



Estado do Paraná

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS - PPGCA

**Uso de Agregados Reciclados de Concreto em substituição ao
agregado gráúdo natural na produção de concretos estruturais**

Renan Rauber

Toledo – Paraná – Brasil

2024



Estado do Paraná

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - Unioeste
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS - PPGCA

Uso de Agregados Reciclados de Concreto em substituição ao agregado gráúdo natural na produção de concretos estruturais

Renan Rauber

Projeto de Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Unioeste/*Campus* Toledo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra

Co-orientador: Dirceu Baumgartner

Co-orientador: Fulvio Natercio Feiber

DEZEMBRO/2024

Toledo – PR

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Rauber, Renan

USO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO GRAÚDO NATURAL NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS / Renan Rauber; orientador Carlos Eduardo Tino Balestra; coorientador Dirceu Baumgartner. -- Toledo, 2024.
143 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Toledo) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, 2024.

1. Resíduos de concreto. 2. Construção Civil. 3. Concreto com resíduos reciclados. I. Tino Balestra, Carlos Eduardo, orient. II. Baumgartner, Dirceu, coorient. III. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Renan Rauber

**“USO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO AO
AGREGADO GRAÚDO NATURAL NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS
ESTRUTURAIS”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais – Mestrado, do Centro de Engenharias e Ciências Exatas, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, pela Comissão Examinadora composta pelos membros:

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra (Presidente)

Prof. Dr. Cleber Antônio Lindino

Prof. Dr. Thiago Guerra

Renan Rauber

Aprovada em: 16 de dezembro de 2024.
Local de defesa: Via remota

“Olho por olho e o mundo acabará cego.”
Mahatma Gandhi

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de viver e superar desafios.

A minha família que em todos os momentos esteve presente, se mostrando solícito a ajudar em todos os âmbitos do trabalho, inclusive colocando a mão na massa sempre que necessário. Além disso, minha esposa Patrícia e meu filho Vicente que tiveram muita paciência entendendo todos os momentos de ausência para testes, silêncio para estudo e compreensão sempre que necessário.

Ao meu professor orientador Carlos Balestra, que em todos os momentos esteve presente e solícito para colaborar, debater, ensinar e repassar sábios conhecimentos.

Aos membros da banca que demonstraram disponibilidade tanto na qualificação quanto na defesa para contribuírem com seu conhecimento para desenvolvimento do trabalho.

Ao meu ex-aluno e colega de profissão Eng. Rudimar Tondo e toda sua equipe da Trevo, que em todos os momentos demonstraram disponibilidade e vontade de cooperar e colaborar com conhecimento, debates e claro, cimento.

A UNIOESTE – Cascavel e a UTFPR – Toledo e seus respectivos técnicos de laboratório que sempre se dispuseram e colaboraram para ensinamentos e uso cientificamente adequado de equipamentos e ensaios.

A Univel que sempre mostrou disponibilidade e cooperação para que a pesquisa fosse realizada sem empecilhos e que a ciência esteja sempre em desenvolvimento.

A todos os membros do Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais que trouxeram debates, conhecimentos e pertinência da importância da grande área de Ciências Ambientais.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos específicos.....	19
1.2	JUSTIFICATIVA	19
1.3	HIPÓTESES.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1	PANORAMA AMBIENTAL E A CONSTRUÇÃO CIVIL.....	21
2.2	COMPOSIÇÃO DO CONCRETO E AS CARACTERÍSTICAS DE SEUS CONSTITUINTES	25
2.3	CONCRETO ESTRUTURAL – DEFINIÇÕES E CARACTERÍSTICAS EM ESTADO FRESCO E ENDURECIDO	27
2.4	A PRODUÇÃO DE CONCRETO EM CENTRAIS	34
2.5	DEFINIÇÕES, LEGISLAÇÃO E NORMATIZAÇÃO RELACIONADA AOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	37
2.6	O CONCEITO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A CRONOLOGIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NAS CONFERÊNCIAS DAS NAÇÕES UNIDAS.....	40
2.7	ESTADO DA ARTE SOBRE O USO DE RESÍDUOS NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS	42
3	METODOLOGIA DA PESQUISA	46
3.1	DESCRIÇÃO METODOLÓGICA.....	46
3.2	ENSAIOS A SEREM REALIZADOS NOS AGREGADOS MIÚDOS, GRAÚDOS E RESÍDUOS DE CONCRETO.....	49
3.2.1	Obtenção dos agregados de resíduo do concreto	49
3.2.2	Ensaio de Granulometria por peneiramento	50
3.2.3	Índice de forma dos agregados	51
3.2.4	Teor de Material Pulverulento.....	52
3.2.5	Massa específica dos agregados	53
3.3	Ensaios a serem realizados no concreto no estado fresco	54
3.3.1	Dosagem experimental do concreto segundo o método IPT/USP	54

3.3.2 Massa específica do concreto no estado fresco	55
3.3.3 Ensaio de abatimento de tronco de cone (Slump test), moldagem e cura de corpos de prova de concreto.	56
3.4 ENSAIOS A SEREM REALIZADOS NO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	57
3.4.1 Absorção de água por capilaridade	57
3.4.2 Ensaio destrutivos: Tração e compressão nos corpos de prova.....	57
3.4.3 Ensaio não destrutivo e de durabilidade	58
3.5 TRATAMENTO DOS DADOS	59
3.5.1 Compressão uniaxial e Tração por compressão diametral	60
3.5.2 Ultrassom.....	60
3.5.3 Carbonatação	60
3.5.4 Absorção por capilaridade	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1 GRANULOMETRIA: AGREGADO MIÚDO, AGREGADO GRAÚDO NATURAL E ARCO	61
4.2 ÍNDICE DE FORMA DOS AGREGADOS.....	63
4.3 MATERIAL PULVERULENTO DOS AGREGADOS	65
4.4 MASSA ESPECÍFICA.....	65
4.5 CARACTERÍSTICAS DOS TRAÇOS	66
4.6 ENSAIOS MECÂNICOS.....	70
4.6.1 Compressão uniaxial	70
4.6.2 Tração por compressão diametral	77
4.7 ENSAIOS DE DURABILIDADE	82
4.7.1 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.....	82
4.7.2 Absorção por capilaridade	86
4.7.3 Carbonatação	92
4.8 DIAGRAMAS MÉTODO IPT/EPUSP	96
4.9 ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO ₂	100
5. CONCLUSÕES	103
REFERÊNCIAS.....	106
ANEXO A1 – Dados e diagramas de capilaridade	116
ANEXO A2 – Diagramas método IPT/EPUSP.....	140

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Participação global de edifícios e construções operacionais e processos CO ₂ emissões, 2021	21
Figura 2. Geração de RCD no Brasil e por grande região - Comparativo 2021 e 2022 (toneladas)	22
Figura 3. Relação resistência a compressão e fator a/c	26
Figura 4. Esquema de concreto dosado em central	35
Figura 5. Disposição deste excedente de concreto na central.....	36
Figura 6. Esquema cronológico eventos internacionais sustentabilidade	40
Figura 7. Levantamento quantitativo de pesquisa Web of Science. (a) Dados considerando os termos “recyc*” e ”concrete”. (b) “Dados considerando os termos “recyc*” e “structural concrete”	42
Figura 8. Processo de britagem e peneiramento do resíduo de concreto. (a) vista do processo de trituração. (b) vista da separação entre as frações miúda e graúda.....	50
Figura 9. Curva granulométrica agregados	62
Figura 10. Formato ARCO em granulometria de 19mm até 4,75 mm	64
Figura 11. Presença de água no traço S506.....	69
Figura 12. Problema de adensamento em traço S506.....	70
Figura 13. Tendência de dados traços rico a) de 0% a 15% de substituição e b) de 15% a 100% de substituição	71
Figura 14. Tendência de dados traços intermediário a) de 0% a 20% e b) de 20% a 100%.....	72
Figura 15. Tendência de dados traços pobre.....	73
Figura 16. Tendência de dados traços pobre de 0% a 20% de substituição....	73
Figura 17. Ruptura em compressão diametral de substituição 100% em traço pobre.....	74
Figura 18. Tendência de dados a compressão diametral de traços rico a) de 0% a 50% e b) de 50% a 100%	79
Figura 19. Tendência de dados a compressão diametral de traços intermediário a) de 0% a 20% e b) de 20% a 100%	80
Figura 20. Tendência de dados a compressão diametral de traços pobre a) de 0% a 15% e b) de 15% a 100%.....	81

Figura 21. Correlação entre velocidade de pulso ultrassônico e resistência a compressão para traços pobres a) com ajuste linear b) com ajuste quadrático	85
Figura 22. Absorção por capilaridade em traço intermediário de referência	87
Figura 23. Absorção por capilaridade em traço intermediário com substituição de 100%	88
Figura 24. Porcentagem com quantidade máxima absorvida - traço rico	91
Figura 25. Correlação entre absorção por capilaridade e velocidade de pulso ultrassônico. a) traço rico b) traço intermediário c) traço pobre.....	92
Figura 26. Carbonatação em padrão convencional, do traço S205	95
Figura 27. Profundidade incomum de carbonatação de topo.....	95
Figura 28. ARCO carbonatados	96
Figura 29. Curvas de dosagem para o traço referência.....	98
Figura 30. Diagrama de capilaridade referência traço rico	116
Figura 31. Diagrama de capilaridade referência traço intermediário	117
Figura 32. Diagrama de capilaridade referência traço pobre	118
Figura 33. Diagrama de capilaridade S5 traço rico	119
Figura 34. Diagrama de capilaridade S5 traço intermediário	120
Figura 35. Diagrama de capilaridade S5 traço pobre	121
Figura 36. Diagrama de capilaridade S10 traço rico.....	122
Figura 37. Diagrama de capilaridade S10 traço intermediário	123
Figura 38. Diagrama de capilaridade S10 traço pobre.....	124
Figura 39. Diagrama de capilaridade S15 traço rico.....	125
Figura 40. Diagrama de capilaridade S15 traço intermediário	126
Figura 41. Diagrama de capilaridade S15 traço pobre.....	127
Figura 42. Diagrama de capilaridade S20 traço rico.....	128
Figura 43. Diagrama de capilaridade S20 traço intermediário	129
Figura 44. Diagrama de capilaridade S20 traço pobre	130
Figura 45. Diagrama de capilaridade S50 traço rico.....	131
Figura 46. Diagrama de capilaridade S50 traço intermediário	132
Figura 47. Diagrama de capilaridade S50 traço pobre.....	133
Figura 48. Diagrama de capilaridade S75 traço rico.....	134
Figura 49. Diagrama de capilaridade S75 traço intermediário	135
Figura 50. Diagrama de capilaridade S75 traço pobre.....	136
Figura 51. Diagrama de capilaridade S100 traço rico.....	137

Figura 52. Diagrama de capilaridade S100 traço intermediário.....	138
Figura 53. Diagrama de capilaridade S100 traço pobre.....	139
Figura 54. Diagrama Traço Referência	140
Figura 55. Diagrama traço S5.....	140
Figura 56. Diagrama traço S10.....	141
Figura 57. Diagrama traço S15.....	141
Figura 58. Diagrama traço S20.....	142
Figura 59. Diagrama traço S50.....	142
Figura 60. Diagrama traço S75.....	143
Figura 61. Diagrama traço S100	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Correspondência entre classe de agressividade, consumo de cimento e o fator a/c.....	30
Tabela 2. Classes de abatimento do concreto segundo suas aplicações.....	31
Tabela 3. Qualidade do concreto através de ensaio de ultrassom	33
Tabela 4. Exemplos regulamentação e características concretos com agregado reciclado.....	44
Tabela 5. Características concretos com agregado reciclado.....	45
Tabela 6. Quantitativo de corpos de prova e seus respectivos ensaios	49
Tabela 7. Tamanhos de peneira da série normal e série intermediária	51
Tabela 8. Análise número de grãos necessários por peneira para agregado graúdo natural e ARCO	63
Tabela 9. Índice de forma agregado graúdo natural	64
Tabela 10. Resultados material pulverulento.....	65
Tabela 11. Resultados massa específica e massa específica saturada superfície seca de agregado graúdo natural e ARCO.....	66
Tabela 12. Parâmetros dos traços em estado fresco.....	67
Tabela 13. Resistência à compressão e desvio padrão segundo diferentes traços	70
Tabela 14. Resistência à tração e desvio padrão	78
Tabela 15. Percentual de resistência da tração em relação a compressão.....	82
Tabela 16. Velocidade de propagação de onda com cura úmida até 28 dias..	83
Tabela 17. Velocidade de propagação de onda com cura úmida até 21 dias e posterior secagem e realização de ensaio de absorção por capilaridade	84
Tabela 18. Ajuste Slump x velocidade pulso ultrassônico	86
Tabela 19. Dados absorção por capilaridade	89
Tabela 20. Resultados dos ensaios de carbonatação acelerada.....	93
Tabela 21. Curvas e ajustes para consumo de cimento e resistência	99
Tabela 22. Valores mínimos de resistência, consumo de cimento e fator a/c	100
Tabela 23. Absorção por capilaridade referência traço rico.....	116
Tabela 24. Absorção por capilaridade referência traço intermediário.....	117
Tabela 25. Absorção por capilaridade referência traço pobre	118
Tabela 26. Absorção por capilaridade S5 traço rico	119
Tabela 27. Absorção por capilaridade S5 traço intermediário.....	120

