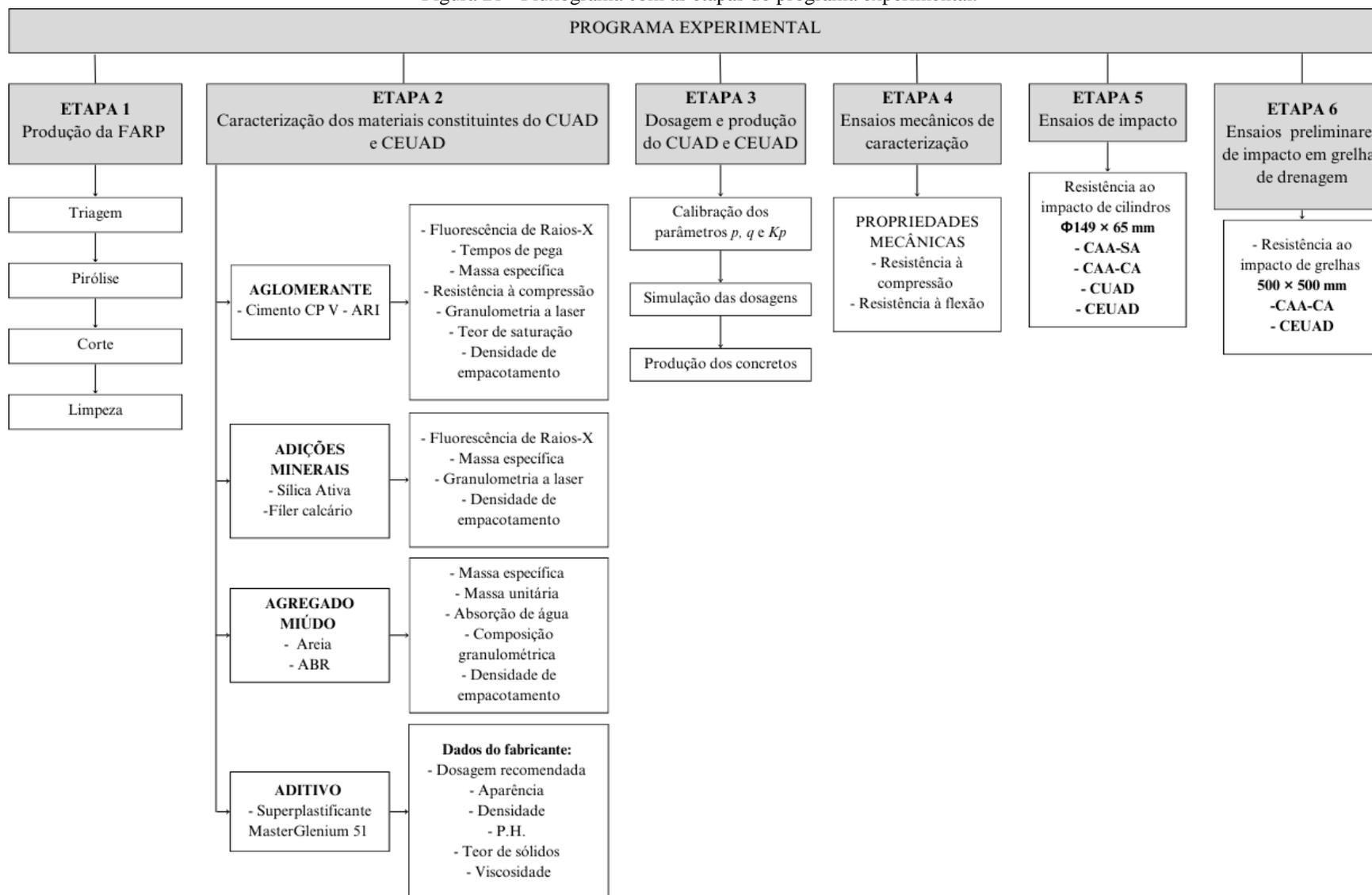
Tabela 11 - Características dos concretos e ensaios mecânicos.

Nomenclatura	Concreto	Número de corpos de prova por ensaio			
		Compressão	Flexão	Impacto	Impacto em grelhas
CAA-SA	Concreto autoadensável sem armadura	4	3	4	0
CAA-CA	Concreto autoadensável com armadura	-	-	4	1
CUAD	Concreto de ultra-alto desempenho	4	3	4	0
CEUAD	Concreto emborrachado de ultra-alto desempenho	4	3	4	1

Fonte: Elaboração própria.

O programa experimental foi dividido em seis etapas distintas: a primeira consiste na obtenção das fibras de aço recicladas de pneus (FARP), a segunda engloba a caracterização dos materiais constituintes utilizados no CUAD e CEUAD, a terceira abrange a dosagem e produção do CUAD e CEUAD, a quarta fase consiste na realização dos ensaios mecânicos de caracterização, a quinta fase consiste na realização dos ensaios de impacto com cilindros e a sexta fase consiste na realização de ensaios preliminares de impacto com grelhas de drenagem. O fluxograma apresentado na Figura 21 apresenta de forma resumida o programa experimental.

Figura 21 - Fluxograma com as etapas do programa experimental.



Fonte: Elaboração própria.

A maior parte do programa experimental foi executado nos Laboratórios de Ensaio de Materiais (LEM) e de Estruturas (LABEST) da Universidade de Brasília. Além disso, a maioria dos ensaios de caracterização dos materiais e produção dos concretos foi realizado no LEM. A espectrometria por fluorescência de raio X (EDX) e o procedimento de ultrassonicação foram conduzidos no Instituto de Química (IQ-UnB). Os ensaios de granulometria a laser foram realizados em colaboração com a Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA). Os ensaios de resistência ao impacto foram realizados no LABEST.

3.1 Materiais

3.1.1 Concreto autoadensável

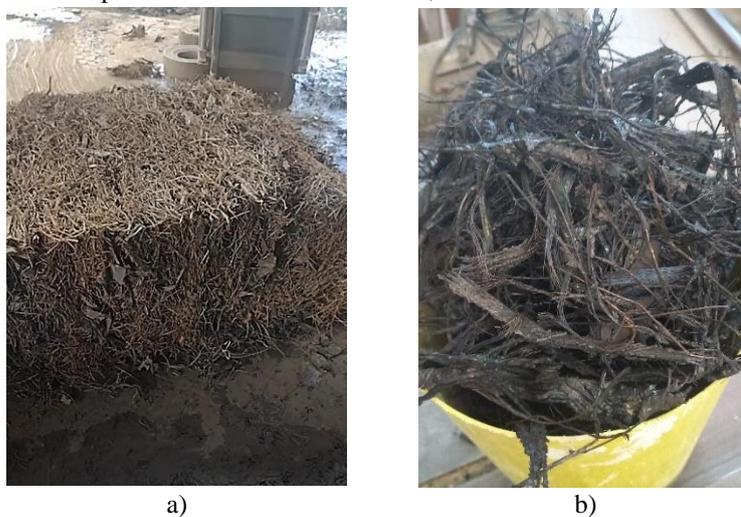
O concreto autoadensável utilizado neste estudo foi fornecido pela empresa Tecna Construtora. As formas foram levadas até uma das obras da empresa e preenchidas com o mesmo material utilizado na concretagem de vigas e lajes de uma edificação.

3.1.2 CUAD e CEUAD

3.1.2.1 Fibras de aço recicladas de pneus

As fibras de aço reciclado provenientes de pneus não estão disponíveis comercialmente, exigindo, assim, que fossem produzidas para esta pesquisa. Nesse contexto, contou-se com a colaboração da empresa Ecopneus, que forneceu o aço previamente separado dos pneus, inicialmente destinado à venda como sucata. A Figura 22 apresenta como o material foi disponibilizado.

Figura 22 - Malha de aço reciclada de pneus: a) após a separação da borracha na beneficiadora de pneus e b) aspecto da malha como recebido, com borracha aderida.



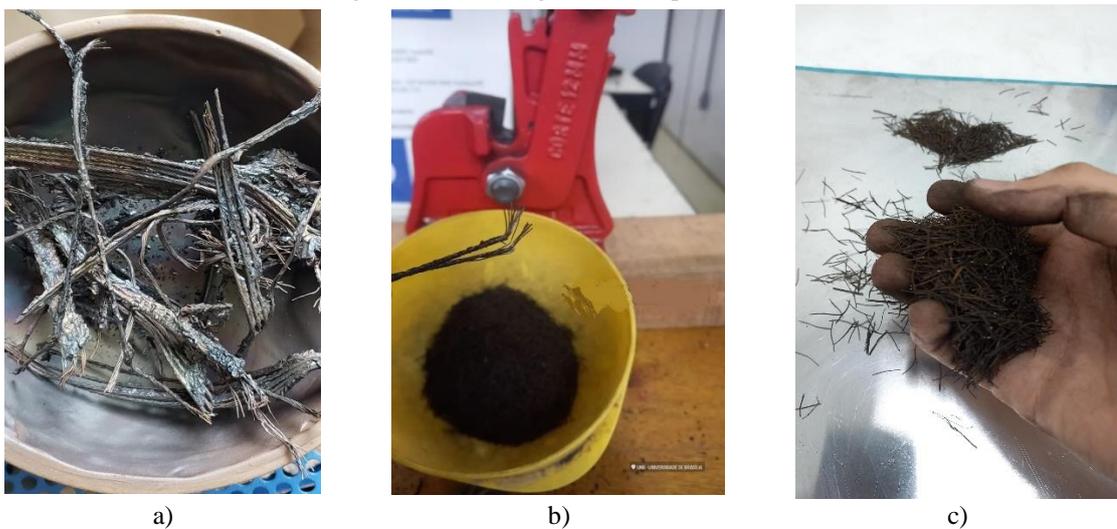
Fonte: Elaboração própria.

Apesar de estar separado dos pneus, o aço ainda apresentava uma grande quantidade de borracha aderida, inviabilizando o seu uso direto. Para isso, foi necessário realizar os processos de triagem, pirólise, corte e limpeza. A triagem consiste em uma separação inicial dos materiais, uma vez que a malha de aço de pneus apresenta cabos de aço de diferentes diâmetros, sendo selecionados fios com diâmetros máximos de 0.40 mm. Esse procedimento é realizado de forma visual, sendo facilmente identificável materiais com diâmetros semelhantes, entretanto, essa separação não é totalmente eficaz devido a borracha estar aderida ao material.

Para realizar a retirada da borracha aderida no aço foi necessário realizar o procedimento de pirólise. Para isso utilizou-se a metodologia empregada por Frazão (2019), que consistia no aquecimento do material até 350 °C. O aquecimento foi gradual, demorando 1 hora para alcançar 350 °C e mantendo a temperatura constante por mais 1 hora, após isso o forno foi desligado. O procedimento foi repetido cerca de 10 vezes até obter-se uma quantidade superior à necessária para a produção dos CUAD e CEUAD.

Para produção das fibras foi necessário selecionar novamente os filamentos que apresentavam os cabos com fios de diâmetro adequado, cerca de 0.40 mm, sendo posteriormente cortados em comprimentos de 15 a 20 mm com o auxílio de um cortador de vergalhão. A Figura 23a) apresenta o aço após o procedimento de aquecimento, a Figura 23b) apresenta o procedimento de corte e a Figura 23c) apresenta as fibras de aço reciclado confeccionadas.

Figura 23 - Procedimento de produção das FARP: a) Material após o aquecimento, b) Procedimento de corte do aço e c) Fibra de aço reciclada produzida.



Fonte: Elaboração própria.

Durante o procedimento de corte a borracha se separa totalmente do aço, mas é necessário realizar um procedimento de limpeza e seleção. Para separar as fibras dos resíduos de borracha

foi utilizado um imã, sendo retirados os filamentos que apresentavam comprimentos visualmente maiores que 20 mm, que geralmente consistiam em poucas unidades. Além disso, foi realizado um peneiramento utilizando um agitador mecânico, sendo utilizadas frações de 300 gramas por vez, e peneiras de 0.60 e 0.30 mm. As fibras que ficavam na peneira de fundo eram retiradas utilizando novamente o imã. Os valores médios de diâmetro e comprimento foram 0.36 mm e 15.42 mm, respectivamente, o comprimento variando entre 8.26 e 16.88 mm.

3.1.2.2 Cimento Portland

Optou-se pelo uso do Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) da marca Nacional como aglomerante, em conformidade com a norma NBR 16697 (ABNT, 2018). A escolha desse aglomerante visou empregar o cimento com a menor quantidade possível de adições, tornando-o o mais puro em comparação às alternativas disponíveis no mercado. Os ensaios realizados para a classificação física do cimento estão detalhados na Tabela 12, incluindo os métodos empregados para a caracterização do material e os resultados obtidos.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios para a caracterização física do aglomerante.

Propriedade	Resultados	Método de ensaio	Requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018)
Tempos de início de pega (min)	135	NBR 16607 (ABNT, 2018)	≥ 60
Tempos de fim de pega (min)	170		≤ 600
Diâmetro (µm)	D10	Granulometria a laser	-
	D50		-
	D90		-
Massa específica (g/cm ³)	3.00	NBR 16605 (ABNT, 2017)	-
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	NBR 7215 (ABNT, 2019)	≥ 14.0
	3 dias		≥ 24.0
	7 dias		≥ 34.0
	28 dias		-

Fonte: Elaboração própria.

Além dos ensaios listados anteriormente, foi realizado o ensaio de espectrometria por fluorescência de raio X (EDX) para a caracterização química do cimento. Por meio do EDX foi possível obter os compostos químicos constituintes da amostra analisada de CP V-ARI e os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 13. No geral, o cimento atendeu a todos os requisitos dispostos na NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 13 - Resultados obtidos para a caracterização química do cimento.

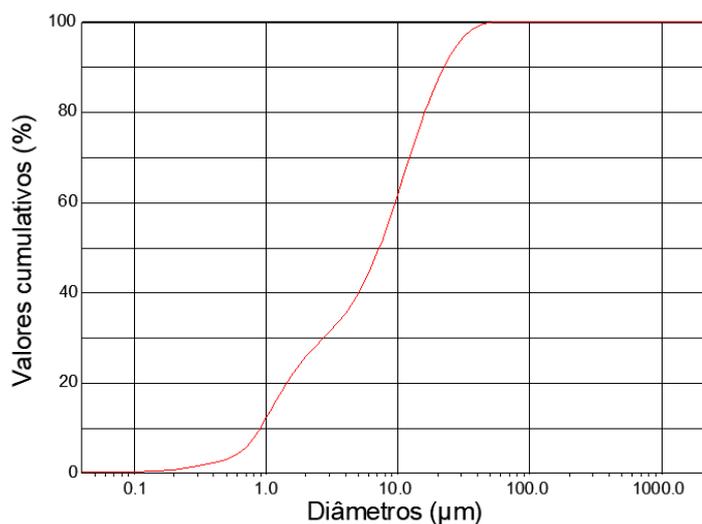
Óxido	%	
	Resultado	Requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018)
CaO	77.95	-
SiO ₂	9.79	-
Fe ₂ O ₃	3.55	-
Al ₂ O ₃	2.72	-
SO ₃	2.63	≤ 4.5
K ₂ O	1.49	-
MgO	0.812	≤ 6.5
SrO	0.55	-
TiO ₂	0.26	-
MnO	0.16	-
ZnO	0.025	-
L.O.I.*	6.01	≤ 6.5

* Perda ao fogo

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 24 exibe a curva granulométrica do cimento, enquanto os dados dos diâmetros (D10, D50 e D90) estão detalhados na Tabela 12, junto com as demais informações de caracterização física do material.

Figura 24 - Curva granulométrica do cimento Portland CP V – ARI.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.2.3 Sílica ativa

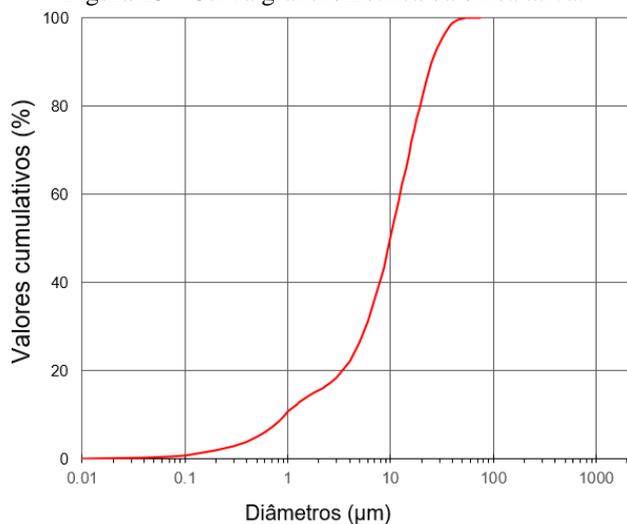
A sílica ativa que foi utilizada na pesquisa é do tipo densificada da marca Tecnosil. As propriedades e resultados de caracterização do material, incluso o ensaio de espectrometria por fluorescência de raio X (EDX) para a caracterização química, podem ser visualizados na Tabela 14. A curva granulométrica correspondente a esse material está representada na Figura 25.

Tabela 14 - Caracterização da sílica ativa.

Propriedades	Resultado	Procedimento de Ensaio	Requisitos	
Massa específica (g/cm ³)	2.18	NBR 16605 (ABNT, 2017)	-	
Diâmetro (µm)	D10	0.936	-	
	D50	9.993	-	
	D90	25.290	-	
Composição química (%)	SiO ₂	90.12	≥ 85% NBR 13956-1 (ABNT, 2012)	
	K ₂ O	3.65	-	
	CaO	3.45	Espectrometria por fluorescência de raio X (EDX)	-
	Al ₂ O ₃	1.67		-
	Fe ₂ O ₃	0.68		-
	MnO	0.19		-

Fonte: Elaboração própria.

Figura 25 - Curva granulométrica da sílica ativa.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.2.4 Fíler calcário

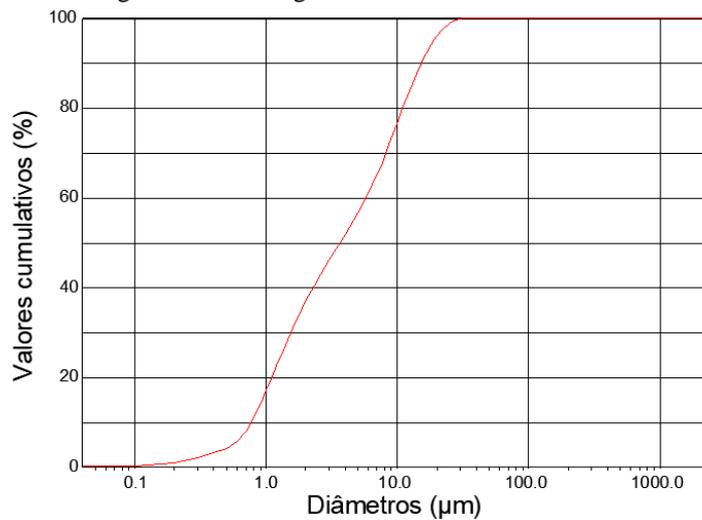
O fíler calcário que foi utilizado na pesquisa é da marca Goiásfiller. As propriedades e resultados de caracterização do material podem ser visualizados na Tabela 15. A curva granulométrica correspondente a esse material está representada na Figura 26.

Tabela 15 - Caracterização do fíler calcário.

Propriedades	Resultado	Método de Ensaio	
Massa específica (g/cm ³)	2.70	NBR 16605 (ABNT, 2017)	
Diâmetro (µm)	D10	0.758	
	D50	3.631	
	D90	15.204	
Composição química (%)	CaO	92.98	
	MgO	3.89	Espectrometria por fluorescência de raio X (EDX)
	SiO ₂	3.04	

Fonte: Elaboração própria.

Figura 26 - Curva granulométrica do fíler calcário.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.2.5 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi proveniente da região de Brasília – DF, e optou-se pela utilização de areia quartzosa média lavada extraída de rio, fornecida pela empresa SÓ REPAROS. A areia natural foi dividida em faixas granulométricas, sendo necessário o uso de todas elas somente para validar o comportamento do ABR no *BétonLabPro*. A Figura 27 apresenta a areia natural após o procedimento de peneiramento mecânico.

Figura 27 - Areia natural após o procedimento de peneiramento mecânico.



Fonte: Elaboração própria.

Para a produção de CUAD e CEUAD utilizou-se somente a faixa de areia passante na peneira de 0,3 mm, mesma granulometria adotada por Pham *et al.* (2021), sendo esse procedimento de separação da faixa utilizável realizado com peneiramento mecânico no LEM/UnB. Os ensaios que foram realizados, as normas seguidas e os resultados obtidos estão listados na Tabela 16.

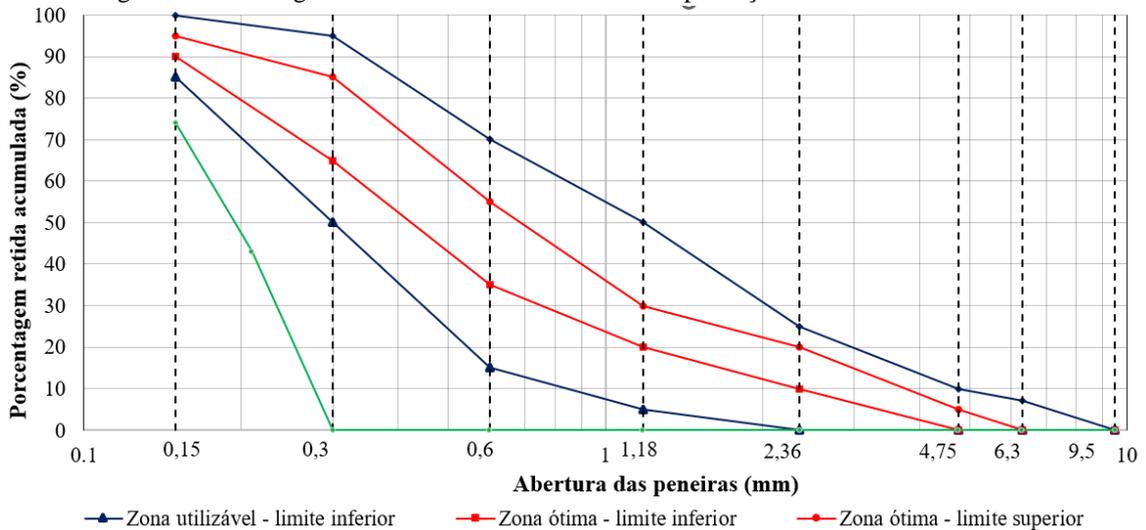
Tabela 16 - Ensaio de caracterização da areia utilizada na produção do CUAD e CEUAD.

Propriedade	Resultados	Método de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2.618	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1.28	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Módulo de Finura	0.746	NBR NM 248 (ABNT, 2009)
Dimensão Máxima (mm)	0.21	
Absorção de água (%)	0.65	NBR NM 30 (ABNT, 2001)

Fonte: Elaboração própria.

Foi traçada a curva granulométrica do agregado, e como pode ser observado na Figura 28, o material apresentou características fora da zona ótima inferior e a superior definidos para agregados miúdos, conforme NBR 7211 (ABNT, 2022), e está representado pela linha verde.

Figura 28 - Curva granulométrica da areia utilizada na produção do CUAD e CEUAD.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.2.6 Agregado miúdo de borracha reciclada de pneus (ABR)

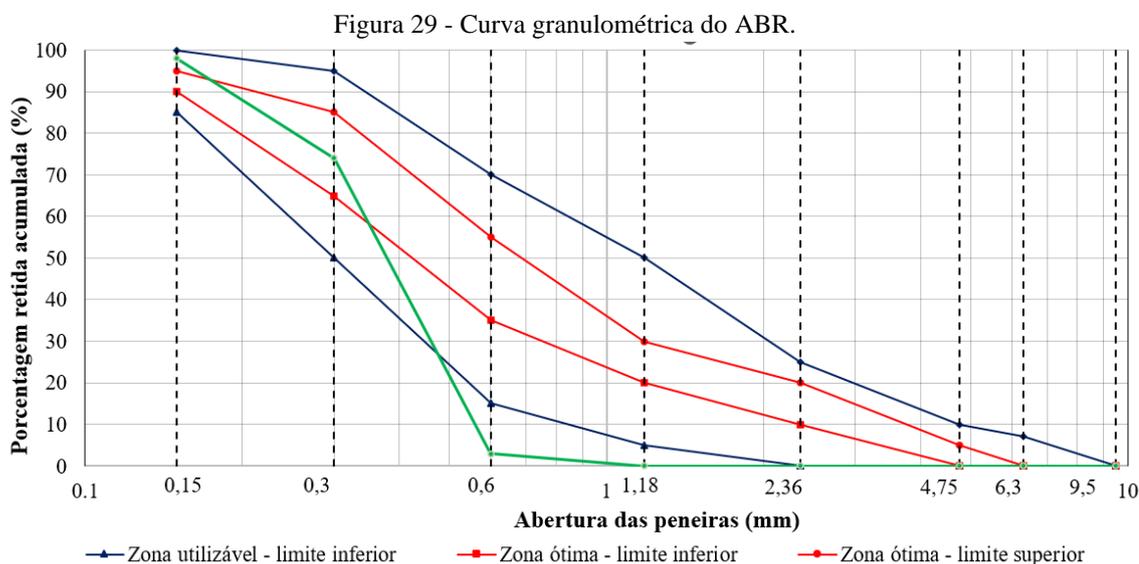
O agregado de borracha utilizado foi adquirido da empresa Moregreen, com a menor granulometria disponível que era passante na peneira de 0,6 mm, mesma granulometria adotada por Pham *et al.* (2021) e Zhang *et al.* (2022). Para garantir que os agregados de areia e borracha tivessem granulometrias diferentes, o que favorece o protocolo de empacotamento de misturas binárias, para o ABR foi desconsiderado a fração do material passante na peneira de 0,3 mm. Para os ensaios de caracterização foram seguidas normas pertinentes. O ensaio de determinação da massa específica teve que ser realizado com a utilização de querosene e apenas 50 gramas de material, seguindo os demais procedimentos de ensaio da NBR 16605 (ABNT, 2017). Os ensaios que foram realizados, as normas seguidas e os resultados obtidos estão listados na Tabela 17.

Tabela 17 - Ensaio de caracterização do ABR.

Propriedade	Resultados	Método de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	1.15	NBR 16605 (ABNT, 2017)
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	0.37	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Módulo de Finura	0.97	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Dimensão Máxima (mm)	0.30	
Absorção de água (%)	30.08	NBR NM 30 (ABNT, 2001)

Fonte: Elaboração própria.

Foi traçada a curva granulométrica do agregado e como pode ser observado na Figura 29, o material apresentou características diferentes da zona ótima inferior e a superior definidos para agregados miúdos, conforme NBR 7211 (ABNT, 2022), e está representado pela linha verde.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.2.7 Aditivo

O aditivo superplastificante empregado na pesquisa foi o MasterGlenium 51, uma fórmula de terceira geração gentilmente fornecida pela BASF. Este aditivo, fundamentado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado (PCE), atua como um dispersante para o material cimentício, favorecendo a hiperplastificação e promovendo uma significativa redução na quantidade de água necessária. Isso resulta em concreto com maior fluidez, sem afetar o tempo de pega (SOUZA, 2021). As características específicas do aditivo utilizadas nesta pesquisa foram disponibilizadas pelo fabricante e detalhadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Propriedades do aditivo superplastificante.

Propriedades	MasterGlenium 51
Base química	Éter policarboxílico
Dosagem recomendada (%)	0.2 a 1.0
Aparência	Líquido branco turvo
Densidade (g/cm ³)	1.067 - 1.107
pH	5.0 – 7.0
Teor de sólidos (%)	28.5 - 31.5
Viscosidade (cps)	< 150

Fonte: BASF (2019).

3.1.2.8 Água de amassamento

A água empregada no processo de amassamento, conforme especificado pela norma NBR 15900-1 (ABNT, 2009), foi fornecida pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).

3.2 Parâmetros para dosagem do concreto utilizando o *BétonLabPro*

No caso do CUAD e do CEUAD, ambos foram desenvolvidos no LEM/UnB, empregando uma metodologia de dosagem científica. O procedimento de dosagem foi conduzido com o auxílio do *software BétonLabPro*, que se baseia no conceito de empacotamento de partículas, resultando em traços otimizados. Para a dosagem do CUAD e CEUAD, foi considerada a utilização da sílica ativa como material cimentício suplementar, sendo este um dos materiais mais comumente utilizados para o desenvolvimento desses tipos de concretos (HABEL, GAUVREAU, 2008; PREM *et al.*, 2012; PHAM *et al.*, 2021; SOARES, 2021; LIU, WEI, 2022; YANG *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2022; CHEN *et al.*, 2023; e JUNIOR, 2023).

O primeiro passo para a utilização do *software* foi a inserção dos dados de caracterização dos materiais utilizados. A dosagem por meio desta ferramenta necessita de algumas informações e propriedades obrigatórias, enquanto outras já são facultativas e não restringem a utilização da metodologia de dosagem, contudo, podem limitar a previsão de determinadas propriedades dos concretos simulados.

Os subitens seguintes contam como se conseguiu os parâmetros necessários para o *software*. Optou-se por separar os materiais por categoria, o que proporcionou uma visão mais clara dos testes realizados para cada um, de acordo com as necessidades do programa de dosagem.

3.2.1 Densidade de empacotamento de partículas maiores que 100 μm

O ensaio de compactação e vibração foi utilizado para a determinação da densidade de empacotamento de diferentes frações de areia e do ABR. Para isso, a areia natural e o ABR foram divididos em faixas granulométricas, conforme apresentado na Tabela 19. Optou-se por utilizar apenas uma faixa granulométrica do ABR, visto que essa faixa representa aproximadamente 70% do material e ainda apresenta uma diferenciação de classes granulométricas, o que favorece o procedimento de empacotamento.

Tabela 19 - Frações granulométricas dos agregados.

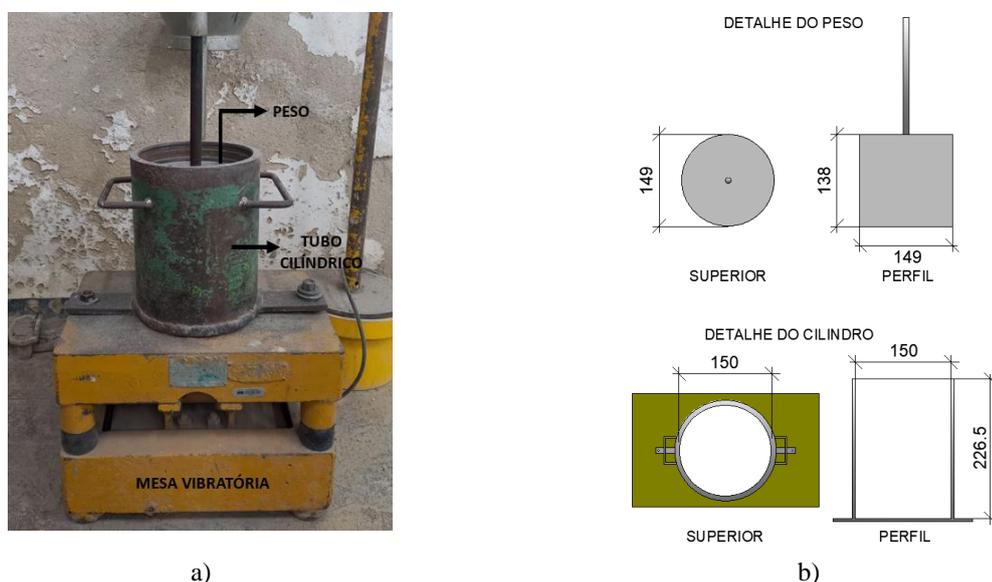
Passante (mm)	Retido (mm)	Ø médio (mm)	Nomenclatura
2.36	1.18	1.77	Areia 1 (A1)
1.18	0.6	0.9	Areia 2 (A2)
0.6	0.3	0.45	Areia 3 (A3)
	<0.3	0.225	Areia 4 (A4)
0.6	0.3	0.45	ABR

Fonte: Elaboração própria.

A areia natural foi dividida em frações granulométricas (A1, A2, A3 e A4), que foram submetidas ao ensaio. Para o protocolo de empacotamento foi definido um valor para o coeficiente K igual a 9 (CARSOLO, 2020; PEREIRA, 2021; SOUZA, 2021).

Para cada uma das faixas adotadas foi seguido o mesmo protocolo de ensaio. Inicialmente pesou-se 2,0 kg do material seco e ele foi colocado no interior do cilindro, sendo necessário espalhamento manual do material para nivelamento antes da colocação do peso. Colocado o peso na posição adequada, a mesa vibratória foi ligada por 2 minutos. A Figura 30 apresenta o aparato de ensaio utilizado.

Figura 30 - Aparato do ensaio de compactação e vibração: a) imagem do equipamento e b) detalhamento das dimensões (medidas em mm).

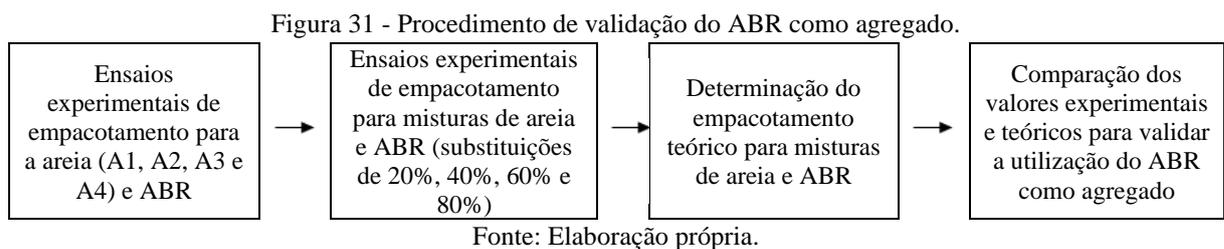


Fonte: Adaptado de Cardoso (2020).

Após a finalização do ensaio foram realizadas 4 medidas em pontos diferentes para verificar a diferença de altura do peso para a borda do cilindro (CARDOSO, 2020). Após a realização experimental dos ensaios, a densidade de empacotamento foi calculada utilizando as Equações 1 e 2, apresentadas na seção 2.4. Além disso, os valores encontrados para as frações de areia e ABR também foram utilizados como referência nos ensaios com misturas binárias compostas por areia e ABR, representando as misturas com 100% do material, tanto experimentais como teórico.

3.2.2 Ensaios com misturas binárias para avaliar a validade da teoria do MEC quando se usa ABR

Com o intuito de validar se a teoria do MEC seria válida para o ABR, material com módulo de elasticidade tão baixo, ou seja, muito deformável, foi feita uma investigação constituída por ensaios de compactação e vibração com misturas de ABR e diferentes frações de areia. O procedimento adotado para essa verificação é apresentado na Figura 31.



Para o protocolo de empacotamento foi definido um valor para o coeficiente K igual a 9. A validade do MEC foi avaliada comparando-se as compacidades experimentais e teóricas, calculadas com a Equação 3 da teoria do MEC, apresentadas na seção 2.4.

Além disso, para verificar a validade do MEC ao utilizar o ABR, substituiu-se a massa de areia nos teores de 20%, 40%, 60% e 80% pelo ABR, conforme apresentado na Tabela 20 e Figura 32.

Tabela 20 - Quantidade de material para cada combinação de agregados submetidos ao ensaio.

Material	Densidade de empacotamento das frações de areia	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3	Mistura 4	Densidade de empacotamento do ABR
Areia (A1, A2, A3 e A4)	2000 g	1600 g	1200 g	800 g	400 g	0 g
ABR	0%	20%	40%	60%	80%	100%

Fonte: Elaboração própria.

É importante ressaltar que a massa de areia substituída foi corrigida pelo equivalente em volume do ABR, por meio das suas massas unitárias. Essas misturas foram então submetidas ao ensaio de compactação e vibração e após finalizado o ensaio de cada mistura o material era descartado. Posteriormente, os valores experimentais de empacotamento foram comparados com os valores teóricos encontrados para as misturas.

Figura 32 - Misturas de areia e ABR para realização do ensaio.

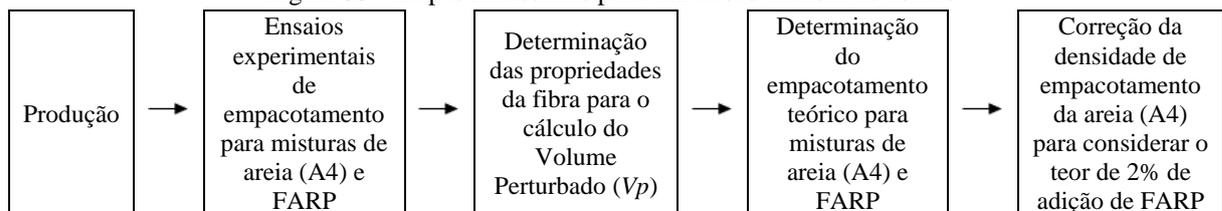


Fonte: Elaboração própria.

3.2.3 Ensaio com misturas binárias para determinar parâmetros necessários para consideração das fibras de aço reciclado de pneus na dosagem científica de CUAD e CEUAD

Com relação aos procedimentos necessários para utilizar as fibras no procedimento de dosagem científica foi necessário atender as etapas apresentadas na Figura 33.

Figura 33 - Etapas necessárias para a inclusão da fibra no estudo.



Fonte: Elaboração própria.

Para avaliar a influência da inclusão da FARP, foi necessário verificar o comportamento desse material quando inserido no concreto, para isso, foram realizados ensaios experimentais com diferentes teores de fibra inseridas na fração de areia A4, que será utilizada na produção do CUAD e CEUAD. Foram definidos os teores de 0%, 1%, 2% e 3%, que são teores usuais para produção desse tipo de concretos e que foram utilizados por Chen *et al.* (2023), em relação a um volume predeterminado de areia e um volume conhecido de 100% de fibra, considerando uma massa específica de 7.85 g/cm^3 para a fibra. Foi definido um volume de agregado inicial de 800 cm^3 para facilitar a inclusão das fibras, conforme indicado por Cardoso (2020). Esse

estudo foi necessário para verificar se a fibra apresentava um comportamento que pudesse ser previsto pelo *software*. A Tabela 21 apresenta as combinações de materiais utilizadas.

Tabela 21 - Combinações de materiais utilizadas para o estudo.

Teor de Fibra	Massa de areia (g)	Massa de Fibra (g)
0.00%	2094.40	0
1.00%	2094.40	62.8
2.00%	2094.40	125.6
3.00%	2094.40	188.4
100%	0	500

Fonte: Elaboração própria.

Posteriormente, essas combinações foram submetidas ao ensaio de compactação e vibração, seguindo os procedimentos apresentados anteriormente, com o protocolo de empacotamento K igual a 9. O cálculo de experimental foi realizado utilizando a Equação 3, apresentada na seção 2.4.

Para verificar se esse comportamento consegue ser previsto pelo MEC, foram calculados os valores teóricos de empacotamento das misturas. Para isso foi necessário a determinação do volume perturbado, sendo calculado a partir de algumas informações da própria fibra. Para verificar as propriedades de diâmetro e largura foram selecionadas aleatoriamente 100 fibras, com suas informações medidas com a utilização de um paquímetro. A Tabela 22 apresenta os dados utilizados para o cálculo.

Tabela 22 - Propriedades das FARP utilizado no cálculo do volume perturbado.

Diâmetro da FARP	0.036
Largura da FARP	1.542
Densidade do material	7.850
Número de fibras por grama	38
Diâmetro médio do agregado miúdo	0.015
Volume Perturbado (V_p)	0.00165

Fonte: Elaboração própria.

Após esse procedimento, conseguiu-se calcular o valor teórico de empacotamento de misturas de fibra e fração de areia A4, utilizando a Equação 4, apresentada na seção 2.4, simulando os mesmos teores que foram ensaiados experimentalmente, para facilitar a comparação.

Com relação a produção do CUAD e CEUAD, foi adotado um valor fixo de 2% de adição de fibras com base na literatura, novamente utilizando a Equação 4, definido como variável inicial a densidade de empacotamento experimental encontrado para a fração A4, contendo 2.0 kg.