Tabela 28. Absorção por capilaridade S5 traço pobre	121
Tabela 29. Absorção por capilaridade S10 traço rico	122
Tabela 30. Absorção por capilaridade S10 traço intermediário.....	123
Tabela 31. Absorção por capilaridade S10 traço pobre	124
Tabela 32. Absorção por capilaridade S15 traço rico	125
Tabela 33. Absorção por capilaridade S15 traço intermediário.....	126
Tabela 34. Absorção por capilaridade S15 traço pobre	127
Tabela 35. Absorção por capilaridade S20 traço rico	128
Tabela 36. Absorção por capilaridade S20 traço intermediário.....	129
Tabela 37. Absorção por capilaridade S20 traço pobre	130
Tabela 38. Absorção por capilaridade S50 traço rico	131
Tabela 39. Absorção por capilaridade S50 traço intermediário.....	132
Tabela 40. Absorção por capilaridade S50 traço pobre	133
Tabela 41. Absorção por capilaridade S75 traço rico	134
Tabela 42. Absorção por capilaridade S75 traço intermediário.....	135
Tabela 43. Absorção por capilaridade S75 traço pobre	136
Tabela 44. Absorção por capilaridade S100 traço rico	137
Tabela 45. Absorção por capilaridade S100 traço intermediário.....	138
Tabela 46. Absorção por capilaridade S100 traço pobre	139

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Classes de agressividade ambiental (CAA).....	29
Quadro 2. Exemplo de nomenclaturas por dosagem e percentual de substituição	47

RESUMO

A construção civil gera muitos resíduos devido ao desperdício em métodos convencionais. Em 2021, foram coletadas 48,375 milhões de toneladas de resíduos no Brasil, majoritariamente cerâmicos e cimentícios (concretos e argamassas). O concreto, produzido em centrais dosadoras de concreto, possui benefício pela padronização e consequente confiabilidade das misturas, alinhadas aos parâmetros de projeto. Contudo, as sobras de material geram resíduos sólidos destinados a aterros sanitários. Em uma central dosadora com produção mensal de 3 mil m³, estima-se a geração de 2,5 a 3 m³/dia de resíduos, cerca de 7 toneladas diárias apenas em uma central dosadora oeste do Paraná. Este trabalho utiliza, resíduos de concreto como substitutos dos agregados graúdos naturais (britas) em concretos estruturais. Resíduos de concreto provenientes de uma central em Toledo/PR foram coletados e triturados obtendo agregados com dimensão máxima característica de 19 mm. As taxas de substituição de agregados naturais por agregados reciclados foram de 5%, 10%, 15%, 20%, 50%, 75% e 100%. Sua viabilidade foi analisada através dos ensaios mecânicos e de durabilidade. Foram realizados ensaios de granulometria, quantidade de material pulverulento, absorção de água, abatimento de tronco de cone, compressão uniaxial, tração por compressão diametral, velocidade de pulso ultrassônico e carbonatação. Os concretos foram dosados conforme o método IPT/USP, relacionando consumo de cimento, resistência à compressão e abatimento, fornecendo então diagramas em diferentes percentuais de substituição, estabelecendo base para utilização dos referidos traços de concreto pelas usinas de concreto, e suas respectivas características citadas anteriormente. O agregado reciclado de concreto se mostrou mais lamelar, podendo ter influenciado características como resistência a compressão. O abatimento ficou na faixa de 160±20mm e por isso, todas as misturas com substituição necessitaram uso de aditivos para alcance de abatimento. A massa específica do concreto no estado fresco foi influenciado, sendo reduzida em maiores teores de substituição. Na resistência a compressão, traço pobre teve aumento de resistência até 20% de substituição, com posterior redução. Para o traço rico houve redução em todos os traços, porém, não superiores a 29,4%. No traço intermediário, os valores oscilaram entre aumento e redução de resistência, não ultrapassando 21% de redução. A qualidade do concreto possuiu qualidade muito fraca para o traço de 50% de substituição em traço pobre. Os demais ficaram com velocidades de pulso ultrassônico acima de 2,98 km/s. A profundidade de carbonatação na superfície teve valor máximo de carbonatação com 20% de substituição e foi de 18mm, porém, os agregados reciclados são mais porosos, gerando frentes mais suscetíveis a ataques por gás carbônico. A substituição de 100% gerou concretos com significativa redução de resistência para os três traços, sendo que para o traço pobre, isso ocorreu após 20% de substituição. Para os traços intermediário e rico, até 75% a redução se tornou menos significativa. Desse modo, a minimização de resíduos descartados, a redução de emissão de CO₂ e a diminuição na extração de matéria prima, tornam as substituições ambientalmente positivas.

PALAVRAS CHAVE: resíduos de concreto; construção civil; concreto com resíduos reciclados; concreto estrutural; usinas de concreto.

ABSTRACT

The construction industry generates a lot of waste due to waste in conventional methods. In 2021, 48.375 million tons of waste were collected in Brazil, mostly ceramic and cement (concrete and mortar). Concrete, produced in concrete batching plants, has the benefit of standardization and consequent reliability of the mixtures, verified according to the design parameters. However, the leftover material generates solid waste destined for landfills. In a plant with a monthly production of 3 thousand m³, it is estimated that 2.5 to 3 m³/day of waste is generated, around 7 tons per day in a plant in western Paraná alone. This work uses concrete waste as a substitute for natural coarse aggregates (gravel) in structural concrete. Concrete waste from a plant in Toledo/PR was found and crushed, and aggregates with a maximum characteristic dimension of 19 mm were found. The replacement rates of natural aggregates by recycled aggregates were 5%, 10%, 15%, 20%, 50%, 75% and 100%. Their observations were confirmed through mechanical and durability tests. Tests were performed on particle size, quantity of powdery material, water collection, cone slump, uniaxial analysis, diametrical tensile strength, ultrasonic pulse velocity and carbonation. The concretes were dosed according to the IPT/USP method, relating cement consumption, compressive strength and slump, thus providing diagrams in different replacement percentages, establishing a basis for the use of the aforementioned concrete mixes by concrete plants, and their respective characteristics mentioned above. The recycled concrete aggregate proved to be more lamellar, which may have influenced characteristics such as compressive strength. The slump was in the range of 160±20 mm and therefore, all mixtures with replacement required the use of additives to achieve slump. The specific mass of the concrete in the fresh state was influenced, being reduced at higher replacement levels. In compressive strength, the poor mix showed an increase in resistance up to 20% replacement, with subsequent reduction. For the rich mix, there was a reduction in all mixes, however, not greater than 29.4%. In the intermediate mix, the values oscillated between increased and reduced strength, not exceeding a 21% reduction. The quality of the concrete was very poor for the mix with 50% replacement in the lean mix. The others had ultrasonic pulse velocities above 2.98 km/s. The carbonation depth on the surface had a maximum carbonation value with 20% replacement and was 18 mm, however, the recycled aggregates are more porous, generating fronts that are more susceptible to attacks by carbon dioxide. The 100% replacement generated concretes with a significant reduction in strength for the three mixes, and for the lean mix, this occurred after 20% replacement. For the intermediate and rich mixes, the reduction became less significant up to 75%. Thus, the minimization of discarded waste, the reduction of CO₂ emissions and the decrease in the extraction of raw material make the replacements environmentally positive.

KEY-WORDS: concrete waste; civil construction; concrete with recycled waste; structural concrete; concrete plants.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade relaciona fatores econômicos e sociais ao meio ambiente tanto em nível local quanto global. Segundo estimativa do Our World in Data (2024), 88% da população brasileira em 2022 reside em áreas de localidade urbana. Em comparação à 2012, contando 10 anos de comparativo, a população urbana brasileira era de 84,9%. Tal panorama demonstra a necessidade de evolução na construção de infraestrutura nas cidades devido ao crescimento da população.

Demonstrando a importância da indústria da construção, segundo a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2022), no ano de 2021 e 2022, o PIB da Construção Civil possuiu variação positiva acumulada nos 4 trimestres em relação aos períodos anteriores. Ainda segundo o autor, o setor empregou de janeiro de 2021 a outubro de 2022 aproximadamente 530 mil pessoas com carteira assinada no setor, sendo que destas vagas, 41,8% foram empregadas na construção de edifícios. Além disso, o número de trabalhadores com carteira assinada em outubro de 2023 foi de aproximadamente 2,60 milhões, demonstrando a importância da construção civil no cenário econômico nacional. Todavia, mesmo considerando o expressivo papel da construção civil, a necessidade de infraestrutura ainda é significativa, principalmente considerando um déficit habitacional próximo a 7 milhões de moradias (CBIC, 2023).

Nesse aspecto, em contrapartida aos resultados econômicos positivos que a construção civil traz, essa indústria apresenta questões ambientais que necessitam de atenção. Segundo Nadazdi, Naunovic e Ivanisevic (2022) a sustentabilidade raramente inclui os aspectos ambientais, econômicos e sociais concomitantemente. Além disso, ao quantificar e descrever a composição dos resíduos, o plano de gestão pode ser aperfeiçoado, gerando melhores aproveitamentos nas taxas de reutilização e reciclagem.

Segundo Cavalliere et. al. (2019), em fase de projeto é possível determinar o potencial de aquecimento global em diferentes estágios de projeto, por meio de avaliação baseada em modelagem de informação da construção (BIM). É possível então realizar o levantamento dos impactos gerados através de análise contínua em todo o processo de projeto. O autor ressalta cautela ao realizar os levantamentos com níveis de desenvolvimento do projeto elevados,

em função de que havendo excessivos detalhes no projeto, pode ser que a quantificação dos impactos gerados pode ser superestimada.

Dessa maneira, surge a necessidade de busca por soluções em dois âmbitos distintos, porém complementares. Primeiro, a necessidade de redução da extração de recursos naturais devido à possibilidade de esgotamento de fontes para extração. Em segundo lugar, a destinação adequada dos resíduos advindos da construção civil, de forma a reduzir o volume de entulho gerado e, conseqüentemente, destinado a aterros, cuja vida útil, pode ser aumentada em caso de separação e reutilização/reciclagem adequada de resíduos. Além disso, quanto maiores os volumes de resíduos gerados, maior a necessidade de exploração de novas áreas para destinação.

Nesse aspecto, surge a possibilidade de incorporação de resíduos sólidos da construção civil à novos concretos e a NBR 15116 (2021) menciona a possibilidade de utilização em concretos para fins estruturais e não estruturais em seu item 5.2. Neste caso, a respectiva norma limita a utilização de agregado reciclado de concreto (ARCO) para fins estruturais em até 20% da massa de agregados totais. Dado que o concreto é o material predominante nas estruturas da construção civil e que o descarte de resíduos de concreto em centrais de produção é significativo, a busca por soluções que permitam a produção de concretos estruturais com maior proporção de agregados reciclados permanece como uma lacuna importante na literatura e demanda avanços científicos.

Desta maneira, este trabalho se propõe a avaliar não somente características mecânicas, mas também a durabilidade de concretos produzidos com resíduos de uma central da região oeste do estado do Paraná, com vistas à fornecer dados sobre o desempenho destes. Nesse aspecto, o presente trabalho se insere investigando se a utilização de resíduos de concreto de centrais pode ser potencialmente utilizada para produção de concretos estruturais, substituindo a brita (agregado graúdo) que é um dos elementos em maior quantidade na mistura de concreto. Para tanto, pretende-se avaliar diferentes dosagens de substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos provenientes de resíduos de concretos de centrais para a produção de concretos estruturais (resistência a compressão superior a 25MPa) avaliando tanto propriedades no estado fresco quanto endurecido.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar propriedades mecânicas e de durabilidade de concreto estruturais mediante a substituição do agregado graúdo de origem basáltica do concreto por resíduos provenientes de centrais dosadoras de concreto, considerando teores de substituição entre 0 e 100%.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar características dos agregados produzidos a partir da britagem de resíduos de concreto de uma central dosadora de concreto do oeste do estado do Paraná, por meio de ensaios de granulometria, massa específica, índice de forma de agregado graúdo e teor de material pulverulento.
- Avaliar características do concreto produzido com estes agregados e dosado pelo método IPT/USP no estado fresco, por meio do abatimento do tronco de cone, e endurecido, por meio de ensaios físicos como absorção de água por capilaridade.
- Realizar ensaios destrutivos (resistência à compressão, resistência à tração diametral) e não destrutivos (ultrassom) em concretos com diferentes níveis de substituição (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 50%, 75%, 100%) de agregado natural graúdo por agregado reciclado de concreto.
- Avaliar durabilidade do concreto endurecido com agregados reciclados por meio de ensaio de carbonatação acelerada.