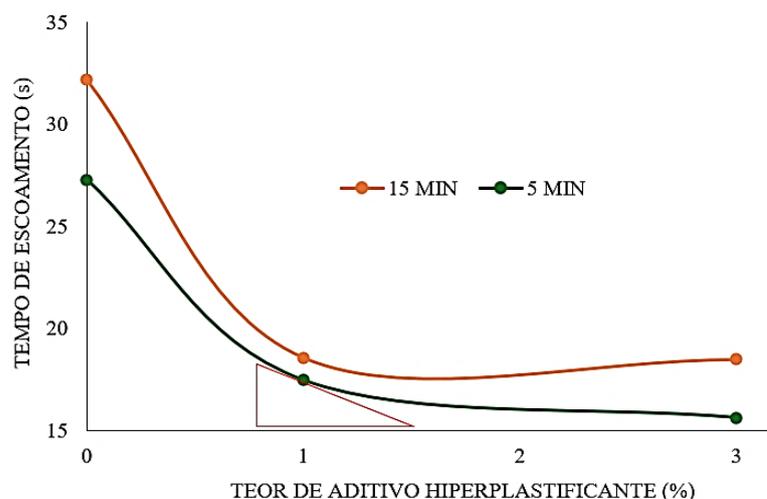
Esse procedimento foi realizado para igualar os volumes totais de agregados utilizados para determinação da densidade de empacotamento da fração de areia A4 com fibra e do ABR.

3.2.4 Densidade de empacotamento de partículas menores que 100 μm

Para determinar a densidade de empacotamento do aglomerante, da sílica ativa e do fíler calcário, seguiu-se o ensaio sugerido por De Larrard (1999) e descrito por Pereira (2021), que consiste no ensaio de demanda d'água. Para este ensaio o protocolo de empacotamento K é definido como 6.7.

Além do procedimento descrito acima, foi necessário avaliar o comportamento do cimento na condição saturada pelo aditivo superplastificante. Para isso, foi necessário determinar um parâmetro essencial que é o teor de saturação com relação ao aditivo superplastificante, sendo realizado por meio do ensaio do Funil de Marsh. O ensaio realizado foi uma adaptação da metodologia proposta por Aïtcin (2000), na qual uma pasta de cimento Portland foi preparada com uma relação água/cimento (a/c) de 0,4 e diferentes teores de aditivo superplastificante, variando de 0%, 1% e 3%, em relação à massa de cimento. O tempo de escoamento de 1000 ml de pasta através de um cone com diâmetro de 12,5 mm foi medido em intervalos de tempo de 5 e 15 minutos após o processo de mistura. Entre cada intervalo de medição do tempo de escoamento, a pasta foi mantida em repouso na cuba, coberta por um pano úmido, para evitar a perda de água da mistura. A Figura 34 apresenta o teor de saturação do cimento.

Figura 34 - Teor de saturação do cimento.



Fonte: Elaboração própria.

Foi estabelecida uma curva logarítmica para cada um dos intervalos de medição, e a determinação do teor de saturação consistiu em identificar o ponto em que um triângulo de

proporção 2/5 tangencia essas curvas. Como o CUAD e o CEUAD são concretos que necessitam de uma moldagem rápida, utilizou-se como referência o intervalo de 5 minutos.

Com a definição do teor de saturação, o procedimento de determinação da densidade de empacotamento do cimento foi novamente realizado, sendo acrescentado 1% de aditivo superplastificante.

3.2.5 Calibração dos parâmetros p e q

Após a realização dos ensaios de compacidade, se iniciou à verificação para dosagem no *software*, através da calibração dos parâmetros p e q . Esses parâmetros são considerados fundamentais, pois representam a influência dos agregados na resistência à compressão do concreto, sendo relacionados à aderência à pasta de cimento (" p ") e à resistência intrínseca (" q "). A calibração leva em conta os grãos de maior dimensão da mistura, e, portanto, para a calibração dos materiais deste estudo, foram utilizados concretos sem a presença de agregado graúdo. A Tabela 23 apresenta os parâmetros necessários para dosagem de concretos de cada material.

Tabela 23 - Parâmetros de dosagem necessários para o procedimento de dosagem.

Materiais	Parâmetros de dosagem
Areia (A4)	p e q
Borracha (ABR)	p e q
Fíler calcário	p e q
Sílica ativa	K_p

Fonte: Elaboração própria.

Para a determinação desses parâmetros foram primeiramente realizados testes de moldagem de traço de CUAD, seguindo as indicações de proporção de materiais especificados por Roux (1996) e realizando a correção do traço pela massa específica dos materiais. Para determinação dos teores de relação água/cimento (a/c) e água/aglomerante ($a/agl.$) foi considerado o teor de sólidos de 28,5% para o aditivo superplastificante, conforme a indicação do fabricante. Os resultados do teste podem ser verificados na Tabela 24.

Nesses estudos iniciais percebeu-se que a utilização de um agregado miúdo de menor granulometria influencia diretamente na quantidade de água necessária para a mistura. Além disso, percebeu-se a necessidade de uma utilização de água ou de aditivo maior do que as propostas na literatura.

Tabela 24 - Testes iniciais para determinação de parâmetros de dosagem em kg/m³.

Teste	Situação	Cimento	Areia <600 μm	Areia <300 μm	Sílica Ativa	Aditivo	Água	a/c	a/agl.
1	NÃO MOLDÁVEL	933		1026	233	27.60	186.60	0.22	0.18
2	NÃO MOLDÁVEL	933	1026		233	27.60	195.93	0.23	0.19
3	NÃO MOLDÁVEL	933	1026		233	27.60	205.26	0.24	0.19
4	NÃO MOLDÁVEL	933	1026		233	27.60	214.59	0.25	0.20
5	NÃO MOLDÁVEL	933	1026		233	27.60	223.92	0.26	0.21
6	MOLDÁVEL EM 15 MIN	933		1026	233	27.60	233.25	0.27	0.22
7	MOLDÁVEL EM 13 MIN	933	1026		233	27.60	233.25	0.27	0.22

Fonte: Elaboração própria.

Apesar dessa consideração, a decisão foi manter a utilização do agregado miúdo com a menor granulometria. Esta escolha baseou-se nas recomendações da literatura e na constatação de que ainda era possível moldá-lo com a mesma relação água/cimento (a/c) e água/aglomerante (a/agl.).

Após esse estudo, tornou-se possível estabelecer os traços que seriam empregados na calibração dos parâmetros no *BétonLabPro*. Diferentemente das abordagens de Cardoso (2020) e Pereira (2021), que adotaram a metodologia de Traços Ricos e Pobres com uma grande variação de quantidades de agregado miúdo e cimento, este estudo optou por uma abordagem diferente. Diante da observação de que a maioria dos traços exibiu uma quantidade elevada de cimento, escolheu-se adotar uma pequena diferença nas quantidades do traço de referência. O objetivo era investigar se uma pequena alteração na quantidade de agregado poderia resultar em variações significativas nas características do concreto produzido. Além disso, utilizou-se do traço de referência para fazer outras comparações, como a substituição da areia por ABR e fíler calcário, sendo que no caso do ABR essa substituição teve que ser corrigida através do volume, por meio da relação entre as massas unitárias dos materiais. A calibração dos parâmetros p e q é o processo inicial de utilização do *software* e possibilita posteriormente a calibração de outros parâmetros, como o K_p . Os resultados podem ser verificados na Tabela 25.

Tabela 25 - Definição dos traços utilizados para a calibração dos coeficientes p e q do concreto em kg/m³.

Traço	Descrição	Cimento	Areia <300 μm	ABR	Fíler calcário	Água	Aditivo	a/agl.
T1	Traço Rico	982.08	1080.29			216.06	27.60	0.24
T2	Traço Pobre	934.47	1214.81			205.58	27.60	0.24
T3	Substituição de 10% de areia por ABR	982.08	972.26	28.87		216.06	27.60	0.24
T4	Substituição de 10% de areia por Fíler calcário	982.08	972.26		108.03	216.06	27.60	0.24

Fonte: Elaboração própria.

Após a definição dos traços, Tabelas 24 e 25, deu-se início ao processo de produção dos concretos. Devido à baixa quantidade de água utilizada, foi necessário empregar um equipamento de alta rotação para garantir uma mistura adequada dos materiais e a dispersão das partículas de água. Para isso, foi utilizado um misturador com capacidade de 5 litros, suficiente para produzir a quantidade necessária para 4 corpos de prova de 50×100 mm por vez. O procedimento para a produção desses concretos foi padronizado e consistiu em:

- a) Foram adicionados todos os materiais secos e misturados manualmente com o auxílio de uma espátula por 10 segundos.
- b) O misturador foi iniciado em velocidade baixa por 30 segundos.
- c) Foi adicionada 50% da quantidade de água, juntamente com toda a quantidade de aditivo programada, e a mistura foi agitada em velocidade baixa por mais 60 segundos.
- d) Foi adicionada o restante da água e a mistura foi agitada por mais 30 segundos.
- e) A cuba foi coberta com um pano levemente úmido para evitar o espalhamento de material e continuar misturando em velocidade média até obter a consistência homogênea do concreto.

O tempo máximo entre o início e o final do procedimento de produção de concretos foi estabelecido em 15 minutos, conforme determinado nos testes realizados anteriormente. No caso desses concretos, como foi utilizada uma quantidade de água superior à mínima verificada nos testes iniciais, os concretos não ultrapassaram o tempo limite estabelecido.

Devido à quantidade de água utilizada, o concreto apresenta uma consistência diferente do convencional, com uma consistência levemente viscosa. Por isso, os procedimentos de moldagem estabelecidos em norma não puderam ser aplicados. Em vez disso, o concreto foi despejado nas formas de 50×100 mm em quatro camadas, sendo cada camada levemente adensada e vibrada por 30 segundos com o auxílio de uma mesa vibratória. Após esse processo, as formas foram cobertas com papel filme para evitar a troca de umidade com o ambiente, identificadas e então colocadas em uma câmara úmida por 24 horas. Posteriormente, foi realizada a desmoldagem do material, seguida pela identificação das amostras. Em seguida, as amostras foram submersas em água com cal até completarem os 7 e 28 dias de idade. O ensaio de resistência à compressão dos concretos foi realizado aos 7 e 28 dias de idade no equipamento DENISSON, disponível no LEM-UnB.

3.2.6 Calibração dos parâmetros K_p

Além dos parâmetros mencionados anteriormente, também é necessário determinar a influência das adições pozolânica na resistência mecânica dos concretos, também chamado de coeficiente K_p . Neste caso específico, onde a única adição utilizada como material cimentício suplementar é a sílica ativa, foram necessários testes adicionais para avaliar seu efeito.

Assim, seguiu-se as recomendações de De Larrad (1999), que propõe o uso de diferentes traços de concreto, com diferentes proporções de sílica ativa, para determinar o coeficiente K_p . Os traços utilizados para determinação do coeficiente são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Definição dos traços utilizados para a calibração do coeficiente K_p em kg/m^3 .

Traço	Adição de Sílica Ativa (%)	Cimento	Areia <300 μm	Sílica Ativa	Água	Aditivo	a/agl.
T5	0	958	1053.80	0	199.26	27.60	0.23
T6	25	958	1053.80	239.50	249.08	27.60	0.23
T7	30	958	1053.80	287.40	259.04	27.60	0.23

Fonte: Elaboração própria.

Para os procedimentos de produção, moldagem e cura dos concretos, seguiu-se o definido anteriormente para calibração dos parâmetros p e q .

3.2.7 Demais determinações do cimento

Para complementar o banco de dados do programa visando a dosagem posterior dos concretos, foi necessário inserir a composição do cimento Portland CP V-ARI utilizado na pesquisa. Seguindo a orientação de Souza (2021) de não realizar nenhum ensaio específico, optou-se por inserir os valores limites da NBR 16697 (ABNT, 2018) para essa tipologia de cimento, que adota teores de no mínimo de 95% de clínquer e máximo de 5% de fíler calcário.

3.3 Inserção das propriedades dos materiais utilizados no *BétonLabPro*

3.3.1 Materiais

3.3.1.1 Cimento

Para inserção das propriedades do cimento no *software* foram necessários os dados apresentados na Tabela 27. O Anexo 1 apresenta as propriedades inseridas no ambiente do programa.

Tabela 27 - Propriedades do cimento inseridas no *BétonLabPro* (continua).

Massa específica (kg/m^3)	3000
Teor de saturação (%)	1
Diâmetro (μm)	D10 0.887
	D50 7.237
	D90 22.195

Tabela 27 - Propriedades do cimento inseridas no *BétonLabPro* (conclusão).

	1 dia	22.24
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	30.04
	7 dias	37.47
	28 dias	43.09
Constituição (%)	Clinker	95
	Calcário	5
Composição de Bogue (%)	C3S	70
	C2S	10
	C3A	5
	C4AF	10
	Outros	5
Diâmetro (μm)	D10	0.887
	D50	7.237
	D90	22.195
Protocolo de ensaio	6.7	
Densidade de empacotamento sem saturação		
Densidade de empacotamento com saturação		

Fonte: Elaboração própria.

3.3.1.2 Areia (A4)

Para inserção das propriedades da areia no *software* foram necessários os dados apresentados na Tabela 28. O Anexo 2 apresenta as propriedades inseridas no ambiente do programa.

Tabela 28 - Propriedades da areia inseridas no *BétonLabPro*.

Massa específica (kg/m^3)	2618	
Absorção de água (%)	0.65	
Diâmetro (μm)	D10	75
	D50	150
	D90	210
Protocolo de ensaio	9	
Densidade de empacotamento		

Fonte: Elaboração própria.

3.3.1.3 ABR

Para inserção das propriedades do ABR no *software* foram necessários os dados apresentados na Tabela 29. O Anexo 3 apresenta as propriedades inseridas no ambiente do programa.

Tabela 29 - Propriedades do ABR inseridos no *BétonLabPro*.

Massa específica (kg/m^3)	1152	
Absorção de água (%)	30	
Diâmetro (μm)	D10	150
	D50	300
	D90	300
Protocolo de ensaio	9	
Densidade de empacotamento		

Fonte: Elaboração própria.

3.3.1.4 Fíler calcário

Para inserção das propriedades do fíler calcário no *software* foram necessários os dados apresentados na Tabela 30. Esse material foi inserido como agregado miúdo, uma vez que a sílica ativa foi o único material utilizado como material cimentício suplementar. O Anexo 4 apresenta as propriedades inseridas no ambiente do programa.

Tabela 30 - Propriedades do fíler calcário inseridas no *BétonLabPro*.

Massa específica (kg/m ³)	2709
Diâmetro (µm)	D10 0.758
	D50 3.631
	D90 15.204
Protocolo de ensaio	6.7
Densidade de empacotamento	
Natureza	Calcário
Coefficiente de blaine (m ² /kg) – Fornecido pelo fabricante	1152

Fonte: Elaboração própria.

3.3.1.5 Sílica ativa

Para inserção das propriedades da sílica ativa no *software* foram necessários os dados apresentados na Tabela 31. O Anexo 5 apresenta as propriedades inseridas no ambiente do programa.

Tabela 31 - Propriedades da sílica ativa inseridas no *BétonLabPro*.

Massa específica (kg/m ³)	2181
Diâmetro (µm)	D10 0.936
	D50 9.993
	D90 25.290
Protocolo de ensaio	6.7
Densidade de empacotamento	

Fonte: Elaboração própria.

3.3.1.6 Superplastificante

Para inserção das propriedades da superplastificante no *software* foram necessários os dados apresentados na Tabela 32. O Anexo 6 apresenta as propriedades inseridas no ambiente do programa.

Tabela 32 - Propriedades do superplastificante inseridas no *BétonLabPro*.

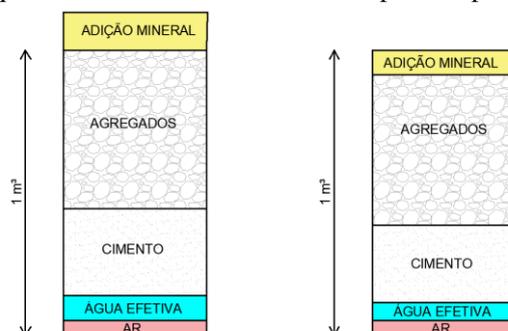
Teor de sólidos (%)	2181
Densidade (kg/l)	1.067

Fonte: Elaboração própria.

3.3.2 Calibração dos parâmetros p , q e coeficiente K_p

Embora as proporções definidas tenham sido utilizadas na produção dos concretos, foi necessário fazer algumas alterações nos traços para inseri-los no *software*, garantindo que o volume total de materiais fosse de 1 m^3 . Esse procedimento foi inicialmente realizado para corrigir a adição da sílica ativa nos traços T6 e T7, uma vez que somente o traço T5 apresentava um volume total de 1 m^3 , e posteriormente a metodologia foi aplicada aos outros traços para garantir a uniformidade do procedimento. A Figura 35 exemplifica o procedimento de correção realizado para o processo de adição de sílica ativa.

Figura 35 - Correção dos quantitativos de materiais realizado para ocuparem um volume total de 1 m^3 .



Fonte: Adaptado de De Larrad (1999).

Essa correção foi realizada utilizando as massas específicas dos materiais, levando em consideração que os traços de referência T1 e T5 tinham sido dosados para ocuparem um volume total de 1 m^3 . As alterações nos traços podem ser visualizadas na Tabela 33.

Tabela 33 - Apresentação dos traços modificados que foram inseridos no *software*.

Traço	Descrição	Cimento	Areia <300 μm	ABR	Fíler calcário	Sílica Ativa	Água	Aditivo
T1M	Traço Rico	982.08	1080.29				216.05	29.05
T2M	Traço Pobre	912.50	1186.24				200.74	26.95
T3M	Substituição de 10% de areia por ABR	998.53	988.55	29.35			219.67	29.54
T4M	Substituição de 10% de areia por FC	983.47	973.63		108.18		216.36	29.09
T5M	Adição de 0% de SA	994.72	1094.19				206.90	28.66
T6M	Adição de 25% de SA	851.23	936.36			212.81	221.32	24.52
T7M	Adição de 30% de SA	795.03	874.54			238.51	253.40	22.90

Fonte: Elaboração própria.

Com base na composição das dosagens e nos resultados de resistência à compressão dos respectivos traços foi possível ajustar os parâmetros p e q para a areia, borracha e fíler calcário utilizados neste estudo. Nesta primeira etapa de calibração, os traços que contêm sílica ativa não são considerados, uma vez que requer uma abordagem diferenciada, conforme será explicado posteriormente. É interessante destacar que no procedimento de imposição dos

parâmetros deve-se marcar os materiais separadamente. A Figura 36 apresenta o procedimento de calibração dos materiais apresentados.

Figura 36 - Procedimento de calibração dos parâmetros p e q .

The screenshot shows the 'Calibration' window with the following data:

Constituents:

- S1: réouverture temporaire.cst\BORRACHA COMPLETA
- S2: réouverture temporaire.cst\AREIA 0.15-0.3 ART
- S3: réouverture temporaire.cst\FILLER SAND
- C1: réouverture temporaire.cst\CIMENTO DISSERTAÇÃO - CPV NACIONAL

Composition:

S1 (kg)	0
S2 (kg)	973,63
S3 (kg)	108,18
C1 (kg)	983,47
SF1 (kg)	29,09
W (kg)	216,363

Concrete n°:

	1	3	4	5
S1 (kg)	0	0	29,35	0
S2 (kg)	1080,29	1186,24	988,65	973,63
S3 (kg)	0	0	0	108,18
C1 (kg)	982,08	912,5	998,53	983,47
SF1 (kg)	29,05	26,95	29,54	29,09
W (kg)	216,058	200,749	219,676	216,363
Total air (%)				
AEA	No	No	No	No
fc1 (MPa)				
fc2 (MPa)				
fc3 (MPa)				
fc7 (MPa)				
fc28 (MPa)	100,12	93,76	88,27	100,42
fc90 (MPa)				
fc360 (MPa)				

Fonte: Elaboração própria.

Com relação à calibração dos parâmetros para a sílica ativa é necessário utilizar uma outra metodologia, por meio da calibração de adições pozolânica. A Figura 37 apresenta o procedimento de calibração do coeficiente K_p .

Figura 37 - Procedimento de calibração do coeficiente K_p da sílica ativa.

The screenshot shows the 'Calibration' window with the following data:

Constituents:

- S1: réouverture temporaire.cst\AREIA 0.15-0.3 ART
- S2: réouverture temporaire.cst\FILLER SAND
- C1: réouverture temporaire.cst\CIMENTO DISSERTAÇÃO - CPV NACIONAL
- SF1: réouverture temporaire.cst\SILICA ATIVA

Composition:

S1 (kg)	874,54
S2 (kg)	0
C1 (kg)	795,03
SF1 (kg)	238,51
SP1 (kg)	22,9
W (kg)	253,401

Concrete n°:

	1	2	3
S1 (kg)	1094,19	936,36	874,54
S2 (kg)	0	0	0
C1 (kg)	994,72	851,23	795,03
SF1 (kg)	0	212,81	238,51
SP1 (kg)	28,66	24,52	22,9
W (kg)	206,902	221,321	253,401
Total air (%)			
AEA	No	No	No
fc28 (MPa)	106,66	107,33	85,25

Fonte: Elaboração própria.

Após a inserção dos dados mencionados, o *software* calcula os parâmetros p , q e K_p para cada um dos agregados empregados.

3.4 Dosagem do CUAD e CEUAD pelo *BétonLabPro*

Após a calibração dos parâmetros, torna-se viável iniciar a simulação de dosagem. Para isso, é necessário acessar a opção "cálculos". Considerando que apenas os valores médios de resistência à compressão aos 28 dias foram inseridos, durante o processo de simulação, somente essas informações de resistência podem ser requisitadas. Inicialmente, procedemos à dosagem do traço de CUAD e, em seguida, ao de CEUAD, utilizando o primeiro traço simulado como referência para o segundo.

Para o CUAD, foi necessário incluir um traço piloto de dosagem, selecionando o traço T6M, apresentado na Figura 33. Do traço T6M, foram utilizadas as quantidades de cimento, sílica ativa, superplastificante e água efetiva. Quanto às quantidades de agregados, definiu-se as proporções de 0% de ABR, 90% de areia e 10% de fíler calcário.

Com relação às propriedades requeridas, empregou-se dois critérios: a) solicitação de uma resistência média à compressão aos 28 dias maior ou igual a 150 MPa e b) minimização do *Slump*. Posteriormente o valor da resistência média à compressão aos 28 dias foi definido como maior ou igual a 125 MPa. Esses traços foram definidos como SIMUL1 e SIMUL2, com resistências superiores a 150 MPa e 125 MPa, respectivamente. A Figura 38 ilustra o procedimento de solicitação de propriedades.

Figura 38 – Propriedades requeridas para o traço de CUAD simulado.

Property	Operator	Value
Shear yield stress (Pa)		
Plastic viscosity (Pa.s)		
Slump (cm)		
fc28 (MPa)	≤	125
Packing index of unconfined concrete		
Packing index of confined concrete		

Fonte: Elaboração própria.

Após a simulação, procedeu-se à dosagem experimental dos concretos nas dependências do LEM/UnB. Durante esse processo, observou-se que a quantidade de água simulada para o traço de 150 MPa não foi suficiente para tornar o concreto homogêneo. No entanto, para o concreto com 125 MPa, a quantidade de água foi adequada, resultando em uma consistência satisfatória para a inclusão das fibras.

Após essa verificação, procedeu-se à simulação de dosagem para o CEUAD, utilizando o traço SIMUL2 como referência e solicitou-se as proporções de 10% de ABR, 80% de areia e 10% de fíler calcário.

3.5 Produção das dosagens simuladas do CUAD e CEUAD

Para a produção dos concretos foram adicionados dois procedimentos, sendo a ultrassonicação da sílica ativa e a utilização da cura térmica e foi necessário realizar também a mudança no procedimento de produção dos concretos. O procedimento de ultrassonicação foi realizado no IQ-UnB, enquanto o procedimento de produção e cura de concretos foi realizado no LEM-UnB.

3.5.1 Ultrassonicação da sílica ativa

Após a produção dos concretos apresentados nas Tabelas 25 e 26, verificou-se que, apesar de observado um aumento nos valores médios de resistência à compressão quando a sílica ativa densificada foi utilizada em sua composição, esse aumento não foi considerado significativo. Estudos recentes sobre a utilização de sílica ativa comprovam que sua tendência natural de aglomeração diminui sua eficácia. Para lidar com isso, foi adotada uma adaptação do procedimento de dispersão da sílica ativa definido por Fraga (2021), que consiste no processo de ultrassonicação.

Para realizar o processo de ultrassonicação, a sílica ativa foi colocada em um béquer de vidro junto com todo o aditivo superplastificante e toda a água de mistura definida para cada mistura. Posteriormente, a mistura foi agitada com uma espátula até obter uma consistência homogênea. O béquer com a mistura foi colocado em um balde com gelo para evitar a evaporação da água. O processo de ultrassonicação é apresentado na Figura 39.

Figura 39 - Processo de ultrassonicação realizado no IQ-UnB.



Fonte: Elaboração própria.

O equipamento utilizado foi um ultrassonicador VCX 750 da Sonics, com sonda ultrassônica modelo CV334, disponível no IQ-UnB. Foi utilizada uma amplitude de 75% e um tempo efetivo de ultrassonicação de 10 minutos, em ciclos de 50 segundos com aplicação de pulsos ultrassônicos e 10 segundos sem aplicação de pulsos.

3.5.2 Alteração no procedimento de produção de concretos

A produção dos concretos demorou no máximo 15 minutos após a finalização do processo de ultrassonicação. Como toda a água e aditivo projetados tiveram que ser misturados com a sílica ativa, o processo de produção do concreto sofreu alteração. O novo procedimento consistiu em:

a) Em um recipiente foram colocados todos os materiais secos e misturados manualmente com o auxílio de uma espátula por 30 segundos, conforme a Figura 40.

Figura 40 - Processo de mistura dos materiais secos.



Fonte: Elaboração própria.

- b) Foram adicionados na cuba do misturador 50% da quantidade total de materiais secos, juntamente com toda a quantidade de sílica ativa ultrassonicada, que também continha toda a quantidade de água e aditivo disponível para a produção dos concretos.
- c) O misturador foi iniciado em velocidade baixa por 30 segundos.
- d) Foram adicionados os outros 50% da quantidade de materiais secos e misturados por 120 segundos ou até se observar uma formação mais homogênea do concreto.
- e) Foram adicionadas as FARP em pequenas quantidades por cerca de 120 segundos.
- f) O misturador foi iniciado em velocidade média por 60 segundos ou até atingir a consistência que fosse possível realizar a moldagem dos corpos de prova. A Figura 41 apresenta a consistência do concreto após a sua produção.

Figura 41 - Consistência do concreto após a produção.



Fonte: Elaboração própria.

3.5.3 Cura térmica

Outro procedimento adotado consistiu na utilização da cura térmica para os concretos CUAD e CEUAD produzidos. Um estudo publicado por Xu *et al.* (2023) explica que, ao aplicar a cura térmica em um CUAD com 20% de sílica ativa, obteve-se a máxima resistência à compressão de 170 MPa quando utilizada a cura térmica a 90 °C por 3 dias, representando um aumento de 26,9% na resistência em comparação com o mesmo concreto curado a 20 °C por 1 ano. Este estudo também mostrou que o grau de hidratação do cimento e o de reação pozolânica da sílica ativa aumentou em 5,8% e 20,6%, respectivamente.

Neste estudo, a cura térmica foi aplicada, porém, ficou limitada a 80 °C por 2 dias, semelhante ao adotado por Kang *et al.* (2024).

3.6 Produção de formas e moldagem dos corpos de prova

3.6.1 Resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, foram produzidas 4 amostras para cada concreto estudado: CAA, CUAD e CEUAD. No caso do CAA, o concreto foi despejado nas formas metálicas cilíndricas de 100×200 mm, sendo levemente adensado. Após esse processo as formas ficaram em temperatura ambiente por 24 horas. Posteriormente, foi realizada a desmoldagem e em seguida as amostras foram submersas em água com cal, cura úmida, até completarem os 28 dias de idade.

Para o CUAD e CEUAD, o concreto foi despejado nas formas metálicas cilíndricas de 50×100 mm em quatro camadas, sendo cada camada levemente adensada e vibrada por 30 segundos com o auxílio de uma mesa vibratória. Após esse processo, as formas foram cobertas com papel filme para evitar a troca de umidade com o ambiente, identificadas e então colocadas em uma câmara úmida por 24 horas. Posteriormente, foi realizada a desmoldagem do material e colocadas em cura térmica por 48 horas. Em seguida, as amostras foram submersas em água com cal, cura úmida, até completarem os 28 dias de idade. No dia do ensaio, os corpos de prova foram retificados com o auxílio de uma retificadora automática. A Figura 42 apresenta o processo de cura úmida.

Figura 42 - Procedimento de cura úmida.



Fonte: Elaboração própria.

3.6.2 Resistência à flexão

Para o ensaio de resistência à flexão, foram produzidos corpos de prova prismáticos com dimensões de $40 \times 40 \times 160$ mm, seguindo as indicações de Rocha (2014), Wiemer *et al.* (2020), França (2021) e Zhang *et al.* (2022). Foram produzidas 3 amostras para cada concreto estudado: CAA, CUAD e CEUAD.

Para a produção das amostras de CAA, despejou-se o material em uma camada, sendo o material levemente adensado. As condições ambientais, de desmoldagem e de cura seguiram o mesmo procedimento realizado para as amostras de resistência à compressão.

Para as amostras de CUAD e CEUAD, o concreto foi inserido em duas camadas, sendo cada camada levemente adensada e vibrada por 30 segundos com o auxílio de uma mesa vibratória. As condições ambientais, de desmoldagem e de cura seguiram o mesmo procedimento realizado para as amostras de resistência à compressão. A Figura 43 apresenta a moldagem das amostras para o CUAD.

Figura 43 - Produção de amostras de CUAD para o ensaio de resistência à flexão.

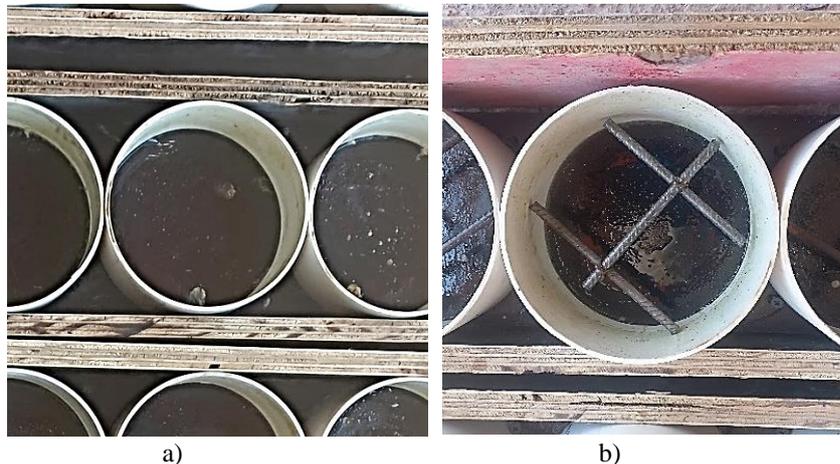


Fonte: Elaboração própria.

3.6.3 Resistência ao impacto em cilindros

Para o ensaio de resistência ao impacto em cilindros, foram produzidas amostras cilíndricas com dimensões de 149×65 mm, confeccionados a partir de tubos de PVC, sendo definidos dois tipos de forma, com armadura e sem armadura. A Forma 1 não apresentava armadura interna e a Forma 2 apresentava armadura interna em aço. A Figura 44 apresenta os dois tipos de formas cilíndricas para o ensaio de resistência ao impacto utilizadas.

Figura 44 - Apresentação dos tipos de forma cilíndricas utilizadas no estudo. a) Forma 1; e b) Forma 2.



Fonte: Elaboração própria.

Para o CAA foram produzidos dois tipos de amostras: a) CAA-SA: amostras de concreto autoadensável sem armadura; e b) CAA-CA: amostras de concreto autoadensável com armaduras em aço CA-50 de $\varnothing 6.3$ mm. Para o CUAD e CEUAD foram realizadas somente amostras sem a presença de armadura em aço devido a utilização da FARP, com as mesmas dimensões definidas anteriormente.

As amostras de CAA foram inseridas nas formas em uma única camada e levemente adensadas. As amostras de CUAD e CEUAD foram despejadas nas formas em duas camadas, com cada camada sendo levemente adensada e vibrada por 10 segundos com o auxílio de uma mesa vibratória. No dia do ensaio, os corpos de prova foram retificados com o auxílio de uma retificadora automática.

A determinação da taxa de aço para a armadura levou em consideração a pior situação encontrada em grelhas de drenagem dispostas em passarelas subterrâneas do Distrito Federal, que consiste na região central do elemento, no qual para uma seção de 70 mm de largura por 60 mm de altura, é utilizado uma barra de aço de CA-50 de $\varnothing 6.3$ mm. Ao considerar a seção central da amostra cilíndrica com 149 mm de largura e 60 mm de altura, desconsiderando a utilização de entalhe de 5 mm, optou-se por inserir duas barras em aço CA-50 de $\varnothing 6.3$ mm. Foi realizado ainda a inserção de uma outra barra, perpendicular às anteriores, para garantir a estabilidade do elemento. A fixação da armadura foi realizada pelo atrito com as paredes do tubo em PVC, sendo definida a distância de 25 mm entre a parte inferior da armadura e o fundo do elemento. Essa foi a mesma distância proporcionada pelo uso dos espaçadores na confecção das grelhas, apesar de que geralmente a armadura de grelhas de drenagem convencionais se apresentam ainda mais próxima da linha neutra do elemento, o que prejudica o seu desempenho.

3.6.4 Resistência ao impacto em grelhas

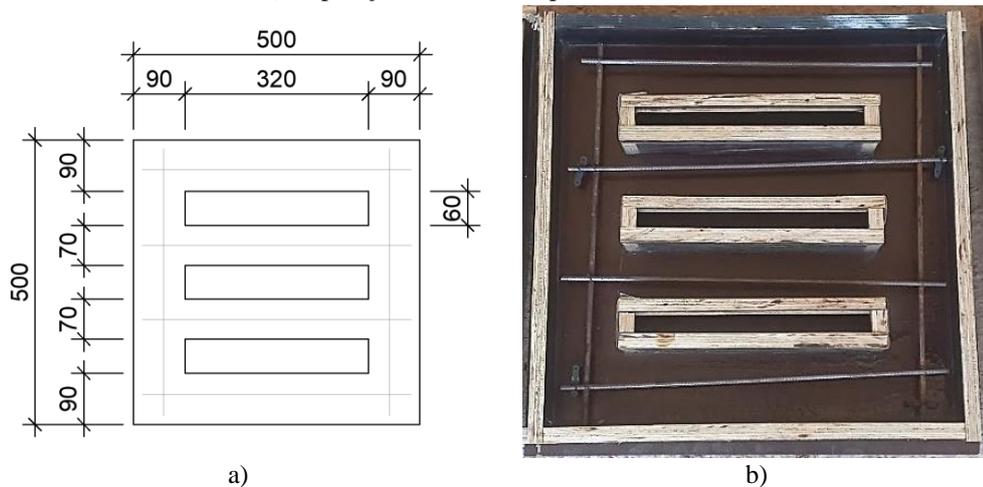
A resistência ao impacto em grelhas consiste em um estudo preliminar que busca avaliar a possibilidade de substituição de grelhas de drenagem comum por grelhas que apresentem desempenhos mecânicos e durabilidade superiores, diminuindo os gastos públicos com a solicitação de licitações de substituição dos elementos, que atualmente apresentam uma vida útil bastante curta.

Foi desenvolvida uma grelha para cada tipo de concreto, sendo eles o CAA-CA e CEUAD. A grelha de CAA-CA apresentava dimensões de $500 \times 500 \times 60$ mm e a de CEUAD apresentava dimensões de $500 \times 500 \times 30$ mm. Importante ressaltar que as dimensões e formatos das grelhas

são as mesmas, diferenciando-se apenas pela menor espessura. A intenção de usar uma grelha com metade da espessura da produzida pelo concreto convencional se justifica por tentar se tirar proveito das propriedades inerentes do CEUAD.

Diferentemente da grelha com concreto armado, no CEUAD não é necessário garantir um cobrimento mínimo da armadura. Uma grelha de menor espessura também é mais leve e pode ser vantajosa por facilitar manuseio. Além disso, uma menor espessura leva a um menor consumo de materiais, o que impacta diretamente nos custos de produção. A ideia era testar se, mesmo utilizando-se uma espessura menor, o desempenho ao impacto seria semelhante às grelhas usuais, de concreto armado. Para a moldagem desses elementos, a grelha de CAA foi moldada em uma única camada, enquanto que a grelha de CEUAD foi moldada em cinco camadas, com cada camada sendo levemente adensada após o despejo. A Figura 45 apresenta os tipos de formas utilizadas.

Figura 45 - Apresentação dos tipos de forma utilizadas no estudo: a) Dimensões das formas de grelhas, em mm; e b) disposição da armadura para o CAA-CA.



Fonte: Elaboração própria.

3.7 Determinação de resistências mecânicas

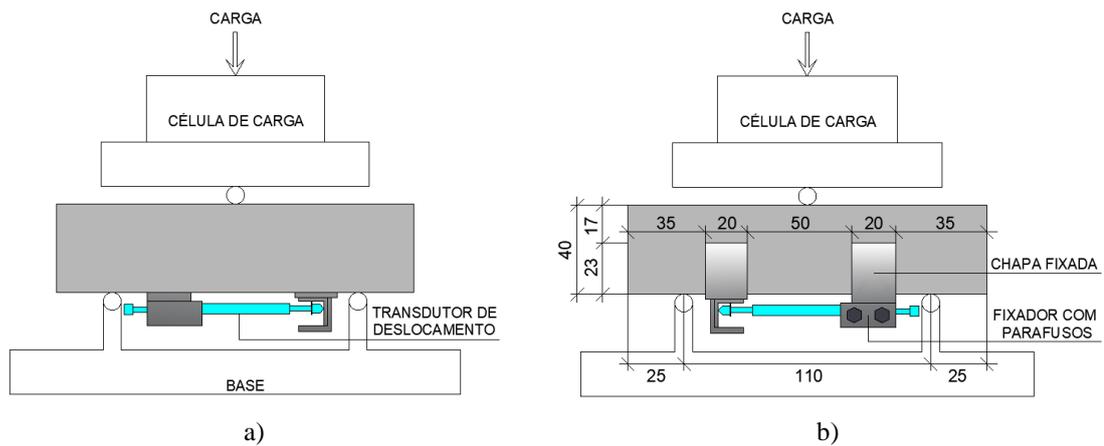
3.7.1. Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples dos concretos foi determinada seguindo as diretrizes estabelecidas pela NBR 5739 (ABNT, 2018), com testes realizados aos 28 dias de idade. Desta vez os ensaios de resistência a compressão foram realizados no equipamento EMIC, com uma célula de carga disponível no equipamento e de capacidade de 300 kN, disposta no LEM-UnB.

3.7.2 Resistência à flexão de 3 pontos

Para o ensaio de resistência à flexão dos concretos, foi definida a configuração apresentada na Figura 46. Os corpos de prova foram colocados sobre 2 apoios e apresentaram 1 ponto de aplicação de carga na parte superior. Cantoneiras foram fixadas de modo que fosse possível a instrumentação do transdutor de deslocamento e, assim, medir o deslocamento horizontal entre dois pontos do corpo de prova, limitado a 4 mm.

Figura 46 - Configuração apresentada no ensaio de resistência à flexão (medidas em mm): a) Vista frontal e b) Vista posterior.



Fonte: Elaboração própria.

O transdutor de deslocamento utilizado foi o WI-10mm e a célula de carga foi de 500 kN, sendo ambos conectados ao equipamento Spider 8, da empresa HBM, com a velocidade de aplicação de carga utilizada por Cardoso (2020) de 0.1 mm/min. Além disso, a instrumentação deste ensaio é apresentada na Figura 47.

Figura 47 - Instrumentação do ensaio de resistência à flexão.