1.2 JUSTIFICATIVA

O problema dos resíduos da construção civil é bem documentado na literatura, segundo Alotaibi, Martinez e Baniotopoulos (2024) que realizaram um compilado de autores levantando fatores comuns de desperdício na construção civil. Segundo o levantamento dos autores, há motivos como complexidade de projeto, erros documentais de projetos, erros de pedidos, produtos de baixa qualidade, estocagem inapropriada, transporte inadequado dentro da obra, sobras de materiais em obra, ausência de gestão, ausência de gestão de

resíduos. Dessa forma, avaliar a possibilidade de uso de agregado reciclado é uma estratégia para produzir concretos estruturais, visto que o setor da construção civil, além de consumir significativa porção dos recursos naturais em suas atividades, também produz um grande volume de resíduos como mencionado em ABREMA (2023). Nesse aspecto, reutilizar um material considerado resíduo em centrais de concreto possui potencial para redução tanto na extração de recursos naturais quanto no descarte dos resíduos gerados por parte das centrais dosadoras.

Para fins de exemplo e estimativa, um caminhão betoneira de 8m³ de concreto, com um consumo de cimento de 300 kg por m³, carrega em torno de 10 toneladas de agregado graúdo (brita). Se substituído apenas 5% dessa massa, é possível substituir em torno de 500 kg de material por caminhão de concreto. Dessa forma, a britagem para posterior incorporação em concretos estruturais é uma justificativa que reduz volume de material extraído e volume de resíduos descartados que uma central dosadora gera. Podendo inclusive gerar um ciclo, dentro da própria indústria de concreto usinado, que busque ao desperdício zero. Ou seja, a central dosadora prepara um processo de britagem, que resulte no material de tamanho desejado e ela mesmo incorpore o resultante em suas posteriores fabricações.

1.3 HIPÓTESES

A hipótese principal é que o concreto reciclado, após o processo de britagem, pode ser utilizado em aplicações estruturais com substituição de até 100% do agregado graúdo convencional, resultando em impactos de menor intensidade nas propriedades mecânicas, mantendo os valores mínimos de resistência exigidos e apresentando alterações moderadas na durabilidade.

Para validar a hipótese principal, é necessário testar duas premissas adicionais. A primeira é que, devido à não homogeneidade do agregado reciclado, a simples substituição do agregado convencional por este material não será suficiente para atender aos requisitos de concreto estrutural, como resistência à compressão, quantidade mínima de cimento e fator água/cimento. Assim, será preciso desenvolver um novo traço de concreto, incorporando aditivos superplastificantes para alcançar trabalhabilidade sem a queda da resistência à compressão. A segunda premissa é que, devido ao processo de

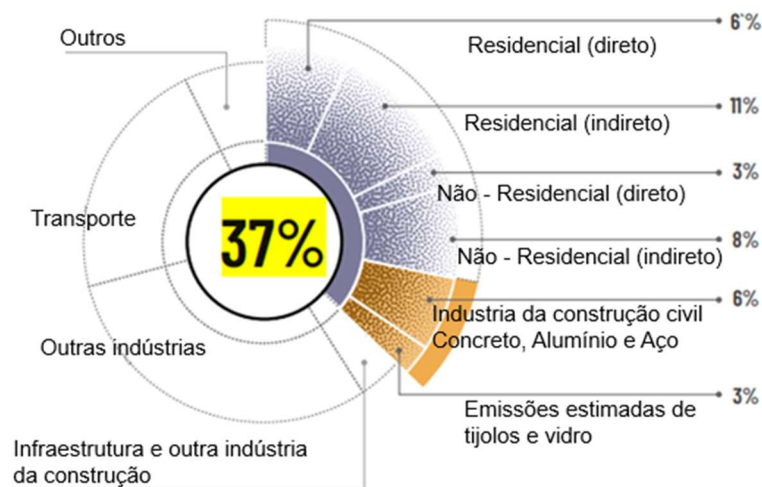
britagem, o agregado reciclado não terá o mesmo tamanho e formato que o agregado convencional, o que também exigirá ajustes no traço de concreto para garantir sua adequação estrutural.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PANORAMA AMBIENTAL E A CONSTRUÇÃO CIVIL

Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA (2023), o setor de construções contribui com 37% das emissões globais de carbono relacionados com a energia. A distribuição dos percentuais estão na Figura 1 a seguir. Também é notada que a indústria de aço, alumínio e concreto compõem 6% das emissões.

Figura 1. Participação global de edifícios e construções operacionais e processos CO₂ emissões, 2021



Fonte: PNUMA (2023)

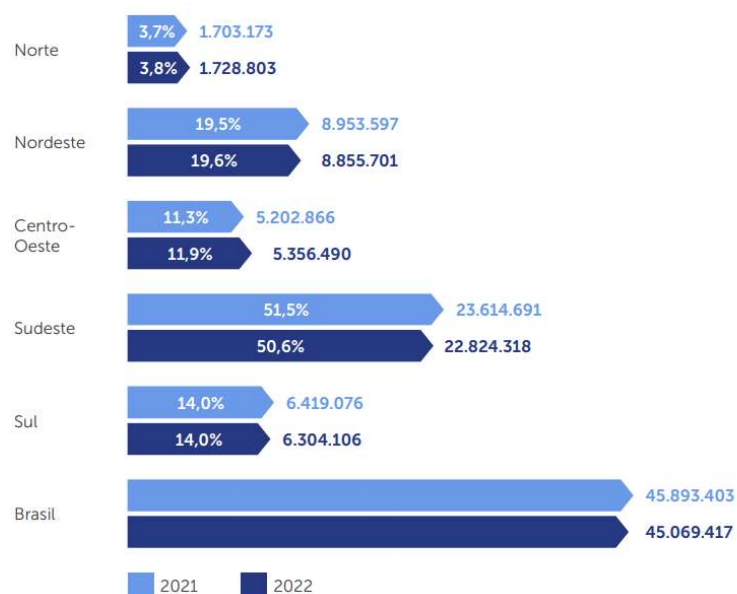
Segundo Alsheyab (2022), em relação ao lixo produzido, a prioridade sempre está em evitar o desperdício não gerando resíduos a serem destinados. Quando não é possível evitar a geração dos resíduos, há outra hierarquia entre cinco formas melhores do que o simples descarte:

- 1 Reduzir
- 2 Reutilizar

- 3 Reciclar
- 4 Recuperação
- 5 Descarte

Segundo a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2023), houve uma redução na geração de resíduos de construção e demolição em 1,8% entre 2021 e 2022. Em 2021 foram gerados 48,375 milhões de toneladas e em 2022, 45,069 milhões de toneladas. As regiões Sudeste foi a com maior redução na geração, sendo uma redução de 3,3%. Enquanto a região Norte teve acréscimo de 1,5% e a região Centro-Oeste 3,0%, conforme Figura 2.

Figura 2. Geração de RCD no Brasil e por grande região - Comparativo 2021 e 2022 (toneladas)



Fonte: ABREMA (2023)

Estes resíduos no Brasil, segundo Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (Brasil, 2002), podem ser classificados em categorias (Classes A, B C e D):

- Classe A: resíduos que possam ser reciclados ou reutilizados como agregados, como componentes cerâmicos, argamassas, concretos, demolição de peças pré-moldadas de concreto

- Classe B: resíduos que possam ser reciclados com outras destinações, como por exemplo plástico e papel;
- Classe C: resíduos sem tecnologia desenvolvida para reciclagem ou reaproveitamento, como por exemplo, resíduos de gesso;
- Classe D: resíduos perigosos, contaminados ou prejudiciais a saúde, como tintas, óleos e solventes.

Das classes mencionadas é possível a reutilização/reciclagem dos resíduos Classe A como agregados, evitando assim sua destinação para aterros sanitários. Todavia, a dificuldade de incorporação em processos internos da construção civil, acabam por gerar volumes maiores de resíduos a serem destinados em aterros específicos de classe A. Segundo Silva, Nagalli e Couto (2018), ao acompanhar o processo de demolição racionalizada, no qual as etapas de demolição são organizadas previamente, foi possível reaproveitar 40,1% dos resíduos gerados. Segundo Canejo (2021), a destinação final de resíduos pode ser reforma, desmanche, reciclagem ou recuperação energética, com o intuito de aumentar o valor do resíduo, buscando torná-lo economicamente viável. Não sendo possíveis destinações adequadas, reciclagem, reaproveitamento, entre outras opções de descarte adequado, é necessário encaminhar os resíduos para os aterros sanitários ou alguma outra possibilidade ambientalmente adequada.

Os resíduos de construção civil podem ser provenientes de diferentes fontes, desde a execução de reformas e excedentes de obra até retrabalhos em função do uso/aplicação inadequada dos materiais. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos – SINIR (2021), 93% do resíduo gerado pela construção civil é classificado como Classe A. Segundo SINIR (2020), a destinação dos RCD são nas seguintes proporções:

- 10% Reciclagem
- 33% Aterro sanitário
- 35% Aterro de Inertes
- 22% outras destinações

O aterro sanitário, segundo Telles (2022), busca enterrar os resíduos de tal forma que a própria decomposição gere redução de volume. Além disso, o aterro sanitário, segundo o autor deve possuir vida útil superior a 20 anos. Dessa maneira, ao dispor resíduos de construção, nesse tipo de solução ambiental,

acaba por dispor um volume elevado de resíduos que não entram em decomposição, reduzindo a vida útil do aterro sanitário.

Dentre estes resíduos, é citado àqueles gerados pelas próprias centrais de concreto, conhecidas também como usinas de concreto ou simplesmente concreteiras. O excedente de concreto dosado não utilizados pelos compradores que acaba retornando nos caminhões betoneira é disposto no pátio das próprias centrais para, posteriormente, serem encaminhados à aterros sanitários.

Segundo Resolução nº 19 do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP,2019), o manejo sustentável de recursos da mineração é fator de grande relevância para alcançar as metas de desenvolvimento sustentável global. Segundo a respectiva resolução, é necessário promover ações como a conscientização para os setores extratores a respeito dos impactos gerados, promover a capacitação para uma gestão adequada e sustentável relacionados aos recursos naturais e o desenvolvimento de pesquisas com foco em gestão sustentável. A resolução menciona ainda a necessidade de atenção para o agravamento relacionado ao uso de recursos e a extração ilegal, que acelera o esgotamento das fontes naturais de recursos naturais. Além disso, a ciência como pesquisa, o manejo sustentável, o desenvolvimento de outros produtos ou soluções, além da redução dos impactos gerados pela extração, devem ser elaborados e desenvolvidos com a maior brevidade possível segundo a resolução.

A respeito da extração de elementos da natureza para a construção civil, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente de 2022 (UNEP,2022) menciona que a areia, o cascalho e a pedra britada (ou simplesmente brita) são os recursos naturais sólidos mais explorados do mundo. Em números, nos últimos 20 anos, a extração desses materiais triplicou, chegando a extração de 40 a 50 bilhões de metros cúbicos por ano, para as mais diversas finalidades. Segundo Conselho de Construção Verde do Reino Unido – UKGBC (2023a) a mineração a céu aberto gera impactos diretos relacionados ao *habitat* natural das regiões onde será realizada remoção superficial de solo e vegetação. Dessa maneira, o impacto é direto com relação a biodiversidade, como, por exemplo, poluição sonora e retirada de vegetação. Ainda segundo a resolução, a restauração ecológica de minas a céu aberto possuem impacto positivo na tentativa de restauração de ecossistema e biodiversidade local.

A respeito do volume de materiais extraídos, a composição do concreto de cimento, areia, brita, água, aditivos e adições possuem impactos diretos relacionados à extração de recursos naturais. Dentre os materiais, os que ocupam maior volume dentro da mistura de concreto são agregados miúdo (areia) e graúdo (brita). O reuso de uma parcela de brita diminui a extração de agregados naturais por parte das pedreiras. Segundo o boletim de mineração do Governo do Estado do Pará (Estado, 2023), o Brasil “produz” entre rochas britadas e cascalhos 262,2 milhões de toneladas. A redução de 1% desse montante já significariam 2,6 milhões de toneladas que não precisariam ser extraídas, que não gerariam impactos ambientais e que reduziriam a destruição de recursos naturais, que pela escala de tempo, podem ser considerados não renováveis.

Outro aspecto ambientalmente inadequado relacionado aos componentes da construção civil está na emissão de gás carbônico por parte de seus componentes. Segundo UKGBC (2023b), o cimento é responsável por 8% das emissões globais de carbono. Isso se deve ao fato de durante a fabricação do clínquer, o calcário (CaCO_3) é aquecido a altas temperaturas para se decompor em óxido de cálcio (CaO) e liberar dióxido de carbono (CO_2).