Fonte: Elaboração própria.

Para a determinação da resistência à flexão foi adotada a equação 5, conforme a DIN EN 12390-5 (2017).

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{(d_1 \cdot d_2^2)} \quad (5)$$

Onde:

f_{cf} - Resistência à flexão, em MPa;

F - Carga máxima correspondente ao ensaio;

l - Vão do corpo de prova;

d_1 - largura do corpo de prova;

d_2 - Altura do corpo de prova.

3.7.3 Resistência ao impacto em cilindros

O ensaio de resistência ao impacto utilizado neste trabalho consiste numa adaptação do ensaio *Drop-Weight*, recomendado pelo ACI 544.2R-89 (ACI COMMITTEE 544, 2002). O procedimento proposto pelo ACI 544.2R-89 é descrito em detalhes no item 2.6.1 da revisão bibliográfica. As adaptações feitas no ensaio se basearam na literatura (ABID *et al.*, 2020; LIU, WEI, 2021) e tiveram o intuito de: (a) reduzir a dispersão dos resultados; (b) ter maior previsibilidade da direção de abertura de fissura; (c) ter mais clareza no critério de interrupção do ensaio; (d) reduzir o número de quedas necessárias para levar à ruptura de concretos com elevada resistência, como é o caso do CUAD e CEUAD; e (e) mensurar deformações e aberturas de fissuras, que permitissem ter uma noção mais clara do progresso do dano nos corpos de prova.

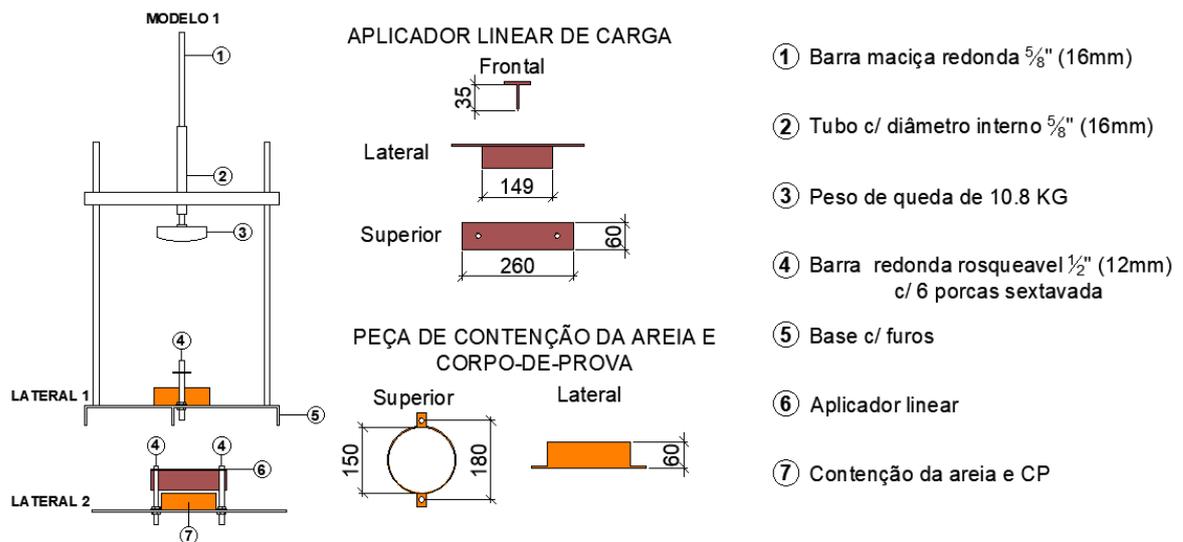
Para reduzir a dispersão dos resultados, optou-se por realizar os ensaios seguindo as orientações de Abid *et al.* (2020): utilizando-se uma cama de areia de aproximadamente 25 mm para que o corpo de prova não fique em contato direto com a placa metálica de base. Para se ter maior previsibilidade do local e direção da abertura de fissura, e para se ter mais clareza no critério de interrupção do ensaio, optou-se por substituir a esfera do ensaio original pela aplicação de uma carga linear em um entalhe realizado na parte superior do corpo de prova, assim como foi feito por Abid *et al.* (2020).

Como os concretos com fibras tendem a apresentar um progresso do dano mais lento do que os concretos convencionais, os corpos de prova foram instrumentados de modo que permitisse a avaliação do progresso do dano causado pelas sucessivas quedas do peso de carga. Para medir as deformações na parte inferior do corpo de prova foram utilizados dois extensômetros elétricos, de 40 mm, 120 Ω e *gauge factor* de 2.18. Foram colados na superfície inferior e posicionados transversalmente ao entalhe (ver Figura 48). Para se ter uma ideia da evolução das aberturas de fissura, também foram colocados dois transdutores de deslocamento, conforme

Uma segunda peça (ver Figura 49b) foi usada como anteparo para o transdutor de deslocamento, sendo necessária após um teste preliminar do ensaio em que se observou que o transdutor se movimentava livremente com os impactos. Uma vista das peças coladas no corpo de prova pode ser vista na Figura 49d e os transdutores de deslocamentos presos ao corpo de prova, antes do início do ensaio, são mostrados na Figura 49e.

Para o aparato de ensaio, teve-se que montar um modelo em que fosse possível ensaiar os corpos de prova cilíndricos e as grelhas. Desta forma, optou-se pela utilização de fixadores removíveis, utilizando a mesma estrutura de ensaio. Como forma de reduzir o número de quedas necessárias para levar à ruptura, optou-se por utilizar um peso de queda de 10,8 kg (ver Figura 50). Além disso, a altura de queda foi definida como 457 mm, seguindo o definido pelo ACI COMMITTEE 544 (2002).

Figura 50 - Configuração experimental para ensaio de impacto com cilindros (dimensões em mm).



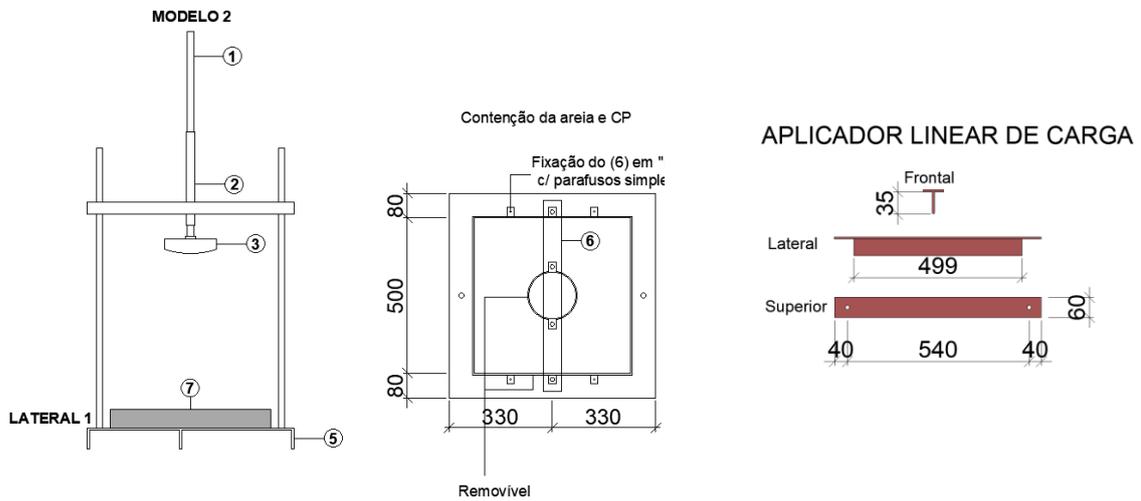
Fonte: Elaboração própria.

3.7.4 Resistência ao impacto em grelhas

O ensaio de determinação da resistência ao impacto em grelhas foi realizado utilizando-se a mesma configuração experimental e mesmos procedimentos empregados nos ensaios em cilindros, apresentado no item 3.3.3. As únicas modificações no aparato de ensaio foram a substituição da peça de contenção da areia e do corpo de prova e do aplicador de carga linear, de modo a se adequarem à geometria da grelha. No ensaio com as grelhas também se optou por realizar os ensaios com o corpo de prova apoiado numa cama de areia de aproximadamente

25 mm e manteve-se a aplicação linear de carga. A Figura 51 apresenta o aparato detalhamento do modelo 2, considera-se a mesma legenda de peças da Modelo 1.

Figura 51 – Configuração experimental para ensaio de impacto com grelhas (dimensões em mm): a) Projeto do aparato; b) imagem do aparato, c) detalhe do aplicador linear de carga e implementação da cama de areia e aplicador de carga linear.



a)



b)



c)



d)

Fonte: Elaboração própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dosagem e produção do CUAD e CEUAD

4.1.1 Resultados dos ensaios com misturas binárias para avaliar a validade da teoria do MEC quando se usa ABR

Os valores obtidos experimentalmente nos ensaios de compactação e vibração para as densidades de empacotamento de cada faixa granulométrica dos agregados miúdos e do ABR estão fornecidos na Tabela 34. Os resultados apresentados são os valores médios de duas determinações experimentais.

Tabela 34 - Densidade de empacotamento de cada faixa granulométrica da areia e do ABR.

Material	Passante (mm)	Retido (mm)	Ø médio (mm)	Densidade de empacotamento experimental médio
A1	2,36	1,18	1.77	0.68804
A2	1,18	0,6	0.9	0.61011
A3	0,6	0,3	0.45	0.60283
A4	<0.3			0.57970
ABR	0,6	0,3	0.45	0.53837

Fonte: Elaboração própria.

Os valores de densidade de empacotamento apresentados são os utilizados no *BétonLabPro*. No caso do CUAD e CEUAD, os materiais utilizados foram o da fração A4 da areia e o ABR. Os valores experimentais e teóricos das densidades de empacotamento das misturas binárias são apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 - Densidade de empacotamento das misturas binárias entre diferentes frações granulométricas da areia e o ABR.

Teor de ABR	A1		A2		A3		A4	
	Exp.	Teo.	Exp.	Teo.	Exp.	Teo.	Exp.	Teo.
20%	0.71057	0.70476	0.63660	0.62065	0.61739	0.60211	0.62506	0.61821
40%	0.70616	0.71764	0.64181	0.62792	0.60235	0.59822	0.64453	0.63157
60%	0.62241	0.69547	0.57545	0.61969	0.56308	0.58682	0.59515	0.60376
80%	0.58632	0.61298	0.56568	0.58222	0.55029	0.56507	0.58716	0.57002

Exp.: Experimental; Teo.: Analítico

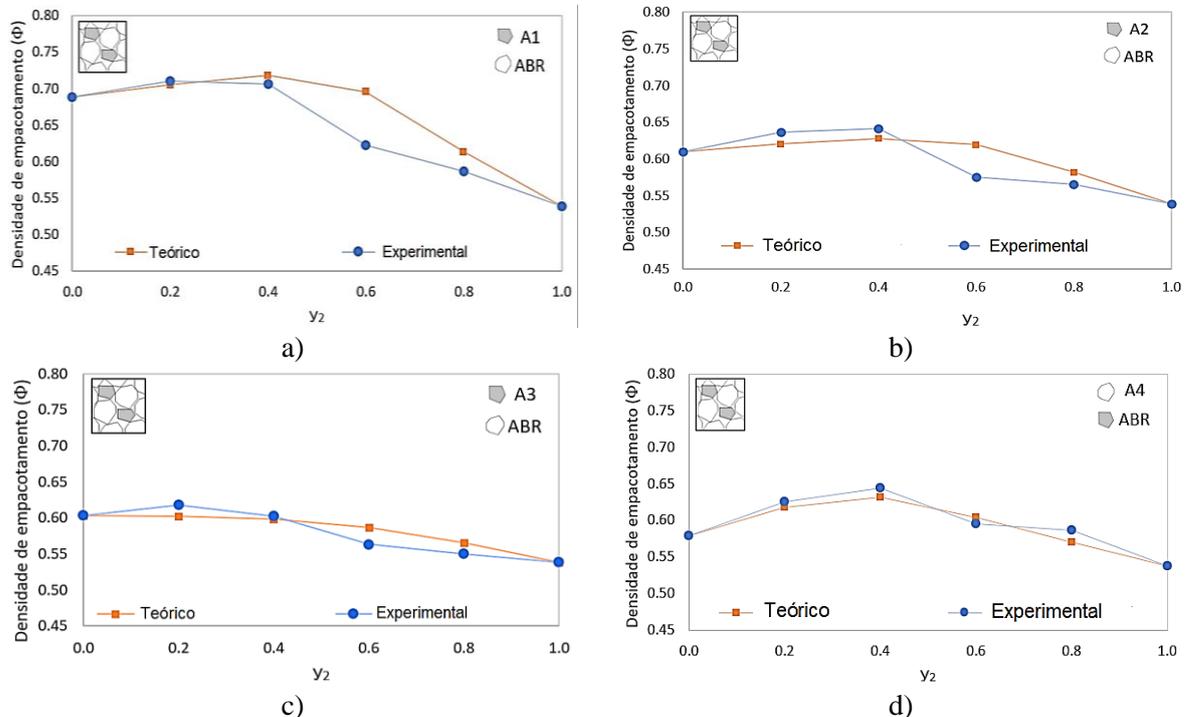
Fonte: Elaboração própria.

Nas misturas com as duas parcelas mais grossas das areias (A1 e A2), os diâmetros médios das areias eram maiores que o diâmetro médio do ABR ($d_1 > d_2$), enquanto nas misturas com as parcelas mais finas (A3 e A4), os diâmetros médios das areias eram iguais ou menores que o do ABR ($d_1 \leq d_2$). Observou-se que a densidade de empacotamento atingiu valores maiores para um mesmo protocolo de ensaio quando uma classe de material apresentava o diâmetro característico do agregado maior que o da outra classe, com a combinação A1 e ABR1

apresentando valores maiores que A2 e ABR1. Este resultado também foi verificado por Cardoso (2020), que concluiu que quanto maior a diferença entre os diâmetros das partículas, maior será o adensamento da mistura.

No caso das misturas A3 e ABR, em que o diâmetro médio dos agregados é semelhante ($d_1 = d_2$), e na mistura entre a fração da areia A4 e ABR, na qual o diâmetro da areia é menor que o do ABR ($d_1 < d_2$), observou-se que a densidade de empacotamento foi menor em comparação com as situações anteriores. Os resultados das densidades de empacotamento das misturas binárias são apresentados na Figura 52 onde y_2 é o teor de substituição de areia por ABR. Os valores experimentais apresentados são valores médios.

Figura 52 – Comparação entre os resultados experimentais e analíticos da densidade de empacotamento de misturas binárias: a) A1 e ABR; b) A2 e ABR; c) A3 e ABR e; d) A4 e ABR.



Fonte: Elaboração própria.

Os erros médios entre os valores experimentais e analítico são apresentados na Tabela 36. No geral, apresentaram resultados inferiores a 5%. Apenas dois pontos apresentaram erros maiores: mistura com 40% de areia A1 e 60% de ABR, que apresentou um erro igual a 11,74% e mistura com 40% de areia A2 e 60% de ABR, que apresentou um erro igual a 7,69%. Estes erros maiores podem ter sido obtidos por uma falha no procedimento experimental, uma vez que o ABR tem uma tendência a sair do tubo cilíndrico quando inicia o procedimento de vibração. Desprezando estes dois pontos e considerando apenas as misturas binárias (desprezando os casos de 0 e 100% de areia e ABR), o erro médio obtido nas densidades de empacotamento foi de 2,01%. Este erro

relativamente pequeno sugere que, apesar do ABR se tratar de um material com baixo módulo de elasticidade e, conseqüentemente, ser muito deformável, pode-se empregar o MEC para prever as densidades de empacotamento de misturas com esse tipo de agregado e, possivelmente, utilizar-se esta teoria para a dosagem de concretos utilizando ABR.

Tabela 36 - Erros entre valores teóricos e experimentais para densidades de empacotamento de misturas binárias entre diferentes faixas granulométricas de areia e ABR.

Teor de ABR	MIX	A1	A2	A3	A4
20%	1	0,82%	2,51%	2,47%	1,10%
40%	2	1,63%	2,16%	0,69%	2,01%
60%	3	11,74%	7,69%	4,22%	1,45%
80%	4	4,55%	2,92%	2,69%	2,92%

Fonte: Elaboração própria.

4.1.2 Resultados dos ensaios com misturas binárias para determinar parâmetros necessários para consideração da FARP na dosagem científica de CUAD e CEUAD

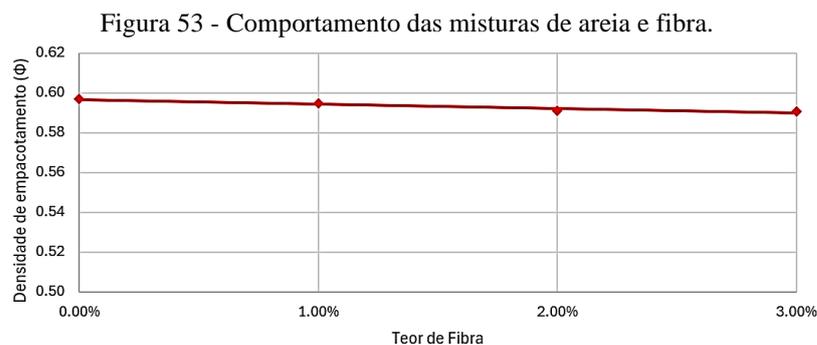
Para avaliar a influência da incorporação de FARP no concreto, adotou-se a metodologia de cálculo do volume perturbado. A Tabela 37 apresenta os valores de densidade de empacotamento com adições de fibra.

Tabela 37 - Influência das FARP nos valores de densidade de empacotamento real.

Massa de Areia (g)	Massa de Fibra (g)	Adição de FARP (%)	Densidade de Empacotamento Experimental da Mistura
2094.40	0	0	0.59688
2094.40	62.8	1	0.59460
2094.40	125.6	2	0.59115
2094.40	188.4	3	0.59058

Fonte: Elaboração própria.

Conforme apresentado, é possível perceber que existe uma redução nos valores de densidade de empacotamento experimental do agregado quando adicionadas as fibras, com redução chegando a 1.1% quando utilizado um teor de 3% de adição. A Figura 53 apresenta graficamente o comportamento das misturas de areia e fibra.



Fonte: Elaboração própria.

Os valores resultantes das densidades de empacotamento das misturas estão apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 - Valores de densidade de empacotamento teórico das misturas de areia e fibra.

Adição de FARP (%)	Densidade de Empacotamento teórico
0	0,59688
1	0,58798
2	0,57908
3	0,57018

Fonte: Elaboração própria.

Como observado, é evidente uma diminuição nos valores teóricos de densidade de empacotamento do agregado quando as fibras são adicionadas, com uma redução que chega a 4.5% quando é utilizado um teor de adição de 3%. Os erros médios entre os valores experimentais e teóricos apresentaram resultados inferiores a 5%, conforme a Tabela 39. Estes valores sugerem que a utilização da fibra de aço reciclada possui um comportamento que pode ser previsto no MEC, o que pode indicar ser possível utilizar esta teoria para a dosagem de concretos.

Tabela 39 - Erros entre valores teóricos e experimentais para densidades de empacotamento de misturas de areia e fibra.

Adição de FARP (%)	Erro (%)
0	0%
1	-1%
2	-2.1%
3	-3.6%

Fonte: Elaboração própria.

Como referência para trabalhos futuros, determinou-se a densidade de empacotamento da FARP, sendo utilizados 500g de fibra, submetidos ao ensaio de compactação e vibração, resultando em um valor de 0.16061. Embora esse dado não seja utilizado no procedimento de dosagem atual, se reconhece a importância para futuros procedimentos de dosagem realizados no *BétonLabPro*, onde possa ser solicitado um teor ideal de adição de fibras visando maximizar o empacotamento de partículas ou alguma característica do concreto. O valor de densidade de empacotamento considerando o volume perturbado por 2% de FARP consiste em 0.56241.

4.1.3 Densidade de empacotamento de partículas menores que 100 µm

Os valores de densidade de empacotamento do cimento CP V – ARI, sílica ativa e fíler calcário foram obtidos por meio do ensaio de demanda d'água. Além disso, no caso do cimento, foi necessário determinar sua densidade de empacotamento quando atingido o seu teor de saturação

de aditivo superplastificante, que foi determinado como 1%. A Tabela 40 apresenta os valores de densidade de empacotamento para materiais com partículas menores que 100 μm .

Tabela 40 - Valores de densidade de empacotamento para materiais em pó.

Material	Massa do material (g)	Massa de água (g)	Densidade de empacotamento
Cimento + 0% de Superplastificante	350	100	0.538
Cimento + 1% de Superplastificante	350	67	0.635
Sílica ativa	300	94.8	0.592
Fíler calcário	350	113	0.533

Fonte: Elaboração própria.

4.2 Simulações de dosagem realizadas com o *software* e produção de concretos

Após a inserção dos dados sobre os materiais e concretos empregados na calibração dos parâmetros, o *software* calcula os parâmetros p e q para cada um dos agregados empregados, resultando em valores de 4.8914 e 0.04386 para a areia, 2.8932 e 0.00082 para o fíler calcário e 0.0072 e 0.0665 para o ABR, respectivamente. Para a sílica ativa o valor de K_p foi de 0.9097. Com isso, pode-se iniciar o procedimento de simulação de dosagens. Na Tabela 41, são apresentados dois traços que foram simulados, ambos com resistência à compressão superior a 150 MPa e 125 MPa, respectivamente.

Tabela 41 – Dosagens e propriedades dos traços de CUAD simulados.

PROPRIEDADES	SIMUL1	SIMUL2
	CUAD \geq 150 MPa	CUAD \geq 125 MPa
S1 - ABR (kg/m^3)	0	0
S2 - Areia (kg/m^3)	526	537.4
S3 - Fíler de calcário (kg/m^3)	60.5	68.2
C1 - Cimento (kg/m^3)	1213.4	1096.9
SF1 - Sílica ativa (kg/m^3)	155.2	166.6
SP1 - Superplastificante (kg/m^3)	127.63	115.9
W - Água (kg/m^3)	110.7	150.5
S1 - ABR (%)	0	0
S2 - Areia (%)	90	89.08
S3 - Fíler de calcário (%)	10	10.92
Ponto de saturação (%)	1.01	1.01
Quantidade de superplastificante (%) *	3	3.01
Água efetiva (kg/m^3)	198.5	229.9
Total de ar (%)	7.5	7.3
a/c	0.164	0.21
Slump	0	0
Fc28 (MPa)	151.7	127.5
Índice de empacotamento de concreto não confinado	46.231	12.695
Índice de empacotamento de concreto não confinado	46.774	12.723

Em relação a massa do cimento*

Fonte: Elaboração própria.

Após essa verificação, procedeu-se à simulação de dosagem para o CEUAD, utilizando o traço SIMUL2 como referência. Assim, a Tabela 42 apresenta o traço de CEUAD simulado pelo *software*.

Tabela 42 - Propriedades do traço de CEUAD simulado.

PROPRIEDADES	SIMUL3 CEUAD \geq 125 MPa
S1 - ABR (kg/m ³)	26.9
S2 - Areia (kg/m ³)	493.8
S3 - Fíler de calcário (kg/m ³)	58.3
C1 - Cimento (kg/m ³)	1096.9
SF1 - Sílica ativa (kg/m ³)	166.6
SP1 - Superplastificante (kg/m ³)	115.85
W - Água (kg/m ³)	158.4
S1 - ABR (%)	10
S2 - Areia (%)	80.78
S3 - Fíler de calcário (%)	9.22
Ponto de saturação (%)	1.01
Quantidade de superplastificante (%) *	3.01
Água efetiva (kg/m ³)	229.9
Total de ar (%)	6.9
a/c	0.21
Slump	0
Fc28 (MPa)	112.6
Índice de empacotamento de concreto não confinado	12.371
Índice de empacotamento de concreto não confinado	12.399

Em relação a massa do cimento*

Fonte: Elaboração própria.

Como o traço de referência SIMUL1 apresentava uma resistência à compressão próxima de 125 MPa, o *software* realizou uma simulação de um concreto semelhante, aplicando as condições ideais de empacotamento para a mistura, e aplicou a redução de resistência gerada pela utilização do ABR.

Após os procedimentos de simulação, iniciou-se o processo de produção dos concretos. Com relação ao CAA, este concreto necessitou apenas do processo de fabricação de formas e moldagem dos elementos.

Os concretos CUAD e CEUAD foram produzidos no LEM-UnB, onde não foram observadas segregação de agregados nem exsudação. Além disso, as fibras e o ABR apresentaram uma boa distribuição dentro do concreto, sem aglomerações desses materiais. Embora o espalhamento não tenha sido medido, a fluidez foi considerada adequada para a utilização de fibras e para a moldagem dos corpos de prova nos primeiros minutos de produção. No entanto, essa propriedade foi perdida após aproximadamente 15 minutos.

4.3 Propriedades mecânicas

4.3.1 Resistência à compressão simples

A resistência média obtida para o concreto autoadensável foi de 61.67 MPa. Além disso, em relação ao ensaio de espalhamento (*slump flow*), o concreto atingiu um diâmetro de cerca de 740 mm. É importante ressaltar que a proposta de utilização do CAA neste estudo consiste basicamente em simular concretos convencionais utilizados em produções de grelhas de drenagem, sendo observado que a resistência obtida para esse material se apresenta em condições superiores ao convencional, uma vez que grelhas não são elementos estruturais e não necessitam atender ao disposto na NBR 6118 (ABNT, 2023).

Com relação ao CUAD, a resistência média à compressão foi de 128.76 MPa. No caso do CEUAD, a resistência média à compressão foi de 108.15 MPa. Os valores de médios de resistência à compressão e o desvio padrão são apresentados na Tabela 43.

Tabela 43 – Resistência à compressão de CAA, CUAD e CEUAD.

Tipo	Resistência média à compressão ± Desvio padrão (MPa)
CAA	61.67 ± 5.01
CUAD	128.76 ± 1.65
CEUAD	108.15 ± 6.17

Fonte: Elaboração própria.

Como verificado, foi possível produzir um CUAD com resistência superior ao mínimo definido pela literatura, que vários trabalhos apontam ser 120 MPa (ASTM, 2017; ZANG *et al.*, 2022; LIU, WEI, 2022; MISHRA, SINGH, 2019; ZHUO *et al.*, 2023; e BAJABER, HAKEEM, 2021). Também foi possível produzir um CEUAD com resistência superior ao mínimo definido pela literatura, que alguns trabalhos apontam ser de 100 MPa (GB/T 31387, 2015; PHAM *et al.*, 2021; e ZHANG *et al.*, 2022).

Foi verificada a perda de resistência associada a utilização do ABR, com uma redução de 16% da resistência média à compressão quando foi substituída 10% de areia por ABR, em volume. Esse valor foi relativamente próximo do encontrado por Pham *et al.* (2021), no qual a redução de resistência foi de 14.91% com o teor de 10% de ABR.

Além disso, houve um acréscimo de 1,26 MPa entre a resistência estimada pelo *software* e a experimental para o CUAD e um decréscimo de 4.46 MPa entre a resistência estimada pelo *software* e a experimental para o CEUAD.

4.3.2 Resistência à flexão de 3 pontos

Para o teste de resistência à flexão do concreto autoadensável, os resultados de resistência à flexão estão presentes na Tabela 44, com uma média de 4.95 MPa.

Tabela 44 - Valores de resistência à flexão para o concreto autoadensável.

Amostras	Resistência à flexão (MPa)
CAA1	5.01
CAA2	5.69
CAA3	4.14
Média ± Desvio Padrão	4.95 ± 0.63

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 54 mostra as curvas carga versus deslocamento horizontal para os diferentes corpos de prova quando sujeitos ao ensaio de flexão. O CAA3 foi utilizado como teste para o ensaio, sendo verificado uma inconsistência na leitura devido o posicionamento dos apoios, desta forma, seus resultados não foram incluídos.

Figura 54 - Evolução dos deslocamentos de acordo com a aplicação de cargas para o CAA.



Fonte: Elaboração própria.

Os valores das resistências à flexão para cada corpo de prova de CUAD, a média e desvio padrão são apresentados Tabela 45.

Tabela 45 - Valores de resistência a flexão para o CUAD.

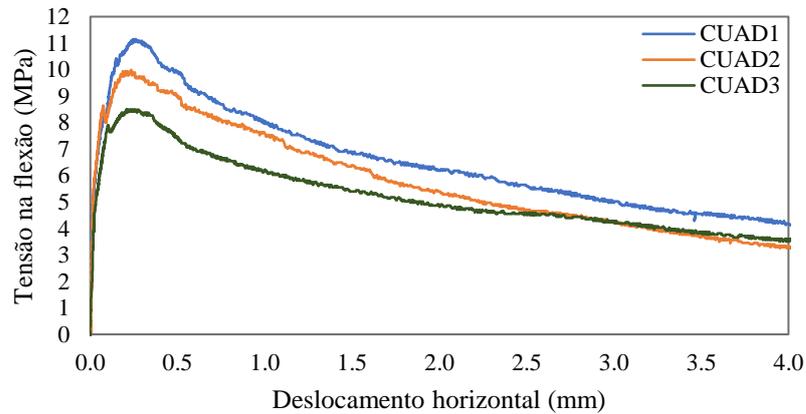
Amostras	Resistência à flexão (MPa)
CUAD 1	10.77
CUAD 2	9.83
CUAD 3	8.55
Média ± Desvio Padrão	9.72 ± 0.91

Fonte: Elaboração própria.

Wiemer *et al.* (2020) realizou um estudo sobre a resistência à flexão em fibras metálicas industriais, em CUAD, de 0.25 mm de diâmetro e 13 e 17 mm de comprimento, em teores de 1% e 2.5%. Os autores produziram corpos de prova de 40 × 40 × 160 mm, que foram submetidos ao ensaio de flexão com 4 apoios, também sugerido pela DIN EN 12390-5 (2017). Eles definiram a velocidade de deslocamento do pistão de 0.01 mm/s. Os resultados máximos médios para a resistência à flexão foram de 8.44 MPa e 11.59 MPa para a fibra de 13 mm nos teores de 1% e 2.5% e de 15.00 MPa e 19.18 MPa para a fibra de 17 mm nos teores de 1% e 2.5%, respectivamente.

Ao considerar os teores de 2.5%, o CUAD produzido com FARP (L:15.5/D:0.33) neste estudo apresenta uma redução de 16.13% e 49.32% nos valores de resistência à flexão em comparação as fibras industriais utilizadas por Wiemer *et al.* (2020), de 13 e 17 mm, respectivamente. Essa perda também foi verificada por Chen *et al.* (2023), conforme explicado na seção 2.3, no qual a FARP teve uma redução de 40.5% na resistência à flexão em comparação com as fibras industriais, para o mesmo teor de 2% de fibra. A Figura 55 mostra as curvas carga versus deslocamento horizontal para os diferentes corpos de prova quando sujeitos ao ensaio de flexão.

Figura 55 - Evolução dos deslocamentos de acordo com a aplicação de cargas para o CUAD.



Fonte: Elaboração própria.

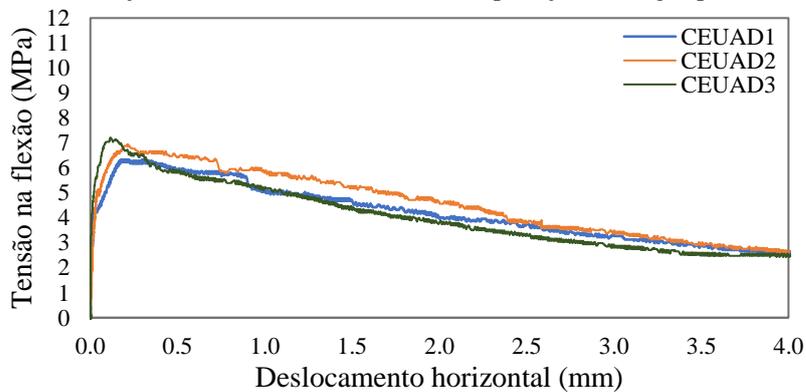
Os resultados para o CEUAD estão na Tabela 46, com uma média de 7.10 MPa. A Figura 56 mostra como as fissuras evoluíram com a carga aplicada.

Tabela 46 - Valores de resistência a flexão para o CEUAD.

Amostras	Resistência à flexão (MPa)
CEUAD 1	7.22
CEUAD 2	6.58
CEUAD 3	7.52
Média ± Desvio Padrão	7.10 ± 0.39

Fonte: Elaboração própria.

Figura 56 - Evolução das fissuras de acordo com a aplicação de cargas para o CEUAD.



Fonte: Elaboração própria.

Conforme esperado, os resultados de resistência à flexão apresentaram uma redução devido a presença do ABR, com uma diminuição de 27% nos valores médios encontrados, essa redução foi maior do que a observada por Lyu *et al.* (2023), que obteve uma redução de 12.9% para o teor de 20% de substituição de areia por ABR e sem a presença de fibras (ver Tabela 5). Apesar disso, ocorreu um aumento significativo na resistência, de 196.36% e 143.43%, quando utilizados CUAD e CEUAD ao invés do concreto autoadensável.

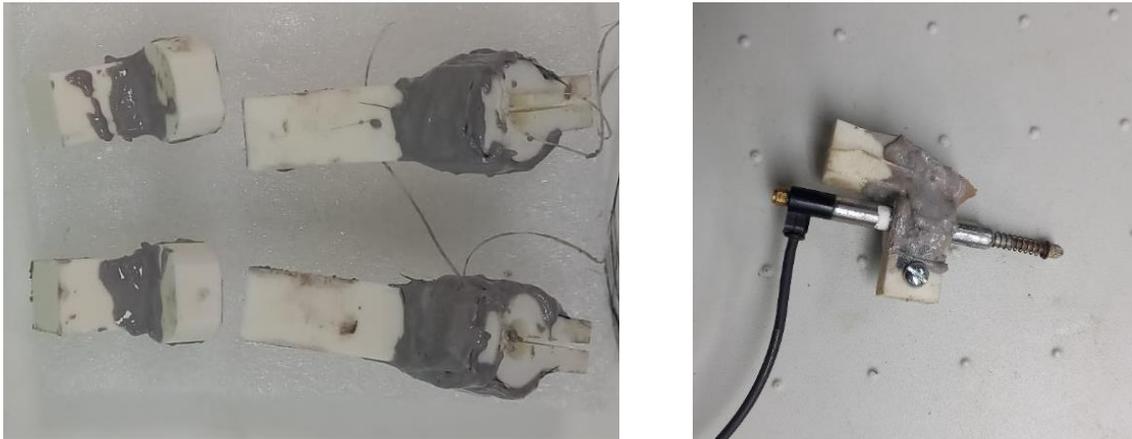
Além disso, é possível perceber que os concretos apresentam uma melhoria nas propriedades mecânicas, principalmente ao se utilizarem fibras, devido a melhora na ductilidade desse material, o que corrobora com a proposta de utilização de CUAD e CEUAD para confecção de grelhas de drenagem.

4.3.3 Resistência ao impacto de cilindros

Para este ensaio, buscou-se aplicar medições quantitativas, incluindo a leitura da abertura de fissuras utilizando um transdutor de deslocamento. Isso ocorreu porque, com a aplicação linear de carga, as fissuras tenderiam a se direcionar no sentido da aplicação. Além disso, foram utilizados extensômetros elétricos para medir o deslocamento na parte inferior do corpo de prova, conforme apresentado na seção 3.7.3.

Não se teve sucesso no monitoramento com os transdutores de deslocamento devido a uma série de problemas evidenciados, discutidos a seguir. A princípio, as leituras pareciam ser mais influenciadas pelos deslocamentos provocados devido ao movimento de corpo rígido do corpo de prova. Isto ocorria pelo fato de haver uma folga entre a peça de contenção da areia e corpo de prova e o próprio corpo de prova. A cada queda do peso, o corpo de prova sofria um pequeno salto e mudava um pouco a sua posição. Apesar das peças plásticas estarem muito bem coladas ao próprio corpo de prova, ainda se registrava pequenos deslocamentos que não estavam associados com a abertura das fissuras. Depois de um certo número de quedas do peso de carga verificou-se que as peças plásticas descolaram ou quebraram. Ainda tentou-se reforçar as peças plásticas com resina reforçada com fibras de carbono, mas num estágio mais avançado foram identificados danos nas peças de fixação dos transdutores de deslocamento ao corpo de prova (ver Figura 57).

Figura 57 - Tentativa de reforço das peças 1 e 2 com resina e fibra de carbono.



Fonte: Elaboração própria.

Quanto à utilização do extensômetro elétrico, infelizmente, o aplicador de carga não possuía altura suficiente para separar o elemento, resultando em leituras mínimas de deformação, conforme mostrado na Figura 58.

Figura 58 - Proposta de leitura de deformação: a) Utilização de extensômetros elétricos para leitura de deformações e b) Aplicador linear completamente inserido no corpo de prova, após término do ensaio.



a)

b).

Fonte: Elaboração própria.

Apesar de não terem sido bem-sucedidas as medições de abertura de fissura e deslocamento, a proposta do ensaio de resistência ao impacto prosseguiu com a quantificação das quedas do peso até a ruptura dos corpos de prova, assim como é tradicionalmente feito na literatura (RAJ, NAGARAJAN, PALLIKKARA, 2022; e LIU, WEI, 2022). Os critérios de ruptura considerados foram diferentes para o CAA-SA e para os concretos com algum tipo de reforço: CAA-CA e concretos com fibras (CUAD e CEUAD) pois eles apresentaram modos de ruptura diferentes. Considerou-se o número de quedas o necessário para a abertura abrupta da fissura e repentina separação do corpo de prova somente nos corpos de prova de CAA-SA, pois somente

neste tipo de concreto que se obteve este modo de ruptura frágil (ver Figura 59). No caso dos CAA-CA, CUAD e CEUAD, considerou-se que atingiu a ruptura quando a lâmina do aplicador linear de carga encontrava-se totalmente inserida no corpo de prova (ver Figura 58b).

Para o ensaio nos concretos autoadensáveis sem armadura, a ruptura ocorreu logo após a formação da primeira fissura. Diferentemente dos outros materiais esse concreto ficou totalmente dividido após a realização do ensaio. Os resultados experimentais para o ensaio de resistência ao impacto do concreto autoadensável sem armadura são apresentados na Tabela 47.

Tabela 47 – Número de quedas do martelo de carga para se atingir a ruptura nos corpos de prova de concreto autoadensável sem armadura (CAA-SA).

CP	Número de Quedas que Leva a Ruptura
IMP CAA-SA 1	76
IMP CAA-SA 2	142
IMP CAA-SA 3	76
IMP CAA-SA 4	105
Média ± Desvio Padrão	99 ± 27

Fonte: Elaboração própria.

Figura 59 - Apresentação das amostras de concreto autoadensável sem armadura após o ensaio.



Fonte: Elaboração própria.

As quantidades de quedas para o concreto autoadensável com e sem armadura apresentaram uma variação mínima, sugerindo que a armadura influenciou muito pouco na capacidade de resistência ao impacto, mas sua presença garante a estabilidade do elemento. Os resultados experimentais para o ensaio de resistência ao impacto do concreto autoadensável com armadura são apresentados na Tabela 48.