2.2 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO E AS CARACTERÍSTICAS DE SEUS CONSTITUINTES

Sendo um material resistente a esforços de compressão, Allen e Iano (2013) pontuam que a composição do concreto consiste na mistura de Cimento Portland, agregados miúdos, agregados graúdos e água. Além disso, por vezes, é possível adicionar outros materiais que buscam modificar características tanto de estado fresco (trabalhabilidade, por exemplo) quanto em estado endurecido (celeridade na pega do concreto), chamados de aditivos/adições.

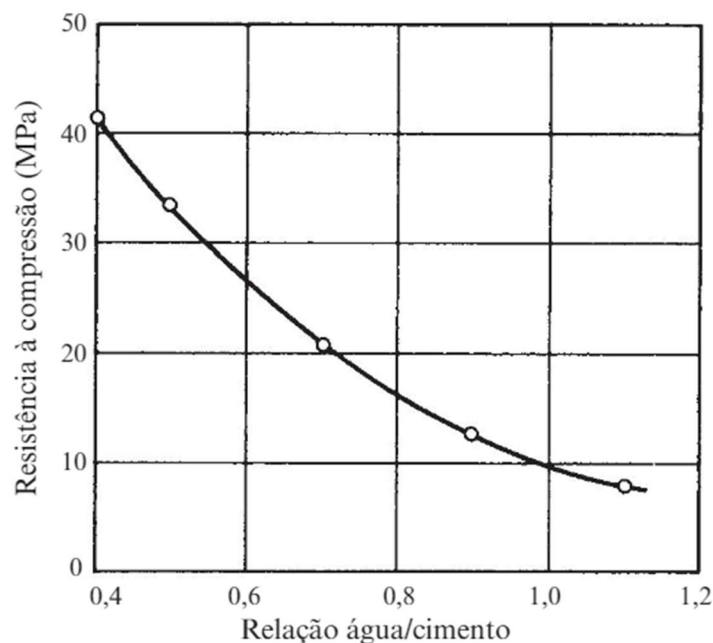
Por definição da NBR 7211 (2022a), os agregados miúdos possuem dimensão mínima de 0,15 à 4,75 milímetros. Já os agregados graúdos possuem dimensões entre 4,75 e 75 milímetros. As areias (de cavas ou rios) são as principais representantes dos agregados miúdos, ao passo que, as pedras britadas (ou simplesmente britas) representam os agregados graúdos.

Ainda segundo Allen e Iano (2013), o concreto passa por um processo de hidratação, no qual o cimento juntamente com a água formam cristais que

envolvem os agregados, formando um conjunto monolítico. Esse processo ocorre desde as primeiras horas de hidratação do cimento e se perpetua ao longo do tempo enquanto houver cimento anidro para reagir. Neste caso, considera-se que aos 28 dias, a hidratação do cimento atinge níveis da ordem de 75%, sendo esta definida como a principal idade de avaliação da resistência mecânica do concreto, visto que, a partir desta idade, a taxa de evolução de resistência torna-se menor.

Além da composição do concreto, Neville (2016) ressalta que outro fator a ser analisado é a quantidade de água presente na mistura, em comparação com a quantidade de cimento, ou seja, a relação água/cimento (a/c), uma vez que quanto maior esta relação mais poroso será o concreto e, consequentemente, menos resistente. Essa relação está vinculada a quantidade de vazios capilares presentes no material. Isso é possível notar na Figura 3, a qual demonstra para uma idade de 7 dias, a influência direta do fator a/c na resistência à compressão.

Figura 3. Relação resistência a compressão e fator a/c



Fonte: Neville (2016)

Sobre a influência dos agregados na resistência mecânica do concreto, pode-se citar que a granulometria, a morfologia e rugosidade afetam não somente esta propriedade mas também a durabilidade do concreto. Na questão

de durabilidade, Neville e Brooks (2013) a baixa permeabilidade gera resultado positivo na durabilidade. O fato é alcançado com um fator água/cimento mais baixo. Assim, granulometria graduada ou de partículas maiores pode gerar necessidade de razão água/cimento menor, visto que a superfície específica é menor. Porém, há o fato de que partículas menores que 150 μm .

Segundo Helene e Andrade (2010) a redução da porosidade e melhoria de características mecânicas da pasta de cimento está diretamente vinculado ao fato da diminuição da relação água/cimento. Porém, em concretos estruturais que buscam resistências mais elevadas, a característica de resistência, forma e textura do agregado tornam-se mais influentes, sendo necessário vincular não somente ao fator água/cimento.

Ainda segundo Helene e Andrade (2010) quando é mantido fixo o abatimento, quanto menor a relação água/cimento maior o desempenho mecânico, a durabilidade e o consumo de cimento. Para manter uma trabalhabilidade que possa ser bombeada, é necessário o uso de aditivos superplastificantes que permitem uma relação baixa a/c sem perder sua capacidade de moldar-se.

Neville e Brooks (2013) define esfericidade do agregado como sendo a avaliação entre área superficial da partícula e volume (superfície específica). Essa relação tem influencia direta na trabalhabilidade, visto que quanto maior a relação, diminuem a trabalhabilidade. Além disso, o formato, de particular lamelares e alongadas influenciam negativamente a durabilidade, visto que tendem a se acomodar paralelo à um plano orientado e consequentemente acúmulo de água e vazios abaixo desse plano.

2.3 CONCRETO ESTRUTURAL – DEFINIÇÕES E CARACTERÍSTICAS EM ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

A NBR 6118 (ABNT, 2023) define concreto estrutural como àquele material que possui função estrutural, apresentando resistência característica à compressão (f_{ck}) mínima aos 28 dias igual ou superior à 20 MPa sendo este aplicado à elementos como vigas, pilares e lajes com reforço de armaduras. Por consequência o concreto não estrutural são àqueles não possuem função estrutural, como por exemplo, concretagem em calçadas, meio-fio, etc.

Segundo Neville (2016), as análises do concreto podem ser conduzidas quando o material está em estado fresco ou endurecido. O estado fresco compreende o concreto desde sua mistura (quando os materiais secos entram em contato com a água), até o momento em que ocorre o início de pega (instante nas quais o material perde sua trabalhabilidade), ao passo que o estado endurecido corresponde ao estado do concreto após o final da pega, momento nas quais o material começa a adquirir resistência mecânica. As propriedades do concreto fresco visam analisar parâmetros relacionados com sua trabalhabilidade, enquanto, em estado endurecido, análises referentes à resistência mecânica e durabilidade podem ser conduzidas mediante testes como resistência à compressão, resistência à tração, absorção de água por capilaridade (Neville e Brooks 2013, Neville 2016), ataques por carbonatação, resistividade elétrica e potencial de corrosão (Cunha e Ribeiro 2014).

A avaliação das características do concreto partem de análise advindas de ensaios laboratoriais (tanto no estado fresco quanto endurecido) que buscam realizar comparativos e classificações do material que está sendo analisado. Dessa maneira, deve-se partir do pressuposto, para a construção civil, das especificações máximas e mínimas relacionados a algumas informações, a título de comparação, aplicabilidade e viabilidade técnica do tema. Segundo Helene e Andrade (2010), as perspectivas futuras estão baseadas nas pesquisas e experimentações realizadas em centros de ciência e tecnologia, nos quais são gerados materiais de consulta e suporte com relação ao tema. Além disso, a pesquisa, e a permanente transferência de tecnologia demonstram que o constante crescimento relacionado ao concreto.

Como as estruturas de concreto são construídas em diferentes locais (regiões, rurais, urbanas, marinhas, industriais e etc), estas estruturas estão sujeitas à diferentes níveis de agressividade imposto pelo ambiente. Por este motivo, o primeiro passo para buscar a produção de um concreto é especificar a qual nível de agressividade a estrutura está sujeita. Para tanto, as classes de agressividade, de acordo com a NBR 6118 (2023), dependem da localização em que o concreto será aplicado. O Quadro 1 classifica a agressividade do ambiente em quatro classes, sendo I a mais fraca e a IV a mais severa. De modo geral, para regiões urbanas em condições que não sejam marinha, industrial ou com

respingos de maré, são classificadas em condição II, com agressividade moderada.

Quadro 1. Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana ^{a,b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a Industrial ^{a,b}	Grande
IV	Muito forte	Industrial ^{a,c} Respingos de Maré	Elevado

Notas:

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galbanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 (2023)

Com base na classe de agressividade, é possível verificar o fator a/c e consumo de cimento limite para o projeto da estrutura. Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2022b), os fatores a/c máximo e o consumo mínimo de cimento de acordo com tipo de concreto e classe de agressividade são apresentados conforme Tabela 1. Conforme anteriormente pontuado, quanto maior o fator a/c, menor será a resistência mecânica do material decorrente de um aumento da porosidade capilar do concreto (Neville e Brooks, 2013). Assim, a limitação no fator a/c apresentada na Tabela 1 tem sua justificativa não somente em termos da resistência mecânica, mas também na durabilidade do concreto, pois o ingresso de agentes agressivos ao interior do concreto é menor (Mehta e Monteiro, 2008).

Tabela 1. Correspondência entre classe de agressividade, consumo de cimento e o fator a/c.

Concreto	Tipo	Classe de Agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
em massa	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
(ABNT NBR 8953)	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Consumo de cimento					
Portland por metro	CA e				
cúbico de concreto	CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360
kg/m ³					

Legenda:

CA - Componentes e elementos de concreto armado

CP - Componentes e elementos estruturais de concreto protendido

Fonte: NBR 12655 (ABNT, 2022b)

Além da classe de agressividade e da limitação no fator a/c e consumo de cimento, outra premissa que deve ser observada trata das condições que o concreto recém misturado (estado fresco) deve apresentar devido à necessidade de trabalhar com o mesmo para a execução da concretagem. Ao tratar de condições de trabalhabilidade, é necessário conhecer as condições de aplicação do concreto afim de definir o abatimento do concreto, ou seja, a deformação do concreto por meio da ação de seu peso próprio.

Neste caso, o ensaio de abatimento do tronco de cone (conhecido também como slump test) é realizado conforme NBR 8953 (ABNT, 2015), sendo este o ensaio mais comumente utilizado em obras para análise do concreto em estado fresco. O ensaio consiste em analisar dois parâmetros: a consistência e a coesão. Segundo Neville e Brooks (2013), consistência é a facilidade com que o concreto flui enquanto a coesão esta relacionada com a capacidade de não segregação do concreto (separação física de seus constituintes) obtendo um adensamento máximo.

A NBR 8953 (ABNT, 2015) apresenta diretrizes de quais são as classes de abatimento para cada situação de aplicabilidade, conforme Tabela 2. Outra análise que também é conduzida trata-se da determinação da massa específica do concreto em estado fresco que, segundo Neville e Brooks (2013), é possível

de ser avaliada pesando uma porção de material inserida em um recipiente de volume conhecido. Com a massa específica, é possível realizar a avaliação do volume e consequentemente definir o consumo de cimento, necessário para elaborar o diagrama de consumo.

Tabela 2. Classes de abatimento do concreto segundo suas aplicações

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrífugo
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional de concreto
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado de concreto
S220	≥ 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armadura

Nota 1 De comum acordo entre as partes, podem ser criadas classes especiais de consistência explicitando a respectiva faixa de variação do abatimento.

Nota 2 Os exemplos desta Tabela são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de aplicações.

Fonte: NBR 8953 (ABNT, 2015)

No estado endurecido, a resistência do concreto, juntamente com a durabilidade, é dependente da estrutura física e das proporções volumétricas e características de seus constituintes (Neville, 2016, Neville e Brooks, 2013, Mehta e Monteiro, 2008). A avaliação é feita admitindo a presença de falhas, descontinuidades e porosidade, sendo a última de grande importância e de possível mensuração. Nesse aspecto, o fator a/c também possui influência na característica de resistência do concreto, mais especificamente no que trata da zona de transição na interface do agregado com a matriz cimentícia.

Neste caso, em função da porosidade acessível dos agregados, a água durante a mistura do concreto tende a ocupar estes poros, fazendo com que a quantidade de água na superfície dos agregados seja significativa. Havendo grande quantidade de água nesta região, as reações de hidratação do cimento, acabam se processando primeiro nesta região, havendo significativa formação de cristais de etringita primária. Neste caso, os cristais de etringita não

apresentam grandes contribuições para a resistência do concreto e devido a morfologia destes cristais, a zona de transição acaba apresentando maior porosidade em relação tanto ao agregado quanto à matriz de cimento, motivo pelos quais é a região de fragilidade no concreto (Mehta e Monteiro, 2008).

Os agregados possuem importância na tendência à fissuração e no controle do volume do concreto endurecido, visto que seu volume representa aproximadamente 65% a 70% do concreto total (Helene e Andrade 2010, Neville 2016).

A respeito dos ensaios para analisar a resistência mecânica do concreto, as normas técnicas NBR 5738 e NBR 5739 tratam da moldagem de corpos de prova e das características dos ensaios de compressão uniaxial respectivamente. A NBR 5738 (2016) ressalta que a altura deve ser o dobro do diâmetro do corpo de prova cilíndrico utilizado nos ensaios de compressão, sendo comumente utilizados corpos de prova com diâmetro de 10 cm para concretos que utilizam britas com dimensão máxima de até 25mm. Os corpos de prova devem ser preenchidos e adensados. Neste caso o número de camadas e golpes de adensamento varia segundo o diâmetro do corpo de prova utilizado, entretanto, para corpos de prova com 10 cm de diâmetro, o procedimento requer duas camadas adensadas uniformemente com 12 golpes cada..

Já para os ensaios de compressão uniaxial, a NBR 5739 (2018) trata da aplicação de uma carga igual à $0,45 \pm 0,15$ MPa/s em prensa de compressão nos corpos de prova após 28 dias de cura sob condições de temperatura $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa mínima de 95% e com suas extremidades previamente retificadas. A carga é aplicada até a ruptura dos respectivos corpos de prova sendo possível determinar sua resistência por meio da relação entre a força máxima aplicada e a área do topo do corpo de prova.

O ensaio de compressão uniaxial descrito anteriormente é um ensaio destrutivo tendo em vista a ruptura dos corpos de prova, todavia, existem ensaios não destrutivos como o ensaio de ultrassom que permitem uma correlação com a estimativa de tensões do concreto por meio da velocidade de pulso ultrassônico (SCHIAVON, 2015). O ensaio de ultrassom é descrito pela NBR 8802 (ABNT, 2019). Segundo a NBR 8802 (ABNT, 2019), é utilizado um equipamento que gera uma onda ultrassônica, com resolução de pelo menos 0,1 micro segundos, com um equipamento transdutor-emissor que transforma o pulso elétrico em

onda da faixa de 20 kHz (quilo-Hertz) a 150 kHz, além de transdutor-receptor. Os corpos de prova necessitam superfícies lisas, planas e limpas. O procedimento de ensaio inicia com a calibração do aparelho com barra de referência. Após, então, os transdutores são posicionados nas faces dos corpos de prova, com transmissão direta realizada em faces opostas (base e topo do corpo de prova). Então é realizada a leitura do tempo de propagação. Com a distância, é possível calcular a velocidade da onda, por meio da equação 1:

$$V = \frac{L}{t} \quad 1$$

V: velocidade de propagação (m/s)

L: distância entre eixos em metros

t: tempo de emissão de onda até recepção em segundos

De acordo com a velocidade de propagação, é possível inferir a respeito da qualidade do concreto e também relacionar sua resistência à compressão a ser analisada em ensaio destrutivo com a velocidade do pulso no respectivo corpo de prova. É possível avaliar a qualidade do concreto conforme Tabela 3.

Tabela 3. Qualidade do concreto por meio de ensaio de ultrassom

Velocidade longitudinal da onda em (km/s)	Qualidade do concreto
v < 2	Muito fraca
2 < v < 3	Fraca
3 < v < 3,5	Média
3,5 < v < 4	Boa
4 < v < 4,5	Muito boa
v > 4,5	Excelente

Fonte: Ribeiro e Cunha (2014) apud EN12504-4 (2000).

Outro ensaio não destrutivo em concreto endurecido versa sobre a durabilidade das estruturas de concreto, que remete à forma como o concreto é capaz de proteger as armaduras que provém resistência à tração às estruturas. Neste caso, os processos relacionados à corrosão das armaduras são de grande interesse na avaliação da durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado, haja visto que esta é a principal manifestação patológica verificada

nestas estruturas (Pape and Melchers 2012, Jin and Zhang 2015, Balestra et al., 2016).

Assim, o ensaio de carbonatação acelerada do concreto visa verificar por meio de um ensaio colorimétrico se o concreto é capaz de prover proteção às armaduras frente ao CO₂ (Ribeiro e Cunha, 2014). É avaliada em uma amostra de concreto de cada grupo com a solução de fenolftaleína conforme recomendado pela União Internacional de Laboratórios e Peritos em Construção Materiais, Sistemas e Estruturas – RILEM (RILEM, 1988). A fim de gerar referência, uma amostra é rompida aos 28 dias, após cura saturada e então de imediato é pulverizada a solução de fenolftaleína. Caso haja coloração rosa forte, significa que o pH é superior a 12. Em caso contrário, o pH está abaixo de 9, significando carbonatação. A profundidade sem coloração é medida mediante régua metálica (Balestra et al. 2023).

Para a avaliação da carbonatação acelerada, segundo Comitê Europeu de Concreto (COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, 1992), a penetração máxima de CO₂ ocorre com saturação próxima a 50%. Então, as amostras do concreto passam por processo de secagem com controle de massa a fim de chegar no grau de saturação desejado. Segundo Balestra et al. (2023), usa-se uma câmara de carbonatação, retirando o ar através de bomba de vácuo por 20 minutos, para posteriormente injetar CO₂ sob pressão constante de 20 Psi por 48 horas. Após as 48 horas as amostras são compidas diametralmente e imediatamente avaliadas a coloração através da solução de fenolftaleína. A espessura de carbonatação significa que as armaduras ali presentes podem estar sofrendo com corrosão em caso de concreto armado.

2.4 A PRODUÇÃO DE CONCRETO EM CENTRAIS

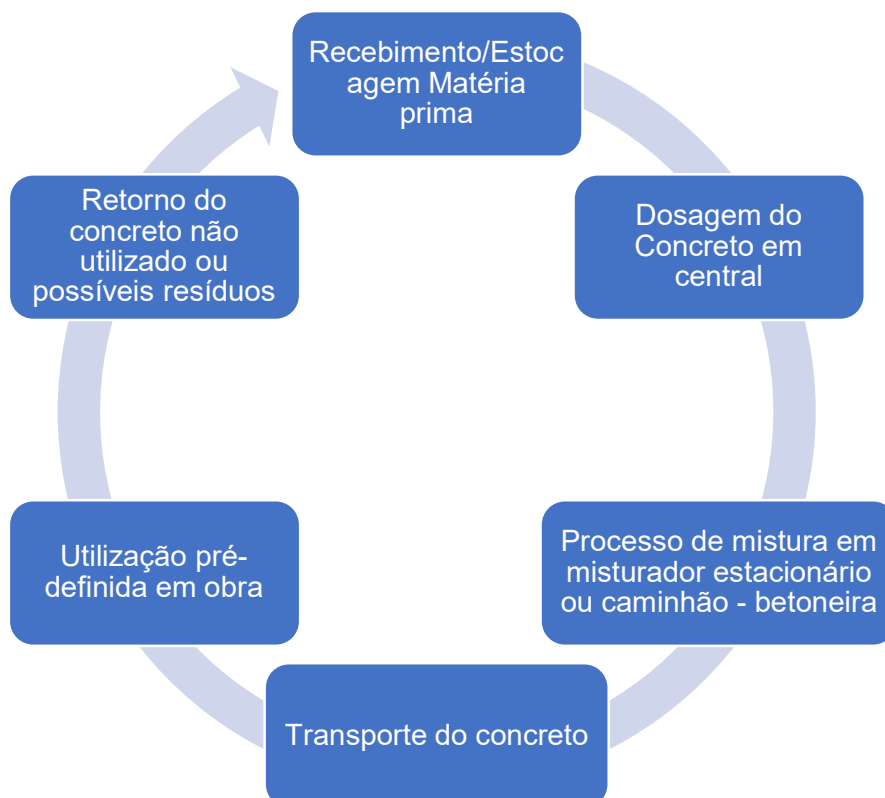
O concreto estrutural como conceituado anteriormente, possui características tanto em estado fresco, quanto endurecido que devem ser alcançadas a fim de garantir seu desempenho ao longo da vida útil da estrutura. Nesse aspecto, há a possibilidade de realizar o concreto usinado em central. Segundo NBR 7212 (ABNT, 2021) uma central de concreto é o local onde ocorre as operações de recebimento, estocagem e dosagem dos constituintes do concreto. Já o concreto dosado em central é o material dosado com

equipamentos específicos, em canteiro de obra ou em indústria, o qual é misturado por misturador estacionário ou caminhão-betoneira, que passa por consequente transporte (em agitação ou não) buscando realizar entrega antes do início da pega do concreto.

Segundo a Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem (ABESC, 2007) algumas das vantagens do concreto dosado em central são: eliminação de perdas de matéria prima; racionalização do número de funcionários e consequentes encargos trabalhistas; garantia de qualidade devido ao processo controlado; melhor aproveitamento do espaço físico disponível; redução de custo total; maior produtividade e agilidade da equipe de trabalho.

Na Figura 4 está esquematizado o ciclo do concreto dosado em central e a Figura 5 possui exemplo de retorno de material sobressalente não utilizado em obra.

Figura 4. Esquema de concreto dosado em central



Fonte: adaptado de NBR 7212 (ABNT, 2021)

Figura 5. Disposição deste excedente de concreto na central



Fonte: O autor (2024).

Na primeira etapa da Figura 4, as matérias primas utilizadas são basicamente o cimento, areia, brita, água e aditivos. O primeiro, é muito poluente em sua formulação, visto que segundo o Quarto relatório de atualização bienal do Brasil (BRASIL, 2020), no ano de 2016, a produção de cimento gerou 22,4 milhões de toneladas de gás carbônico emitidos na atmosfera. Os outros elementos, por serem recursos naturais possuem capacidade de geração inferior à exploração, gerando um possível esgotamento.

As etapas de fabricação e uso do concreto da Figura 4, são representadas pela pesagem dos materiais, transporte e descarregamento do concreto em obra, conforme discutido anteriormente. Todavia, deve-se pontuar que as melhorias ambientais estão vinculadas às melhorias de processos e redução de desperdícios dos materiais misturados. Na próxima parte do ciclo, existem precauções a serem tomadas com relação ao resíduo de concreto que retorna à central. Segundo Nagalli (2014) dois impactos diretos nas obras são desperdícios e consumo de novos recursos naturais. Relacionado aos resíduos restantes no caminhão betoneira, é necessário realizar uma prévia avaliação de seu volume.

A NBR 7212 (ABNT, 2021) permite o que sejam reutilizados os agregados que foram recuperados mediante lavagem desde que sejam extraídos todos os resíduos de aglomerantes. Além disso, é permitido o reuso dos resíduos de

lavagem do balão por meio de controladores de hidratação para posterior. Como também há a possibilidade de reuso de concreto retornado em estado fresco em uma nova entrega desde que algumas especificações sejam cumpridas. Por fim, se não for reutilizado em nenhum dos casos anteriores, haverá um resíduo de concreto ou em endurecido (concreto puro, como Figura 4) ou resíduos de lavagem.

2.5 DEFINIÇÕES, LEGISLAÇÃO E NORMATIZAÇÃO RELACIONADA AOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Por definição, antes da classificação de resíduos sólidos de construção civil e os demais resíduos, é necessário distinguir o termo lixo do termo resíduo. Segundo Mancini, Ferraz e Bizzo (2012) o primeiro termo trata de um material cuja serventia é nula, devendo ser apenas colocado ou despejado em local definido. Já o segundo termo, trata de um material que é resultado de um processo, sendo considerado um subproduto e podendo ainda ter alguma serventia, ou seja, é possível de ser reciclado ou reutilizado.

De modo genérico, a Constituição Federal (BRASIL, 1988, art. 225º), menciona o direito do cidadão de possuir um meio ambiente equilibrado, de forma saudável ao desenvolvimento e a coletividade. No documento, há exigências de estudos de impactos ambientais, necessidade de proteção a fauna e flora, e questões exploratórias de recursos minerais definido por obrigatoriedade da seguinte forma: “Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei”.

A instituição de uma Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei 12305 de 2010) teve impacto direto em todos os setores da indústria, especialmente nas que possuíam menor controle na geração de resíduos que acabavam entendendo seus resíduos como lixo. Ao ser implementada, a lei 12305 (BRASIL, 2010) trouxe informações como objetivos, princípios, formas de implementação, ações, entre outras vinculadas a gestão e gerenciamento adequado dos resíduos. Os planos possuem informações em escala nacional, estadual e municipal, que além de fomentar o assunto, legisla, de forma a trazer obrigatoriedade em itens que antes não possuíam legislação específica.

De acordo com Alsheyab (2022), os resíduos devem ser tratados na gestão adequada na ordem de possibilidades: Redução da geração, Reutilização, Reciclagem, Recuperação e se não for possível de outra forma, descarte. Para a gestão dos resíduos da construção civil, a redução por meio de planejamentos e controles prévios são de grande oportunidade. Porém, o trabalho fornece a possibilidade de que, caso a otimização dos recursos reduzindo sua geração de resíduos ainda não seja perfeita, há a possibilidade de passar o concreto por método de adequação para sua reutilização, patamar que se encontra na segunda escala da hierarquia fornecida pelo autor, significando uma possibilidade de benefício razoável, visto a não necessidade de descarte nem de modificação do material a não ser modificação física de tamanho.