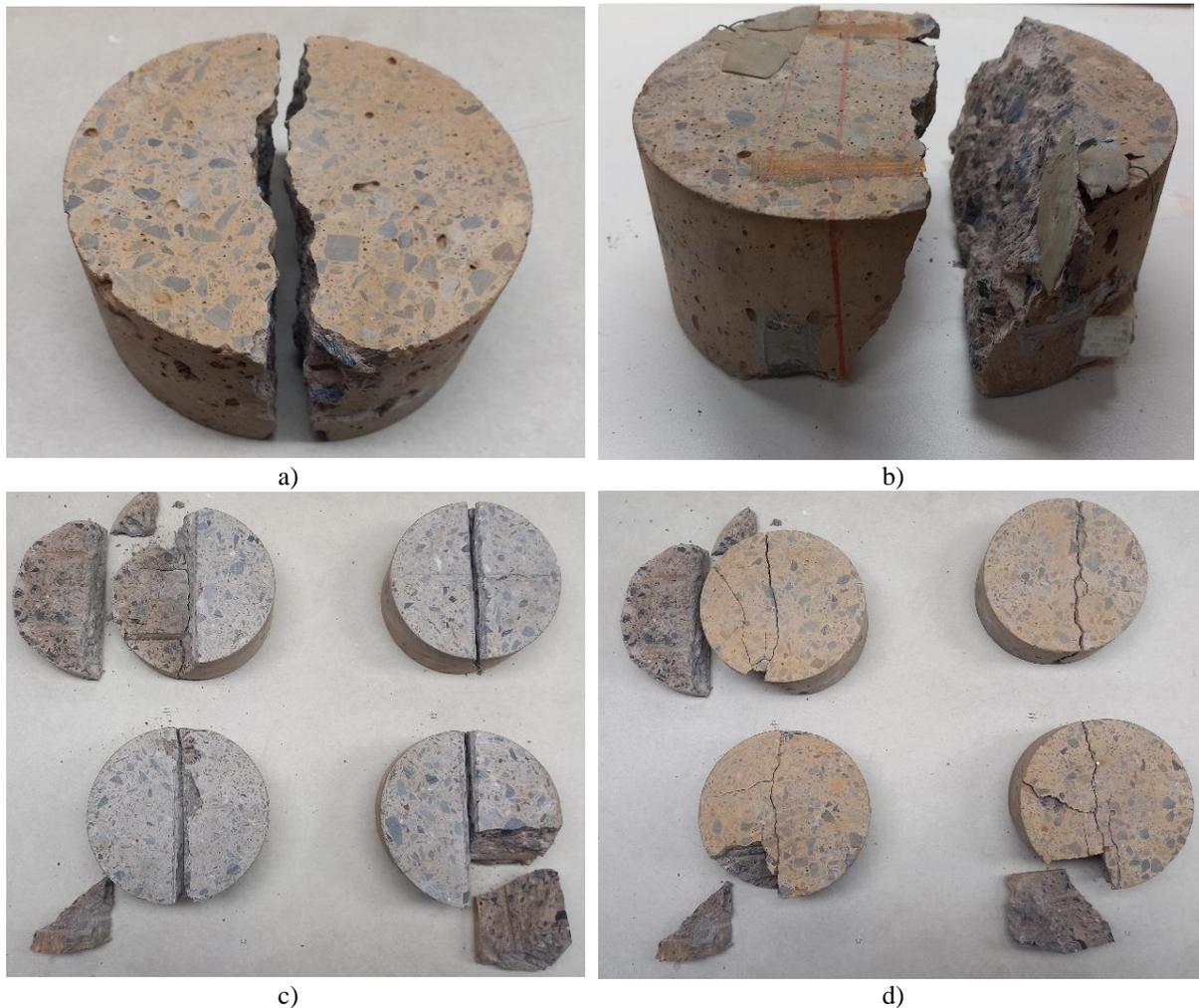
Tabela 48 – Número de quedas do martelo de carga para se atingir a ruptura nos corpos de prova de concreto autoadensável com armadura (CAA-CA).

CP	Número de Quedas que Leva a Ruptura
	73
IMP CAA-CA 2	131
IMP CAA-CA 3	94
IMP CAA-CA 4	97
Média ± Desvio Padrão	98 ± 20

Fonte: Elaboração própria.

Com relação ao ensaio nos concretos autoadensáveis com armadura, observou-se que mesmo após a total penetração do aplicador o material continuava unido, devido a presença do aço. A observação desse comportamento foi interessante pois tentou-se simular a taxa de aço utilizada em grelhas de drenagens comuns e verificou-se um comportamento no elemento quando apresentaram falhas estruturais. A Figura 60 exibe as amostras após ensaio.

Figura 60 – Aspecto dos corpos de prova de CAA sem e com armadura após a realização dos ensaios: (a) vista superior do CP CAA-SA 2; (b) vista inferior do CP CAA-SA 1; (c) vista superior dos CP CAA-CA; (d) vista inferior dos CP CAA-CA.



Fonte: Elaboração própria.

Os concretos com fibras, no caso o CUAD e CEUAD, apresentaram comportamento e modo de ruptura semelhantes. É importante ressaltar que mesmo com a penetração total do aplicador de carga, os corpos de prova continuaram totalmente unidos e caso o aplicador possuísse uma altura maior seria possível contabilizar mais quedas. Os resultados experimentais para o ensaio de resistência ao impacto do CUAD são apresentados na Tabela 49.

Tabela 49 – Número de quedas do peso de carga para se atingir a ruptura nos corpos de prova de CUAD.

CP	Número de Quedas que Leva a Ruptura
IMP CUAD 1	764
IMP CUAD 2	930
IMP CUAD 3	715
IMP CUAD 4	407
Média ± Desvio Padrão	693 ± 205

Fonte: Elaboração própria.

Com relação ao valor médio de resistência ao impacto para o CUAD, pode-se verificar que existiu uma variabilidade nos ensaios, que foram organizados em ordem crescente. Essa alta variabilidade nos ensaios também foi verificada por Liu e Wei (2022), apesar de o autor utilizar o modelo de impacto com esferas. O valor mais divergente do ensaio consiste no IMP CUAD 4, sendo que quando se desconsidera esse corpo de prova a média para o concreto é 803 ± 92 . Os resultados experimentais para o ensaio de resistência ao impacto do CEUAD são apresentados na Tabela 50.

Tabela 50 – Número de quedas do martelo de carga para se atingir a ruptura nos corpos de prova de CEUAD.

CP	Número de Quedas que Leva a Ruptura
IMP CEUAD 1	812
IMP CEUAD 2	707
IMP CEUAD 3	974
IMP CEUAD 4	366
Média ± Desvio Padrão	725 ± 206

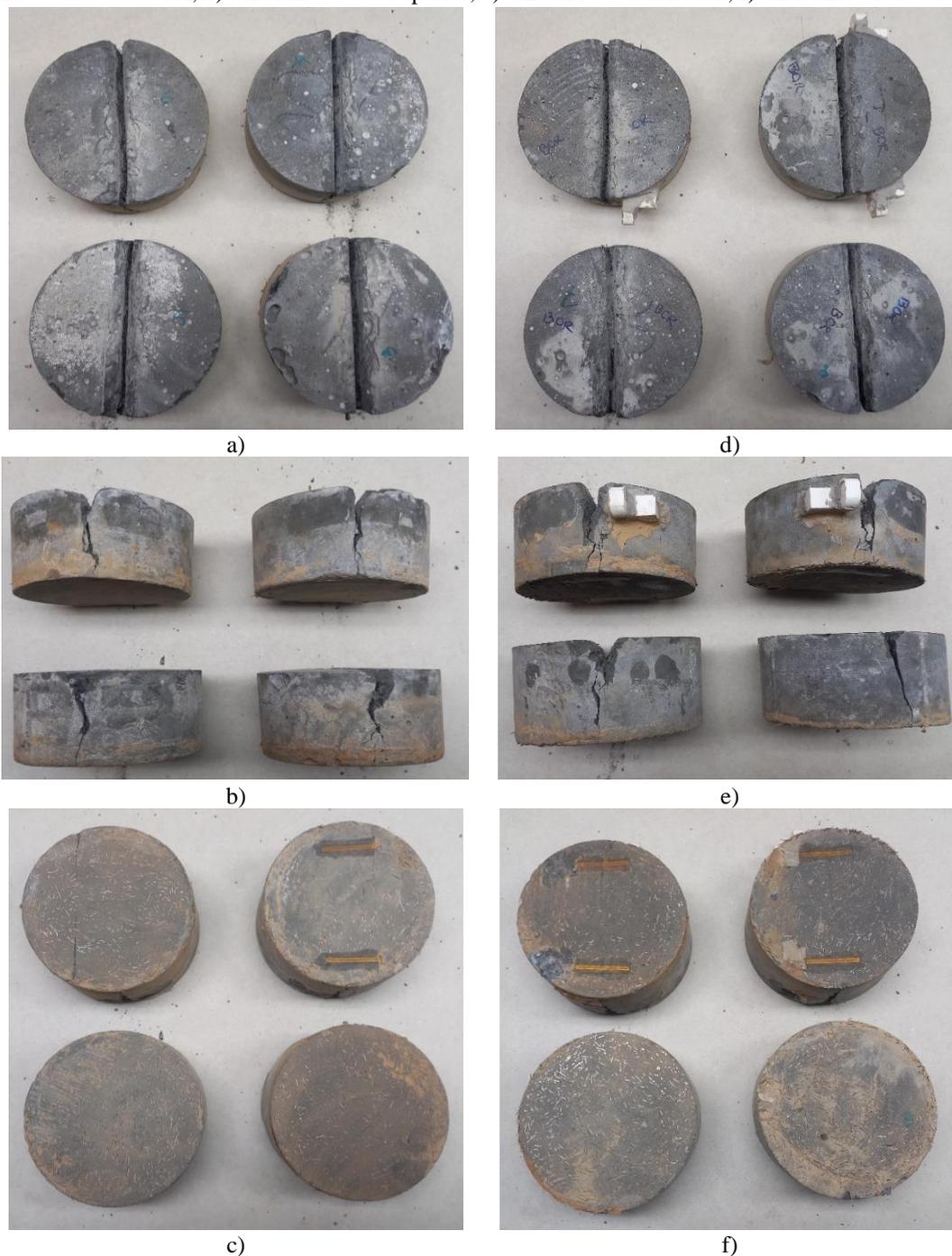
Fonte: Elaboração própria.

Com relação ao valor médio de resistência ao impacto para o CEUAD, pode-se verificar que existiu uma variabilidade nos ensaios, que foram organizados em ordem crescente. O valor mais divergente do ensaio consiste no IMP CEUAD 4, sendo que quando se desconsidera esse corpo de prova a média para o concreto é 831 ± 109 . A Figura 61 apresenta os modos de ruptura dos corpos de prova de CUAD e CEUAD após o ensaio.

É possível observar que o ensaio apresentou uma variabilidade considerável entre as amostras de um mesmo tipo de concreto, mesmo com a utilização da cama de areia e aplicação de carga linear, essa alta variabilidade nos resultados do ensaio também foi verificada por Liu e Wei (2022), que verificou uma média de 623 ± 209 impactos para a formação da primeira fissura

em CUAD com fibras industriais, além disso, a quantidade mínima e máxima de impactos foi de 300 e 1240, respectivamente.

Figura 61 - Apresentação das amostras após ensaio: a) CUAD - Vista superior, b) CUAD - Vista lateral; c) CUAD - Vista - inferior; d) CEUAD - Vista superior, e) CEUAD - Vista lateral; f) CEUAD: Vista - inferior.



Fonte: Elaboração própria.

Os valores encontrados neste estudo sugeriram uma quantidade média maior de quedas para o CEUAD, com um aumento de 4.6% em relação ao CUAD. Com relação ao CAA-SA, ocorreu ainda uma redução de 1% na quantidade de quedas quando utilizado o CAA-CA, e um aumento de 700% e 732% na quantidade de quedas quando utilizado o CUAD e CEAD.

No entanto, ainda indicaram a necessidade de mais estudos para verificar o aumento da absorção de energia proporcionado pelo ABR, uma vez que os resultados foram relativamente próximos. Além disso, é importante destacar que o aplicador linear de carga apresentou deformações excessivas durante a realização dos ensaios, necessitando em diversos momentos ser realizado o alinhamento do elemento, o que pode ter influenciado nos resultados. Desta forma, acredita-se que é necessário utilizar materiais mais resistentes, para garantir a uniformidade da aplicação de carga.

4.3.4 Resistência ao impacto em grelhas

Para a realização do ensaio com as grelhas foi utilizado o mesmo aparato, uma vez que ele foi projetado para atender os dois modelos de ensaio. Os resultados do ensaio, ou seja, a quantidade de quedas necessárias para levar o elemento a ruptura é apresentado na Tabela 51.

Tabela 51 - Resultado do ensaio de impacto para grelhas.

CP	Número de Quedas que Leva a Ruptura
IMPGR CAA-CA 1	88
IMPGR CEUAD 1	76

Fonte: Elaboração própria.

Verifica-se que as quantidades de quedas necessárias para levar o elemento a ruptura foi relativamente próxima, com uma diferença de 13.6% na quantidade de quedas. Apesar de parecer que o CEUAD apresenta uma resistência menor ao impacto, é importante ressaltar que o elemento foi confeccionado com cerca de metade da altura da grelha de drenagem convencional, sendo que após novas medições verificou-se uma altura de 26.78 ± 2.50 mm, enquanto a grelha convencional apresentava cerca de 60 mm. A Figura 62 apresenta ainda as grelhas após a realização dos ensaios.

Figura 62 – Aspecto das grelhas após o ensaio: a) vista superior da grelha tradicional, de CAA-CA e b) vista superior da grelha de CEUAD.



Fonte: Elaboração própria.

Pode-se observar que enquanto a grelha de concreto convencional manteve-se íntegra mesmo com a falha total do concreto. Tal fato não foi observado na grelha de CEUAD, mas tal fato pode ser atribuído principalmente devido a diferença nas dimensões e inércia dos elementos. Com relação ao aplicador de carga linear, novamente foi verificada uma deformação excessiva, ver Figura 63, que pode ter influenciado nos resultados do ensaio. Desta forma, sugere-se a utilização de materiais mais resistentes para a confecção deste elemento.

Figura 63 - Aplicador linear de carga após o ensaio de impacto com grelhas.



Fonte: Elaboração própria.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões relacionadas à pesquisa, a qual teve como foco produzir e avaliar as propriedades mecânicas do CUAD e CEUAD.

- A utilização da metodologia de dosagem científica, por meio do *software*, foi satisfatória. Conseguiu-se apresentar os concretos com resistência média à compressão superior ao estimado, sendo 128.76 MPa e 108.15 MPa para o CUAD e CEUAD, respectivamente. Apesar disso, devido o acréscimo de metodologias para favorecer a produção dos concretos, acredita-se que se deve realizar mais estudos para garantia de um procedimento mais eficiente.
- Foi possível a utilização da FARP no procedimento de dosagem, com a presença da fibra favorecendo as propriedades mecânicas dos concretos. Além disso, pelas características adotadas para esse material percebeu-se que ocorreu apenas uma pequena redução na densidade de empacotamento experimental do agregado miúdo, cerca de 1.1% quando é utilizado um teor de adição de 3%.
- Apesar de não ter sido possível realizar as leituras quantitativas da abertura de fissuras e deformação no ensaio de impacto neste estudo, acredita-se que é possível a sua utilização. É necessário realizar mudanças nos materiais de confecção das peças e nos procedimentos de fixação, sendo assim, este estudo contribuiu para análises preliminares do comportamento desses elementos e de possibilidade de melhorias.
- A utilização do ABR afetou todas as propriedades mecânicas dos concretos, com a resistência à compressão, flexão e impacto variando de -16%, -27% e 4.6%, respectivamente. Desta forma, entende-se que o desempenho mecânico do concreto foi reduzido com a utilização do ABR, inclusive a tenacidade. Com relação ao ensaio de resistência ao impacto, não ficou claro se houve ganho de absorção de energia, possivelmente devido às condições de contorno utilizadas no ensaio.
- Com relação as grelhas de drenagem, apesar de as grelhas de CEUAD apresentarem $\frac{1}{2}$ da altura das grelhas de CAA, a quantidade de quedas do ensaio de impacto foi apenas 13.6%.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliar a utilização da nanossílica como material cimentício suplementar para dosagens científicas, utilizando *softwares* como o *BétonLabPro*;
- Avaliar a utilização de outros testes de resistência ao impacto para concretos que possam substituir elementos como as grelhas;

- Verificar outras dimensões e teores de ABR em CEUAD;
- Aprimorar os procedimentos de produção das FARPS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

544.2R-89. ACI. **Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete**. 1999.

ABID *et al.* **Suggested modified testing techniques to the ACI 544-R repeated drop-weight impact test**. *Construction and Building Materials*, 244. 2020.

ACI Committee 446. **Dynamic Concrete Fracture Report**. American Concrete Institute. Michigan. 2004.

AGHAMOHAMMADI, *et al.* **Mechanical Properties and Impact Resistance of Concrete Pavement Containing Crumb Rubber**. *International journal of geomechanics*. 2024. DOI10.1061/IJGNAI.GMENG-7620.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. 1 ed., São Paulo, PINI, 2000.667p.

ARTACHO, B. **Tyre-truing automation using Computer Numerical Control with integrated Programmable Logic Controller**. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR13956-1: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1:2009: Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605:2017: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607:2018: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pegas**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:2018: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2023: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:2018: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2022: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:2019: Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:2009: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30:2001: Agregado miúdo - Determinação de absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:2006: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:2009 - Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ASTM C1856/C1856M-17. **Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete.** 2017.

AZMEE, N. M. SHAFIQ, N. **Ultra-high performance concrete: from fundamental to applications.** Case Stud Constr Mater. 2018.

BAJABER, M.A. HAKEEM, I.Y. **UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review.** Journal of Materials Research and Technology, Volume 10, 2021, ISSN 2238-7854.

BARBOSA, J. S. **Aplicação do concreto de ultra alto desempenho em viga pré-moldada protendida para pontes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

BASF. **We create chemistry.** Glenium® 51, Aditivo super plastificante de terceira geração, 2019.

BINDIGANAVILE, V. BANTHIA, N. **Generating dynamic crack growth resistance curves for fiber-reinforced concrete.** Experimental Mechanics 45(2): 112-122. 2005.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** LEI N° 12.305, 2010.

CARDOSO, M. G. **Contribuições para dosagem de concretos autoadensáveis reforçados com fibras pelo método do empacotamento compressível.** Dissertação de Mestrado - Universidade De Brasília. 2020.

CHEN, *et al.* **Enhancing the dynamic splitting tensile performance of ultra-high performance concrete using waste tyre steel fibres.** Journal of Building Engineering 80: 108102. 2023.

CHRIST, R. TUTIKIAN, B. F. HELENE, P. **Proposition of Mixture Design Method for Ultra-High- Performance Concrete.** ACI MATERIALS JOURNAL, v. 119, p. 79-90, 2022.

CHRIST *et al.* **Effect of type of mixer on rheological and mechanical behavior of ultra-high-performance concrete.** Structural Concrete, v. 24, p. 1-15, 2023a.

CHRIST *et al.* **Evaluation of Ultra-High-Performance Concrete Columns at High Temperatures after 180 Days of Curing.** Buildings, v. 13, p. 2254-2269, 2023b.

COSTA, M. S. **Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos produzidos com agregados miúdos reciclados e metacaulim dosados pelo modelo de empacotamento**

compressível. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2021.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach.** CRC Press. 1999.

DE LARRARD, F. SEDRAN, T. **Mixture-Proportioning of High-Performance Concrete.** Cement and Concrete Research, 32, 1699-1704. 2002.

DIN EN 12390-5. **Testing Hardened Concrete—Part 5: Flexural Strength of Test Specimens.** Beuth Verlag GmbH: Berlin, Germany, 2017.

DF, B. d. **Passagens subterrâneas do Plano Piloto estão em péssimas condições.** 2021. Disponível em: <https://globoplay.globo.com/v/9170307/>. Acesso em: 03 de setembro de 2022.

FADZIL, *et al.* **Alteration of Nano Metakaolin for Ultra High Performance Concrete.** In InCIEC 2013; Springer: Singapore, 2014; pp. 887–894.

FANTILLI, A. P. Dehkordi, F. M. **Two-Stage Cementitious Composites Containing Recycled Steel Fibers.** ACI Materials Journal, 119, p. 197-206, 2022.

FRAGA, *et al.* **Ultrasonication effect of silica fume and colloidal nanosilica on cement pastes.** Revista Matéria. V25 N04. 2020.

FRANÇA, L. H. P. **Caracterização e modelagem numérica do comportamento não linear do concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras metálicas.** Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. 2021.

FRAZÃO, C. M. V. **Recycled steel fiber reinforced concrete for structural elements subjected to chloride attack: mechanical and durability performance.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade do Minho. 2019.

FRAZÃO, *et al.* **An experimental investigation on the post-cracking behaviour of Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete.** Fibre Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications. 2018.

FORMAGINI, S. **Utilização do modelo de empacotamento compressível de partículas para otimização de misturas granulares.** Doutorando em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2003.