Segundo Forum Institucional Econômico Mundial (World Economic Forum, 2022), parte da agenda de Reuniões de Impacto de Desenvolvimento Sustentável, menciona que na indústria da construção civil o carbono está incorporado em extração e transporte de matéria prima, além dos processos de fabricação. Ainda sobre o Fórum, há três aspectos que são mencionados: a colaboração entre âmbitos de projeto e execução; ausência na definição de padrões de emissões líquidas zero na indústria; e por fim as ações governamentais. Nesses aspectos, o trabalho expande o conhecimento no tema, sendo mais um aspecto que pode gerar parâmetros, avaliações e desenvolvimentos que busquem uma redução na quantidade de CO₂ por meio da incorporação e reutilização de agregados reciclados de concreto.

Segundo a resolução nº 307 do CONAMA (CONAMA, 2002), mesmo que o objeto gerador de resíduos não necessite de licenciamento ambiental perante legislação vigente, é necessário que seja apresentado um Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil de acordo com a vigência de Plano Diretor Municipal. Nos planos de gerenciamento deverão constar informações de caracterização, triagem, acondicionamento, transporte e destinação. Os resíduos de classe A, após triagem, devem ser reutilizados/reciclados ou destinados de modo adequado para aterros de classe A.

Exemplificando a exigência mencionada acima, por exemplo, a cidade de Cascavel – PR possui, vinculado ao decreto municipal nº 9775 (CASCAVEL,

2011), a instituição do Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil – PGRCC. Este plano possui grande semelhança com a resolução vigente, trazendo algumas peculiaridades locais, incluindo a diferenciação entre pequeno e grande gerador. O primeiro, segundo o decreto, é o que gera menos de um metro cúbico de resíduos de construção civil, por obra. Já o segundo, consequentemente, é o caso acima de um metro cúbico por obra. De modo geral, usinas de concreto, apesar de não serem obras de construção civil propriamente dita, por gerarem resíduos de concreto no decorrer de toda a sua operação, poderia ser classificados, nesse caso, como grandes geradores, visto que geram mais que o valor estipulado

Dentre o conjunto de normativas brasileiras que estão enquadrados os resíduos, triagem, áreas de reciclagem e agregados, as principais normas vinculadas a esta questão são:

- NBR 15112:2004 – Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação (ABNT, 2004a).
- NBR 15113:2004 - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação (ABNT, 2004b).
- NBR 15114:2004 – Resíduos sólidos da construção civil – áreas de reciclagem – diretrizes para projeto, implantação e operação (ABNT, 2004c).
- NBR 15116:2021 – Agregados reciclados para uso em argamassas de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaio (ABNT, 2021).

Segundo a NBR 15116 (ABNT,2021), a classificação dos agregados reciclados é feita, além da diferenciação entre classes de acordo com a resolução CONAMA, da seguinte forma:

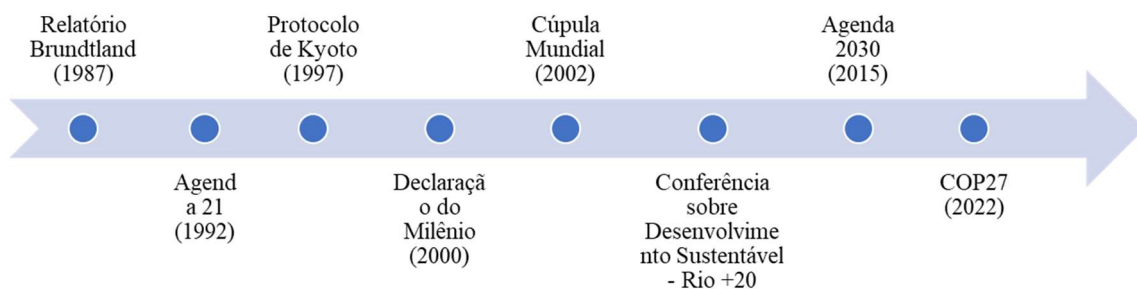
- Agregado reciclado cimentício (ARCI) – maioria de origem cimentícia com presença reduzida de cerâmica vermelha.
- Agregado reciclado de concreto (ARCO) – maioria de origem de resíduos de concreto.
- Agregado reciclado misto (ARM) - mistura de materiais cimentícios e cerâmicos.

Segundo a NBR 15116 (ABNT, 2021) para o uso de agregados reciclados em concretos com função estrutural, recomenda-se o uso de agregados advindos de concreto (ARCO) e a substituição fica limitada a 20% da massa de agregados totais e concretos de classes de agressividade I e II, da NBR 6118 (ABNT, 2023) (Tabela 1). Todavia, esta norma não faz nenhuma distinção se o ARCO é proveniente de uma obra ou central dosadora e qual o controle de qualidade da produção deste concreto. Desta maneira, acredita-se que por se tratar de um resíduo obtido a partir de uma produção controlada, o limite de 20% possa ser muito conservador para este caso, o que motiva esta pesquisa.

2.6 O CONCEITO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A CRONOLOGIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NAS CONFERÊNCIAS DAS NAÇÕES UNIDAS

Por definição, desenvolvimento sustentável, segundo Relatório Brundtland, também denominado Nosso Futuro Comum (“Our Common Future”) (ONU, 1987, p.16) é: “Satisfazer as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas necessidades”. Nesse aspecto, os eventos propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) buscam debater e desenvolver o pensamento em diversas áreas de uma sociedade, incluindo a construção civil. Dessa maneira, em ordem cronológica, segundo Rauber, Balestra e Sebastien (2023a), a Figura 6 mostra a evolução desses eventos. Na sequência, uma breve descrição de fatos principais pertinentes à indústria da construção civil é apresentado.

Figura 6. Esquema cronológico eventos internacionais sustentabilidade



Fonte: Rauber, Balestra e Sebastien (2023a)

Segundo Rauber, Balestra e Sebastien (2023a) as conferências possuem caráter generalistas porém de possibilidade de enquadramento da construção civil em diversos aspectos.

De modo simplificado, o documento intitulado Nosso Futuro Comum (Our Future Common) (ONU, 1987) possuiu importancia relacionada à criação de um conceito de desenvolvimento sustentável. Posteriormente, a Agenda 21 (CNUMAD,1992) traz aspectos relacionados aos padrões de produção e consumo. A construção civil se enquadra em função do excesso de resíduos gerados e consequente necessidade mudança de modelo de construção, além da questão de gestão de resíduos sólidos e desenvolvimento de “tecnologias verdes”.

O protocolo de Kyoto trouxe a tona a discussão sobre a emissão de gases do efeito estufa como foco de debate e exigência de mudanças (ONU, 1997). Na construção o foco fica no fornecimento de matérias primas como o cimento, a redução da emissão de gases relacionados ao efeito estufa torna-se um dos destaques da conferência. Subsequente, a declaração do Milênio (ONU, 2000) e a Cúpula Mundial sobre o Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2002) possuíram um caráter mais voltado as questões de dignidade humana, focando em equidade, pobreza. Então na Rio + 20 (ONU, 2012) e Agenda 2030 (ONU, 2015) foram debatidos os maiores impactos diretos para esse setor da industria. O primeiro tratou da racionalização na utilização de recursos naturais e também dos resíduos gerados nos processos. Dessa forma, o assunto produção, consumo e gestão de resíduos foi tratado de forma mais embasada e com intuito de cobrança por mudanças. O segundo documento confirmou a necessidade de otimização dos recursos, porém trouxe a pauta em forma mais exequível e com ideias relacionadas ao coletivo. Nesta última conferência, foram elaborados 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), com metas a serem alcançadas em cada aspecto.

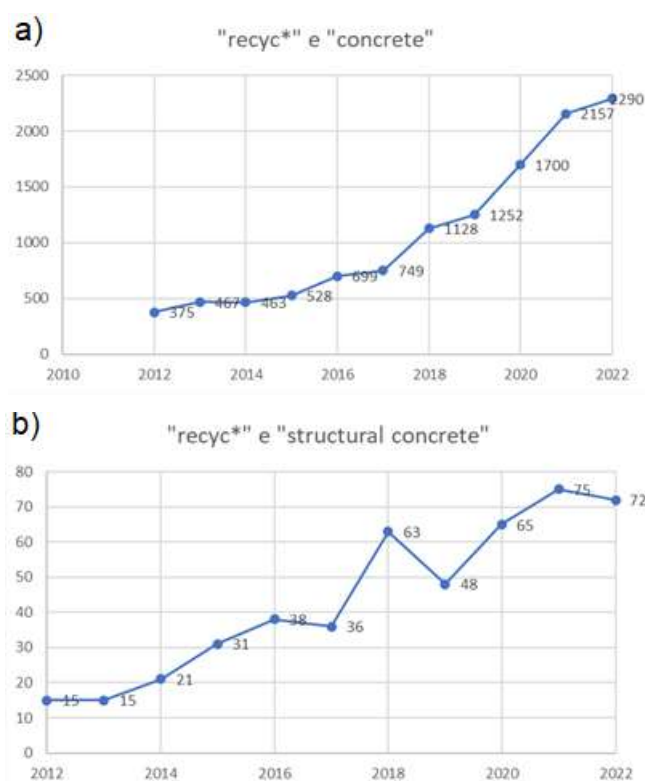
Para a construção civil, dentre os objetivos, as que mais possuem vínculo são: a ODS de número 6 que trata da disponibilidade e gestão sustentável da água; a ODS de número 9 que possui caráter de modernização de infraestruturas com intuito mais sustentável, além das evoluções tecnologicas; e a ODS de número 12, que trata de padrões de produção e consumo sustentáveis.

Por fim, a COP27 (ONU,2023) gerou a criação de um fundo de “perdas e danos” impactando especialmente em países mais vulneráveis e impactados no aspecto ambiental.

2.7 ESTADO DA ARTE SOBRE O USO DE RESÍDUOS NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS.

Com relação aos concretos com utilização de materiais recicláveis, as pesquisas vêm sendo desenvolvidas acompanhando o conceito de desenvolvimento sustentável e as necessidades ambientais. Segundo Rauber, Balestra e Baumgartner (2023b), por meio de pesquisa em bases da literatura como a plataforma Web of Science, é possível visualizar a crescente em pesquisas científicas relacionadas ao tema. A pesquisa realizada com os termos “recyc*” e “concrete” retornou 14313 resultados ao passo que a pesquisa “recyc*” e “structural concrete” retornou 553 resultados. A Figura 7a e 7b apresentam o crescimento das pesquisas nos últimos 10 anos.

Figura 7. Levantamento quantitativo de pesquisa Web of Science. (a) Dados considerando os termos “recyc*” e “concrete”. (b) “Dados considerando os termos “recyc*” e “structural concrete”.



Fonte: Rauber, Balestra e Baumgartner (2023)

Morales et al. (2011), realizou a caracterização de agregados reciclados com composição diversa, sendo retirados materiais metálicos, plásticos, papel, vidro e gesso. Estes agregados foram obtidos a partir da coleta de amostras de uma usina de reciclagem. Nessa usina, há apenas a britagem por impacto e separação por peneiramento, sendo produzidos agregados de 0 a 6 mm, 6 a 10 mm e 10 a 50 mm. O método de retirada dos materiais, diferentes do metal, foi realizado a mão, o que não isentava as amostras de impurezas. A tentativa foi de enquadrar o material reciclado ao código espanhol de concretos estruturais, avaliando características como granulometria, teor de finos, índice de descamação, densidade, absorção, presença de cloretos, sulfatos solúveis em água, presença de enxofre e matéria orgânica. A conclusão dos autores foi de que os agregados reciclados não atenderam à vários aspectos de conformidade descritos no código espanhol. Apenas densidade e absorção de água apresentaram conformidade. O módulo de finura ficou semelhante ao de uma argila e o pior resultado esteve nas quantidades elevadas de sulfatos e cloretos, podendo o concreto estar suscetível a ataques químicos, gerando consequências de deterioração da armadura e inviabilizando sua aplicação.

Salgado e Silva (2022) realizaram um levantamento bibliográfico relacionado à utilização de agregados reciclados em concretos estruturais. No estudo foi pesquisado também as normatizações internacionais para uso de agregados reciclados. Segundo esta revisão, os três países mencionados na Tabela 4 permitem o uso de agregados reciclados em concretos estruturais, com suas limitações de proporções de substituições. Nos três países os autores citam que as normas prescrevem a necessidade de uma composição com ao menos 90% de agregados oriundos de concreto para a execução de novos concretos. Além disso, os autores mencionam a exigência das normatizações internacionais de avaliação de outras componentes além do percentual de concreto no agregado reciclado, como por exemplo, composição, densidade seca, absorção de água, percentual de contaminantes.