FUJIKAKE, *et al.* **Impact Response of Reinforced Concrete Beam and Its Analytical Evaluation.** Journal of Structural Engineering-ASCE 135(8): 938-950. 2009.

GANJIAN, E. KHORAMI, M. MAGHSOUDI, A. **Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete.** Construction and building materials. 2009. DOI10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020

GB/T 31387. **Reactive powder concrete.** Chinese Standard. 2015.

GOMES, C. L. **Dosagem de Concretos com Agregados Reciclados por Meio do Modelo de Empacotamento Compressível.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. 2024.

GUL, S. NASEER, S. **Concrete Containing Recycled Rubber Steel Fiber**. 25th International Conference on Fracture and Structural Integrity. *Procedia Structural Integrity* 18 (2019) 101–107.

HABEL, K. GAUVREAU, P. **Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) to impact and static loading**. *Cement and Concrete Composites*. Volume 30, Issue 10. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.09.001>.

JIN, *et al.* **Effect of rubber surface treatment on damping performance of rubber-mortar ITZ in rubberized concrete**. *Journal of building engineering*. 2024. DOI10.1016/j.job.2024.108441.

JUNIOR, G. B. S. **Design of an uhpc with local materials: procedures, properties and modelling parameters**. Tese (Doutorado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos. 2023.

JUVERIA, F. *et al.* **Impact of stabilisation on mechanical properties of recycled concrete aggregate mixed with waste tyre rubber as a pavement material**. *Case Studies in Construction Materials* 18. 2023.

KANG, *et al.* **Effect of steel slag on the mechanical properties and self-sensing capability of ultra-high performance concrete (UHPC)**. *Developments in the Built Environment*. Volume 17, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100342>.

KALOUSH, K.; CAMINHO, G. B.; ZHU, H. **Properties of crumb rubber concrete**. In: *CONCRETE MATERIALS 2005*, 2005. cap. 84th Annual Meeting of the Transportation-Research-Board, p. 8-14.

KARIMIPOUR, *et al.* **The effect of polypropylene fibres on the compressive strength, impact and heat resistance of self-compacting concrete**. *STRUCTURES* 25: 72-87. 2020.

KAZMI, S. *et al.* **Application of waste tire rubber and recycled aggregates in concrete products: a new compression casting approach**. *Resources, Conservation and Recycling* 167. 2021.

KHEYRODDIN. ARSHADI. KHEDRI. **The Resistance of Fiber-reinforced Concrete with Steel Fibers and CFRP to Drop-weight Impact**. *Periodica Polytechnica-Civil Engineering* 65(2): 666-676. 2021.

LI, R. ZHOU, D. WU, H. **Experimental and numerical study on impact resistance of RC bridge piers under lateral impact loading**. *Engineering Failure Analysis*. 2020.

LIN, *et al.* **Effect of silica fumes on fluidity of UHPC: Experiments, influence mechanism and evaluation methods**. *Construction and Building Materials*. Volume 210, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.162>.

LIU, Y. WEI, Y. **Drop-Weight Impact Resistance of Ultrahigh-Performance Concrete and the Corresponding Statistical Analysis**. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2022.

LOTHENBACH, *et al.* **Supplementary cementitious materials**. *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 1244-1256. 2011.

LU, Y. **Impact on Reinforced Concrete Structures**. Encyclopedia of Continuum Mechanics. H. Altenbach and A. Öchsner. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 1-24. 2018.

LYU, *et al.* **Influence of crumbed rubber inclusion on spalling, microstructure, and mechanical behaviour of UHPC exposed to elevated temperatures**. Construction and Building Materials, Volume 403. 2023.

MA, R. YANG , J. PENG, G. **Influence of steel fiber types on residual mechanical properties and explosive spalling of hybrid fiber reinforced ultra-high performance concrete: Optimization and evaluations**. Case Studies in Construction Materials. 2023.

MARTÍNEZ, *et al.* **Waste tyre pyrolysis – A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, 179-213. 2013.

MATTOS, M. **UE não poderá mais depositar pneus em aterros e quer exportá-los para o Brasil**. 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/ue-nao-podera-mais-depositar-pneus-em-aterros-e-quer-exportalos-para-o-brasil>. Acesso em: 28 de agosto de 2022.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Pontifícia Universidade Católica do Rio De Janeiro - PUC-RIO TESE. 2018.

MISHRA, O. SINGH, S. P. **An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete**. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 1–47. 2019.
doi:10.1080/21650373.2018.1564398.

MISHRA, S. SHARMA, H. **Impact Resistance and Mechanical Properties of UHPFRC**. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng (2019) 43:371–380. 2018. <https://doi.org/10.1007/s40996-018-0196-y>.

NAWAR, *et al.* **Numerical Analysis of Rubberized Steel Fiber Reinforced Concrete Beams Subjected to Static and Blast Loadings**. Infrastructures 2024, 9, 52. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9030052>.

OKONTA, F.N. TSHUKUTSOANE, K. KARIMI, B. **The impact of different shapes of aggregate and crumb rubber on the deformation properties of asphalt concrete**. Geomechanics and engineering. 2024. DOI: 10.12989/gae.2024.36.1.039.

PEREIRA, M. M. L. **Avaliação de desempenho mecânico e de durabilidade em concretos autoadensáveis com resíduo de marmoraria**. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 164 p. 2021.

PILAKOUTAS *et al.* **Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement**. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers (ICE): Engineering Sustainability, 157(3), 131-138. 2004.

PHAM, *et al.* **Experimental investigation on dynamic properties of ultra-high-performance rubberized concrete (UHPRuC)**. Construction and Building Materials, 307, p. 125104, 2021.

PREM, *et al.* **Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete**. World Acad. Sci. Eng. Technol. 2012, 68, 1969–1978.

QADIR, I. NOAMAN, A. **Effect of combination between hybrid fibers and rubber aggregate on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete.** Construction and building materials. 2024. DOI10.1016/j.conbuildmat.2024.135038.

QIN, X. KAEWUNRUEN, S. **Environment-friendly recycled steel fibre reinforced concrete.** Construction and Building Materials. 2022.

R7. **Furtos de tampas de bueiro dão prejuízo de R\$ 384 mil ao DF.** 2022. Disponível em: <https://noticias.r7.com/brasil/furtos-de-tampas-de-bueiro-dao-prejuizo-de-r-384-mil-ao-df-23012022>. Acesso em: 06 de setembro de 2022.

RAJ *et al.* **Performance of Fiber-Reinforced Rubcrete Curbs Subjected to Impact Loads.** Practice Periodical on Structural Design and Construction 27(3). 2022.

ROCHA, V. A. M. **Caraterização de betão de elevado desempenho reforçado com fibras incorporando pó de vidro.** Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. 2014.

RP, K. **A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects.** Nucl Eng Des 37:183–203. 1976.

SAINZ-AJA. *et al.* **Recycled Polyethylene Fibres for Structural Concrete.** APPLIED SCIENCES-BASEL 12(6). 2022.

SAMARAKOON, *et al.* **Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste.** Case Studies in Construction Materials. 2019.

SENTHIL, M. SANJITH, M. **Experimental investigation of concrete with recycled tyre-rubber waste as fine aggregate material.** Materiali in Tehnologije 56.5: Materiali in Tehnologije. 2022. Vol.56.

SHAHJALAL, M. *et al.* **Flexural response of fiber reinforced concrete beams with waste tires rubber and recycled aggregate.** *Journal of Cleaner Production* 278. 2021.

SILVA, F. D. A. **Toughness of non conventional composite materials.** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2004.

SILVA, A. S. M. **Dosagem de Concreto pelos métodos de empacotamento compressível e Aitcin-Faury modificado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2004.

SOARES. S. M. **Durabilidade de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com incorporação de pó de vidro frente à ação de cloretos.** Tese do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos. 2021.

SOUZA, A. L. R. **Efeitos da mistura de sílica ativa e nanossílica na durabilidade do concreto.** Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM03A/21, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 149 p. 2021.

SOUZA, T. d. S.; GALVÃO, S. P. **Ultra-high performance concrete – conception, performance and technical feasibility analysis in the current brazilian market.** UFRPE, 2021.

TUTIKIAN, B. F. ISAIA, G. C. HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. Concreto: Ciência e Tecnologia IBRACON.** 2011.

VOORT, V. **Design and field testing of tapered H-shaped Ultra High Performance Concrete piles.** Iowa State University. 2008.

WANG, X; XIA, J; LI, Y. **Compressive and flexural strength of ultra-high performance fibre reinforced concrete containing recycled rubber crumb.** Sustainable buildings and structures. 2016.

WALRAVEN, J. **The evolution of concrete.** Structural Concrete Lausanne: Fédération Internationale du Béton. 1999.

WIEMER, *et al.* **Effect of Fibre Material and Fibre Roughness on the Pullout Behaviour of Metallic Micro Fibres Embedded in UHPC.** Materials, 13, 3128. 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13143128>.

WU, *et al.* **Concrete reinforcement with recycled fibers.** Journal of Materials in Civil Engineering. 2000.

YANG, *et al.* **Push-out tests on studs with UHPC cover embedded in UHPC-NSC composite slab.** Construction and Building Materials. Volume 331, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127210>.

YANG, *et al.* **Mechanical Properties and Anti-Spalling Behavior of Ultra-High Performance Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers.** Materials 2019, 12(5), 783. <https://doi.org/10.3390/ma12050783>.

YU, *et al.* **Molecular modeling and experimental of rubber-based ultra-high-performance concrete.** Construction and Building Materials. Volume 421. 2024. ISSN 0950-0618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135417>.

YOO, D. BANTHIA, N. **Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review.** Cement and Concrete Composites **104**: 103389. 2019.

XIE, *et al.* **Effects of waste rubber particles on workability, mechanical, and sound insulation properties of recycled aggregate mortar.** Progress in rubber plastics and recycling technology. 2024.

ZAMANZADEH, *et al.* **Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete failing in bending and in shear.** Construction and Building Materials, 85, 195-207. 2015.

ZHANG, *et al.* **State-of-the-Art Review on Responses of RC Structures Subjected to Lateral Impact Loads.** Archives of Computational Methods in Engineering 28(4): 2477-2507. 2021.

ZHANG, *et al.* **Investigation on the quasi-static mechanical properties and dynamic compressive behaviors of ultra-high performance concrete with crumbed rubber powders.** 2022. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01904-0>

ZHANG, LIU, YARLAGADDA. **Experimental study on recycled concrete containing recycled fibers and organic fibers**. Proceedings of the 2017 6th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (ICEESD 2017). 129: 807-813. 2017.

ZHUO, *et al.* **Axial compressive behavior of environmentally friendly high-strength concrete: Effects of recycled tire steel fiber and rubber powder**. Journal of Building Engineering. 2023.

ZIELINSKI, A. J. **Concrete structures under impact loading - Rate effects**. Delft University of Technology. 1984.

ANEXO 1 - Propriedades do cimento inseridas no *software*.

Properties of cement

General | Composition | Properties | Skeleton | Fraction 1

Name: CIMENTO DISSERTAÇÃO - CPV NACIONAL

Date: 28/09/2023 20:58:28

Comments: Superplasticizer used:

Cost (Euro/t):

Save Cancel Tools

Properties of cement

General | Composition | Properties | Skeleton | Fraction 1

Constituents:

% Clinker (K)	95
% Fly ash (V)	0
% Limestone (L)	5
% Natural pozzolan (Z)	0
% Blastfurnace slag (S)	0
% Silica fume (D)	0
% Others	0

Bogue composition:

% C3S	70
% C2S	10
% C3A	5
% C4AF	10
% Others	5

mean % of active alkali:

maximum % of active alkali:

Save Cancel Tools

Properties of cement

General | Composition | Properties | Skeleton | Fraction 1

Comp. strength at 1 day	22.24
Comp. strength at 2 days	<input type="text"/>
Comp. strength at 3 days	30.04
Comp. strength at 7 days	37.47
Comp. strength at 28 days	43.09
Comp. strength at 90 days	<input type="text"/>
Comp. strength at 360 days	<input type="text"/>

Density (kg/m3): 3000

Heat capacity (kJ/K/Kg):

Saturation amount (%): 1

Autogenous shrinkage Kc (MPa):

Save Cancel Tools

Properties of cement

General | Composition | Properties | Skeleton | Fraction 1

Diameter	Passing %	β	β^*
0,02 μ	0	0,4269	0,5196
0,022 μ	0	0,4269	0,5196
0,025 μ	0,1	0,4269	0,5196
0,028 μ	0,1	0,4269	0,5196
0,032 μ	0,2	0,4269	0,5196
0,036 μ	0,2	0,4269	0,5196
0,04 μ	0,28	0,4269	0,5196
0,045 μ	0,28	0,4269	0,5196
0,05 μ	0,28	0,4269	0,5196
0,056 μ	0,28	0,4269	0,5196
0,063 μ	0,28	0,4269	0,5196
0,071 μ	0,28	0,4269	0,5196
0,08 μ	0,28	0,4269	0,5196
0,09 μ	0,28	0,4269	0,5196

Residual packing densities constant for each fraction

Graph Tools

Properties of cement

General | Composition | Properties | Skeleton | Fraction 1

Fraction: 0,02 μ / 56 μ

Without admixture:

Experimental packing density: 0,538

Packing index: 6,7

Confinement: No

With saturation amount:

Experimental packing density: 0,635

Packing index: 6,7

Confinement: No

Save Cancel Tools

ANEXO 2 - Propriedades da areia inseridas no software.

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Name: AREIA 0.150-3ART

Date: 28/09/2023 20:58:28

Comments:

Cost (Euro/t):

Save, Cancel, Tools

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Bond coef. p: 4.9797

Ceiling coef. q (MPa⁻¹): 0.04565

Traction coef. kt (MPa^{-0.43}):

Elastic modulus (GPa):

Density (kg/m³): 2618

Water absorption (%): 0.65

Heat capacity (kJ/K/kg):

mean % of active alkali:

maximum % of active alkali:

Save, Cancel, Tools

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Diameter	Passing %	β	β^*
80 μ	0	0.5746	
90 μ	4.4	0.5746	
100 μ	8.4	0.5746	
112 μ	12.6	0.5746	
125 μ	16.7	0.5746	
140 μ	21	0.5746	
160 μ	26	0.5746	
180 μ	36.9	0.5746	
200 μ	46.6	0.5746	
224 μ	57	0.5746	
250 μ	70.9	0.5746	
280 μ	85.1	0.5746	
315 μ	100	0.5746	

Graph, Tools

Residual packing densities constant for each fraction

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Fraction: 80 μ / 315 μ

Without admixture:

Experimental packing density: 0.56241

Packing index: 9

Confinement: Cylinder

Enter the dimensions of the cylinder in mm:

\varnothing : 150

H: 226.5

Save, Cancel, Tools

ANEXO 3 - Propriedades do ABR inseridas no software.

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Name: BORRACHA COMPLETA

Date: 30/09/2023 14:30:53

Comments:

Cost (Euro/t):

Save Cancel Tools

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Bond coef. p: 4,9797

Ceiling coef. q (MPa⁻¹): 0,04565

Traction coef. Kt (MPa^{-0.43}):

Elastic modulus (GPa):

Density (kg/m³): 1152

Water absorption (%): 30

Heat capacity (kJ/K/Kg):

mean % of active alkali:

maximum % of active alkali:

Save Cancel Tools

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Diameter	Passing %	β	β^*
80 μ	0	0,5332	
90 μ	0,3	0,5332	
100 μ	0,6	0,5332	
112 μ	1	0,5332	
125 μ	1,3	0,5332	
140 μ	1,6	0,5332	
160 μ	2	0,5332	
180 μ	7,1	0,5332	
200 μ	11,6	0,5332	
224 μ	16,4	0,5332	
250 μ	21,1	0,5332	
280 μ	26	0,5332	
315 μ	38,1	0,5332	
355 μ	50,3	0,5332	

Graph Tools

Residual packing densities constant for each fraction

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Fraction: 80 μ / 630 μ

Without admixture:

Experimental packing density: 0,538

Packing index: 9

Confinement: Cylinder

Enter the dimensions of the cylinder in mm:

\varnothing : 150

H: 226,5

Save Cancel Tools

ANEXO 4 - Propriedades do filler calcário inseridas no *software*.

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Name: FILLER SAND

Date: 30/09/2023 00:22:41

Comments
Superplasticizer used:

Cost (Euro/t):

Save
Cancel
Tools

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Bond coef. p: 5

Ceiling coef. q (MPa⁻¹): 0,05991

Traction coef. Kt (MPa^{-0.43}):

Elastic modulus (GPa):

Density (kg/m³): 2709

Water absorption (%): 0,01

Heat capacity (kJ/K/Kg):

mean % of active alkali:

maximum % of active alkali:

Fines (less than 80 μ):

Nature: Calcareous Siliceous

Estimate the specific surface Blaine (m²/kg): 1152

Saturation amount (%): 1

Save
Cancel
Tools

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Diameter	Passing %	β	β*
0.02 μ		0,4609	0,4609
0.022 μ	0	0,4609	0,4609
0.025 μ	0	0,4609	0,4609
0.028 μ	0,1	0,4609	0,4609
0.032 μ	0,1	0,4609	0,4609
0.036 μ	0,1	0,4609	0,4609
0.04 μ	0,32	0,4609	0,4609
0.045 μ	0,32	0,4609	0,4609
0.05 μ	0,32	0,4609	0,4609
0.056 μ	0,32	0,4609	0,4609
0.063 μ	0,32	0,4609	0,4609
0.071 μ	0,32	0,4609	0,4609
0.08 μ	0,32	0,4609	0,4609
0.09 μ	0,32	0,4609	0,4609

Graph

Tools

Residual packing densities constant for each fraction

Save
Cancel

Properties of sand

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Fraction: 0,02 μ / 35,5 μ

Without admixture:

Experimental packing density: 0,533

Packing index: 4,8

Confinement: No

With saturation amount:

Experimental packing density: 0,533

Packing index: 4,8

Confinement: No

Save
Cancel
Tools

ANEXO 5 - Propriedades da silica ativa inseridas no *software*.

Silica fume properties

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Name: SILICA ATIVA

Date: 28/09/2023 21:25:02

Comments: Superplasticizer used

Cost [Euro/t]:

Save, Cancel, Tools

Silica fume properties

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Pozzolanic coefficient

Kp at 1 day: Kp at 28 days: 0,5648

Kp at 2 days: Kp at 90 days:

Kp at 3 days: Kp at 360 days:

Kp at 7 days:

Density (kg/m3): 2181

Heat capacity (kJ/K/Kg):

mean % of active alkali:

maximum % of active alkali:

Saturation amount (%): 0,05

NF EN 206/CN standard

Addition accepted by the standard

Save, Cancel, Tools

Silica fume properties

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Diameter	Passing %	β	β^*
0.02 μ	0	0,5362	0,5694
0.022 μ	0,1	0,5362	0,5694
0.025 μ	0,1	0,5362	0,5694
0.028 μ	0,2	0,5362	0,5694
0.032 μ	0,2	0,5362	0,5694
0.036 μ	0,3	0,5362	0,5694
0.04 μ	0,36	0,5362	0,5694
0.045 μ	0,4	0,5362	0,5694
0.05 μ	0,5	0,5362	0,5694
0.056 μ	0,5	0,5362	0,5694
0.063 μ	0,6	0,5362	0,5694
0.071 μ	0,61	0,5362	0,5694
0.08 μ	0,7	0,5362	0,5694
0.09 μ	0,8	0,5362	0,5694

Graph

Residual packing densities constant for each fraction

Save, Cancel, Tools

Silica fume properties

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Fraction: 0,02 μ / 56 μ

Without admixture

Experimental packing density: 0,592

Packing index: 4,8

Confinement: No

With saturation amount

Experimental packing density: 0,6235

Packing index: 4,8

Confinement: No

Save, Cancel, Tools

ANEXO 6 - Propriedades do superplastificante inseridas no *software*.

Superplasticizer properties

General

Name: MASTER GLENIUM

Date: 28/09/2023 23:21:23

Comments:

Cost (Euro/kg):

Solid content (%): 28.5

Density (kg/l): 1,067

mean % of active alkali:

maximum % of active alkali:

Save

Cancel