Tabela 4. Exemplos regulamentação e características concretos com agregado reciclado

País	Padrão/ regulamentação	Especificação do concreto	% de agregado reciclado	Característica do agregado (%) concreto
Brasil	NBR 15116	Concreto Estrutural	20%	100
Portugal	LNEC E471	C35/C45	25%	> 90
Reino Unido	BS 8500-2	C20/C25 e C40/C45	20%	> 95

Fonte: adaptado de Salgado e Silva (2022)

Miraldo et al. (2021), realizaram avaliação teórica/bibliográfica de diferentes tipos de resíduos para serem incorporados no concreto. Segundo os autores, os RCD possuem possibilidade de adequada substituição de agregados, porém, com cautela em relação à origem do material reciclado, do estado de deterioração e da forma de remoção/demolição escolhida. Segundo os autores, os agregados reciclados de concreto, com composição essencialmente de pasta de cimento, possuem normas e regulações que permitem seu uso com parâmetros limitantes para concretos estruturais.

Além disso, por Miraldo et al. (2021) é mencionada a necessidade de uso de pequenos percentuais de substituição em combinação com superplastificantes ou misturas minerais a fim de diminuir desvantagens como redução na resistência e redução na durabilidade do concreto, por meio da resistência à carbonatação. Também é citada como desvantagem a fração fina dos agregados reciclados de concreto, devendo receber o tratamento adequado para efetivar sua substituição com menores impactos negativos ao material.

Plaza et al. (2021) conduziram um estudo com o objetivo de avaliar a substituição de diferentes percentuais de agregados graúdos (até 100%), juntamente com alguns traços havendo inserção de agregados finos reciclados de concreto. A Tabela 5 apresenta algumas das diferentes misturas utilizadas pelos autores, mostrando apenas as que possuíram substituição apenas de agregados graúdos. Foram produzidos concretos com resistência característica à compressão de 30MPa, tamanho máximo de partícula de 20mm e fator a/c de 0.45. Nesse caso a água disponível para todas as misturas foi de 180 litros

disponíveis para a mistura, considerando que o agregado estava seco e corrigindo a absorção para 70%. O volume de água utilizado foi superior aos 180 litros devido ao fato do agregado reciclado necessitar de água de molhagem superior ao agregado convencional.

Tabela 5. Características concretos com agregado reciclado

Componente	Mistura				
	HP	HP - 25	HP - 50	HP - 75	HP-100
CS-F	732,36	724,65	716,94	711,16	701,52
RCF/RMF	0	0	0	0	0
CS-M	382,96	284,20	187,45	92,97	0
CS-C	766,69	568,96	375,27	186,12	0
RCG	0	92,01	182,06	270,88	356,29
RCC	0	186,72	369,46	549,72	723,03
Cimento	400	400	400	400	400
Água	193,03	197,37	203,86	209,18	214,20

Legenda: HP: concreto referência; HR-X: concretos com brita fina e uma certa porcentagem de agregado graúdo reciclado (X).CS-F: pedra finamente triturada; RCF: finos de concreto reciclado; RMF: Finos mistos reciclados; CS-M: pedra medianamente triturada; CS-C: concreto grosseiramente triturado; RCG: cascalho de concreto reciclado; RCC: concreto reciclado triturado

Fonte: Adaptado de Plaza et al (2021)

Com relação às misturas apresentadas, o maior ganho foi na mistura com 25% de agregado graúdo, possuiu ganho de aproximadamente 2% de resistência aos 7 dias, e a maior redução foi aos 28 dias no concreto com 75% de reciclados, com aproximadamente 7% de perda de resistência à compressão.

Segundo Stefaniuk et al (2023), avaliaram a possibilidade de adicionar um material durante a pré-cura do concreto. Foi adicionado bicarbonato de sódio gerando modificações químicas no processo de cura do concreto. Isso gerou leve melhora em propriedades mecânicas, sem alteração significativa em dureza. Os autores mencionam que a introdução de carbonatação em estágio inicial de pré-cura possui duas vantagens concomitantes. Primeiro uma possibilidade de sumidouro para certas quantidades de carbono. Segundo como uma forma de mitigar carbonatações tardias, possibilitando que ocorram previamente, momento em que o concreto pode aliviar tensões sem que haja fissuração ou rupturas.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 DESCRIÇÃO METODOLÓGICA

Esta pesquisa avaliou os efeitos da substituição de agregados graúdos naturais por agregados reciclados de concreto (ARCO) de centrais para a produção de concretos estruturais. Para tanto, ensaios físicos, mecânicos e de durabilidade fazem parte do escopo deste trabalho. As quantidades de substituição são 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 50%, 75% e 100%. Estas substituições propostas estão de acordo com Plaza et. al (2021), corroborando com os países mencionados por Salgado e Silva (2022). Alguns percentuais dentro dos parâmetros permitidos pela NBR 15116 (2021) (até 20%) e os demais buscando resultados satisfatórios para uso de concreto estrutural, visto que Plaza et al (2021) mostra uma perda de resistência à compressão leve em percentuais acima dos referidos pela NBR.

O método de dosagem do concreto desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas junto da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Método IPT/USP) foi utilizado para realizar as dosagens. A justificativa pela escolha deste método é decorrente de ser um método racional e experimental cujo resultado relaciona características do concreto (fator a/c , agregados totais e consumo de cimento) com a resistência do concreto através de um ábaco (Helene e Tutikian, 2011). O resultado é fornecido mediante um diagrama único, que possui três gráficos interrelacionados. O primeiro é uma relação entre o fator a/c e a resistência do concreto, o segundo é a relação entre o fator a/c e a massa total de agregados por massa de cimento, fixando um abatimento do concreto no estado fresco e por fim, a relação entre consumo de cimento por metro cúbico de concreto e a relação de massa de agregados por massa de cimento.

Para a obtenção de dados, é necessário realizar o planejamento experimental. Assim, em primeiro lugar, os materiais utilizados foram:

- Cimento Portland CP II F 40
- Areia média fornecida pelo Centro Universitário de Cascavel
- Brita Basáltica nº 1 com Dimensão Máxima Característica (DMC) igual a 19mm

- Brita com Dimensão Máxima Característica (DMC) igual a 19 mm oriunda do resíduo de concreto fornecido por central dosadora de concreto.
- Aditivos Plastificante a base de naftaleno sulfonado e superplastificante a base de Eter Policarboxilato.

De posse dos materiais foram realizados ensaios com os materiais granulares separadamente. Com os agregados miúdos, grãos naturais e grãos reciclados de concreto, foram realizados os seguintes ensaios: granulometria, material pulverulento massa específica e, com o agregado grão natural e o reciclado foi realizado também o índice de forma. Estes ensaios foram realizados para fornecer dados para a dosagem dos concretos através do método do IPT/USP.

Para cada um dos percentuais de substituição apresentados na Quadro 2, 3 dosagens distintas são propostas conforme requer o método de dosagem do IPT/USP, nomeadas como traço rico, intermediário e pobre. Cada um dos traços possui proporção de massa total de agregados (m) distintas, ou seja, para cada unidade de massa cimento no traço rico, haverá 4 unidades de agregados (relação 1:4). No segundo e no terceiro traços, as relações são 1:5 e 1:6 respectivamente. O Quadro 2 exemplifica a nomenclatura que será utilizada nos traços de concreto de referência e para a dosagem de 5% de substituição, no qual se observa a letra “S” indicando a palavra substituição, seguida das letras “4”, “5” ou “6” indicando o tipo de traço (Rico, intermediário ou pobre, respectivamente), seguida do percentual de substituição. Esta métrica será também utilizada para as demais dosagens segundo os valores de substituição propostos anteriormente.

Quadro 2. Exemplo de nomenclaturas por dosagem e percentual de substituição

	Traço	Nomenclatura
Referência	Rico	R4
	Intermediário	R5
	Pobre	R6
Substituição 5%	Rico	S54
	Intermediário	S55
	Pobre	S56

Fonte: O autor (2024)

Para definir a proporção entre agregados miúdos e agregados graúdos, será adotada uma taxa de argamassa (α) de 60%. Tutikian (2004), utilizando agregados naturais dosou um concreto com teor de argamassa em 53%, porém, para o estudo será usado 60% visto que houve maior presença de finos advindos dos agregados reciclados. Com a taxa de argamassa é possível calcular a proporção de areia por meio da Equação 2:

$$\alpha = \frac{1 + a}{1 + m} \quad 2$$

α : taxa de argamassa

a: proporção de areia (Unidade de massa)

m: proporção de agregados totais (Unidade de massa)

O fator água/cimento utilizado, é definido em função de um abatimento de tronco de cone pré-definido em função das necessidades do material. Para o caso do concreto estrutural, devido ao fato das usinas de concreto utilizarem o bombeamento do mesmo, será adotado como premissa o abatimento de 160 ± 20 mm. O valor está adequado com a NBR 8953 (ABNT, 2015) que classifica concreto bombeados como concretos cujo abatimento estão entre 160 e 220 mm. Neste caso, aditivo plastificante a base de naftaleno sulfonado foi usado para alcançar o slump desejado, nos concretos cuja dosagem de aditivo foi superior a 2% com relação a massa de cimento, foi utilizado superplastificante a base de Eter policarboxilato. A dosagem de plastificante foi feita empiricamente durante as misturas.

Para cada tipologia de concreto estudado foram moldados 15 corpos de prova cilíndricos de acordo com a NBR 5738 (ANBT, 2016). Foram moldados em duas camadas de aproximadamente 100mm cada adensadas com 12 golpes cada camada utilizando uma haste lisa. O corpo de prova é desmoldado com 24 horas, se possível. Então são colocados em câmara de cura úmida até alcançar os 28 dias. A utilização dos 15 corpos de prova foi distribuída de acordo com Tabela 6. Nos capítulos que seguem, os ensaios e o método de dosagem são descritos com maior rigor.

Tabela 6. Quantitativo de corpos de prova e seus respectivos ensaios

Ensaio	Propriedades mecânicas		Durabilidade		
	RC	RT	ABS	CARB	VS
Número de corpos de prova	6	6	6	3	12
RC: Resistência a compressão					
RT: Resistência a tração					
ABS: Absorção por capilaridade					
Carb: Carbonatação					
VS: Velocidade de pulsos ultrassônicos					

Fonte: o autor (2024)

3.2 ENSAIOS A SEREM REALIZADOS NOS AGREGADOS MIÚDOS, GRAÚDOS E RESÍDUOS DE CONCRETO

3.2.1 Obtenção dos agregados de resíduo do concreto

Para a obtenção dos agregados de resíduo de concreto, aproximadamente 1m³ de concreto residual de um caminhão betoneira de uma empresa de concreto do Oeste Paranaense foi armazenado em toneis plasticos de 2 e 5 litros. Este concreto apresenta resistência característica à compressão (fck) igual a 25 Mpa e slump igual a 100/160 mm.

Após 14 dias, este concreto foi britado utilizando um triturador de mandibula modelo TE-2 da CSM, conforme Figura 8 a) de modo a obter agregados graúdos com DMC igual a 9,5mm por meio de peneiramento, conforme Figura 8 b), sendo o material em pó foi descartado. O material retido na peneira 19mm retornava ao britador com uma abertura de mandíbula ligeiramente menor. O material passante da peneira 19mm mas retido na peneira 9,5mm foi separado. Este material obtido foi armazenado em toneis e caracterizado conforme ensaios descritos nos itens subsequentes.

Figura 8. Processo de britagem e peneiramento do resíduo de concreto. (a) vista do processo de trituração. (b) vista da separação entre as frações miúda e graúda.



Fonte: o autor (2024)

3.2.2 Ensaio de Granulometria por peneiramento

A análise de granulometria foi realizada para o agregado miúdo natural, o agregado graúdo natural e o agregado resíduo da britagem de concreto após secagem em estufa a 105°C por meio do processo de peneiramento mecânico por 90 segundos utilizando as peneiras apresentadas na Tabela 7. Foi utilizada também uma peneira de abertura de 16mm, que não faz parte nem da série normal, nem da série intermediária. Para tanto, foram utilizados 500 gramas de agregado miúdo e 5000g de agregados graúdos.

Tabela 7. Tamanhos de peneira da série normal e série intermediária

Série normal	Série intermediária
	25 (mm)
19 (mm)	
	12,5 (mm)
9,5 (mm)	
	6,3 (mm)
4,75 (mm)	
2,36 (mm)	
1,18 (mm)	
600 (µm)	
300 (µm)	
150 (µm)	

Fonte: NBR 17054 (2022c)

Após a agitação no conjunto de peneiras, foi realizada a aferição da massa que ficou retida em cada peneira. Para evitar que o material fique retido na malha da peneira, um pincel de cerdas macias é usado para realizar a limpeza as peneiras.

Com as medidas das massas retidas, foi possível elaborar uma planilha das peneiras, com massa retida, percentual de massa retida e percentual de massa retida acumulada e utilizar estes dados para traçar a curva granulométrica dos materiais em gráfico de escala logarítmica, o qual no eixo vertical está o percentual passante em cada peneira e no eixo horizontal o tamanho de grão em milímetros, em escala logarítmica. Com a curva granulométrica é possível comparar a fim de entender se houve alteração nas características de formato da curva a fim de identificar possíveis comportamentos mecânicos advindos de outros ensaios.

3.2.3 Índice de forma dos agregados

Com o auxílio de um paquímetro, foi calculado o índice de forma dos agregados graúdos natural e reciclado, de acordo com DNIT 425 (2020). Foram necessários 5 quilogramas de material seco com avaliação de 200 grãos para medição dos lados dos agregados de acordo com procedimento da norma. Foram avaliados agregados passantes da peneira 19,5 mm e retidos na peneira

9,5mm, desprezando também as peneiras cuja porcentagem seja inferior a 5% do total da massa da amostra.

O ensaio é realizado mediante média da relação entre comprimento e espessura do agregado, sendo que o comprimento é a maior dimensão em qualquer direção e a espessura a menor dimensão possível entre planos paralelos do material. Então, calcula-se o índice de forma pela equação 3:

$$I_f = \frac{C}{E} \quad (3)$$

I_f : Índice de forma (adimensional)

C: Comprimento (unidade de comprimento)

E: espessura (unidade de comprimento)

O número de grãos para cada intervalo é dado de acordo com a equação 4

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i} x F_i \quad (4)$$

N_i : número de grãos do intervalo

F_i : Frequência dos intervalos

3.2.4 Teor de Material Pulverulento

O procedimento de análise é realizado de acordo com a NBR16973 (2021) sendo a massa mínima de material para o ensaio igual a 2500 gramas de material seco para britas com dimensão máxima característica de 19 mm. O procedimento consiste em secar o material em estufa, por 24 horas a 105 °C ±10 °C. Após a secagem, o material é colocado em um recipiente que permita fluxo contínuo da água. Abaixo são colocadas as peneiras de tal forma que na superior fique o material a ser lavado. O procedimento deve ser executado até que a água passante fique límpida em comparação visual. O material é então novamente seco e pesado após secagem, calculando então o percentual de pulverulento no agregado, por meio da Equação 5.

$$MP(\%) = \left[\frac{(M_p - M_i)}{M_p} \right] * 100 \quad (5)$$

MP – Percentual de material pulverulento da amostra (%)

M_p – Massa de material seco contendo material pulverulento (g)

M_i – Massa de material seco sem material pulverulento (g)

O material ARCO possuiu um percentual de pulverulento aproximadamente 3 vezes maior que o agregado basáltico, verificado por meio de dados apresentados posteriormente. Dessa forma, foi realizado um procedimento de pré-lavagem no agregado com o intuito de ficar em situação semelhante de pulverulento. O material ARCO foi então lavado com vazão de aproximadamente 0,1L/s, por um minuto consecutivo, alcançando porcentagem de pulverulento semelhantes entre as amostras. Foram realizadas três amostras com a vazão e tempo mencionados.

3.2.5 Massa específica dos agregados

A massa específica dos agregados graúdos natural e reciclado utiliza o método da balança hidrostática para sua determinação. O procedimento consiste em deixar o agregado submerso por 24 horas e então determinar a massa do material em condição saturada em superfície seca (enxugando o material com pano), submersa (na balança hidrostática) e seco ao ar (após secagem em estufa a 105°C por 24h e repouso em bancada por 4 horas). A amostra que está saturada é retirada do recipiente o qual possui água livre e então é seca em um pano comum. Após é mensurada a massa por meio de balança hidrostática, por meio da submersão do material. Após essa medição, o material é levado à estufa, por 24 horas, a 105°C, com posterior resfriamento ao ar livre, a fim de determinar a massa seca ao ar. Então utilizam-se as equações 6 e 7 para cálculo das massas específicas segundo as condições de umidade do agregado em campo:

$$\gamma_{sss} = \frac{M_{sss}}{M_{sss} - M_{sub}} \quad (6)$$

γ_{sss} : massa específica saturada de superfície seca (g/cm³)

M_{sss} : massa do agregado em condição de saturação e superfície seca (g)

M_{sub} : massa do agregado em condição submersa (g)

M_{sar} : massa do agregado em condição seca ao ar (g).

$$\gamma_{ap} = \frac{M_{sar}}{M_{sar} - M_{sub}} \quad (7)$$

γ_{ap} : massa específica aparente (g/cm³)

M_{sub} : massa do agregado em condição submersa (g)

M_{sar} : massa do agregado em condição seca ao ar (g).

3.3 Ensaios a serem realizados no concreto no estado fresco

3.3.1 Dosagem experimental do concreto segundo o método IPT/USP

Segundo Helene e Tutikian (2011), o método de dosagem do concreto faz parte de um processo de construção realizado com o passar dos estudos. Iniciou-se em 1965 sendo elaborado por Eládio Petrucci, com posterior contribuições advindas de pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Prizskulnik & Kirilos (1974), por Helene & Terzian (1992) entre outras. O método, segundo os autores é teórico-experimental, visto a necessidade de experimentos e embasamento em leis comportamentais do concreto. Segundo Helene e Tutikian (2011), as etapas do método consistem em:

- Adotar diâmetro máximo de agregado;
- Definir o abatimento do concreto (nesta pesquisa definido como entre 140 e 180mm);
- Direcionar os ensaios de caracterização dos materiais e do concreto para uma resistência desejada em idade especificada. Nesta pesquisa, objetiva-se uma resistência superior a 20 MPa aos 28 dias;

- Escolher pelo menos três traços distintos, em massa seca, sendo um rico, um intermediário e um pobre e estabelecer uma taxa de argamassa. Definidos nesta pesquisa com os traços 1:4, 1:5 e 1:6 respectivamente e uma taxa de argamassa igual a 60%;
- Determinar o fator água/cimento fixando a taxa de argamassa e a relação a/c com materiais secos. Neste caso, partindo das premissas anteriores, o fator a/c será ajustado experimentalmente até a obtenção do slump desejado.
- Conduzir ensaios para determinação da resistência mecânica e construir os diagramas de dosagem. Nesta pesquisa foram construídos os diagramas para cada percentual de substituição de agregado natural por agregado reciclado proposto após a realização dos ensaios de compressão.

3.3.2 Massa específica do concreto no estado fresco

A fim de determinar a massa específica no estado fresco de concreto, toma-se uma amostra de concreto, adicionada em um molde cilíndrico, que não se deforme, com alças, de capacidade mínima de 7,5 dm³, diâmetro interno mínimo de 200mm e altura interna mínima 240 mm. Após o preenchimento com concreto, é feito o adensamento manual e então é feita a medição da massa do material, descontando o valor de massa do recipiente. Por meio da equação 8 é possível determinar a massa específica em kg/m³ NBR 9833 (ABNT, 2008).

$$\mu = \frac{m}{V} \quad (8)$$

μ : massa específica (g/cm³);

m: massa (g);

V: volume (cm³).

O procedimento será realizado uma vez para cada concreto executado, sendo calculada a massa específica no concreto de referência e em cada substituição segundo seu respectivo traço.

3.3.3 Ensaio de abatimento de tronco de cone (Slump test), moldagem e cura de corpos de prova de concreto.

Para a determinação do abatimento do concreto fresco (Slump test) o procedimento descrito pela NBR 16889 (2020) requer o preenchimento do cone metálico, de altura de 300 ± 2 mm, diâmetro inferior 200 ± 2 mm e diâmetro superior 100 ± 2 mm, em três terços, de aproximadamente mesma altura adensados por 25 golpes uniformemente distribuídos, com haste de adensamento lisa, distribuídos uniformemente em cada camada. Após preenchidas as três camadas, retirada do molde com tempo de retirada em torno de 5s, em movimento constante, sempre realizado pelo mesmo operador. Então, com o auxílio do molde, feita a medida do abatimento (diferença entre a altura do concreto e do cone) com aproximação de 5mm, com uso de régua metálica de 50 cm de comprimento. Vale ressaltar que a coesão do concreto é avaliada visualmente neste ensaio, observando que os agregados não se desprenderam da massa de concreto. Além disso, o objetivo é a obtenção de concretos com slump entre 140 a 180mm neste trabalho, uma vez que estes são concretos bombeáveis.

Após a realização do slump foram moldados 15 corpos de prova cilíndricos de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016). Os corpos de prova possuem diâmetro de 100mm e altura de 200mm. Os moldes são lubrificados com desmoldante que não reaja com cimento. O preenchimento e adensamento é realizado em duas camadas, de alturas semelhantes. Após o preenchimento de cada camada, é realizado o adensamento de modo manual, com 12 golpes distribuídos uniformemente pela área circular. Na primeira camada, a haste de adensamento não pode encostar no fundo do molde. Já na segunda camada, a haste de adensamento deve ultrapassar o limite entre as camadas adjacentes. Após moldados, a cura inicial de 24 horas no próprio molde. Após o período de tempo requerido é realizada cura úmida pelos demais dias até a idade de 28 dias. Nesse intervalo, é realizada o preparo da base por meio de equipamento de retífica, para então realizar os ensaios de ruptura do concreto conforme mencionado anteriormente.

3.4 ENSAIOS A SEREM REALIZADOS NO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

3.4.1 Absorção de água por capilaridade

Os corpos de prova utilizados são de formato cilíndrico conforme já mencionados anteriormente. Os materiais utilizados para o ensaio são um suporte plástico para acomodar os corpos de prova e dois suportes que permitam que os materiais fiquem submersos na altura de 5 mm.

O procedimento de ensaio, adaptado nos quesitos de tempo, de (NBR 9779, 2012) consiste na submersão parcial de 6 corpos de prova cilíndricos por amostra após curados por 22 dias, que foram previamente pesados após secos em estufa, por 72 horas. O ensaio foi realizado em temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Após isso, foi montado o suporte no qual os corpos de prova foram colocados e preenchido de água até uma altura que cubra $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ dos corpos de prova. Essa altura deve ser controlada e mantida constante ao longo do ensaio.

Após o início do ensaio, foram medidas as massas parcialmente saturadas em vários tempos distintos. A medição é realizada com 3h, 6h, 24h, 48h, 72h. Com os dados das massas medidas, com a equação 9, é calculada a absorção de água para cada horário descrito.

$$Cap = \frac{m_{sat} - m_s}{A} \quad (9)$$

Cap: Absorção em g/cm^2 .

M sat: massa saturada no tempo especificado em g

M s: massa seca em g

A: área da seção transversal em cm^2

3.4.2 Ensaio destrutivos: Tração e compressão nos corpos de prova

Segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011), no ensaio de tração, os corpos de prova são ensaiados de modo que uma força de compressão seja aplicada diametralmente ao longo de seu comprimento com uma taxa de $0,05 \pm 0,02 \text{ MPa/s}$, sendo a força aplicada até sua ruptura. Para tanto, nesta pesquisa, para ruptura de corpos de prova por compressão diametral, foi utilizada uma prensa

hidráulica QUANTEQ CH 019 no laboratório de Materiais de Construção do Centro Universitário de Cascavel - PR (UNIVEL - PR)

Com o valor de força máxima utiliza-se a equação 10, para o cálculo de resistência à tração diametral:

$$F_{ct} = \frac{2F}{\pi DL} \quad (10)$$

F é a força em Newtons [N]

D é o diâmetro em milímetros [mm]

L é o comprimento do corpo de prova em mm [mm]

F_{ct} é a resistência em Mega Pascals [MPa].

Para o ensaio de compressão, segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018) os corpos de prova passam por processo de retificação para regularização de base e topo onde a carga será aplicada. Então, é determinado o diâmetro com um paquímetro, sendo calculada a área do corpo de prova. Após, os corpos de prova foram ensaiados em prensa hidráulica de marca Intermetric, modelo UH501 – Tesc 7.00, porém utilizando um incremento de carga de $0,45 \pm 0,15$ MPA/s. O ensaio finaliza quando a força aplicada gere a ruptura do concreto, permitindo calcular a resistência do mesmo segundo a Equação 11.

$$F_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (11)$$

F é a força em Newtons [N]

D é o diâmetro em milímetros [mm]

F_c é a resistência em Mega Pascals [MPa]

3.4.3 Ensaio não destrutivo e de durabilidade

O ensaio de ultrassom do concreto foi realizado previamente nos mesmos corpos de prova que foram submetidos à compressão visando comparar a velocidade de propagação de pulso com a resistência dos mesmos.

No caso, será realizado o método de transmissão direta, em que os transdutores são posicionados no topo e na base dos corpos de prova e o tempo de propagação da onda será mensurado por meio de um equipamento da marca Controls modelo R58 – E 4800. Os resultados alcançados são velocidade de

propagação, distância entre eixos e o tempo de transmissão. O cálculo de velocidade é realizado por meio da equação 1.

O ensaio de carbonatação consiste em realizar, em ambiente fechado a injeção de gás carbônico (CO_2) sob pressão constante por um determinado período de tempo de modo que o CO_2 penetre os poros do concreto. Desta forma, em uma câmara de carbonatação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Toledo foram colocados os corpos de prova cilíndricos, os quais permaneceram por 48 horas a uma pressão de 20 Psi.

Previamente, os corpos de prova devem permanecer por 14 dias curando em condições ambiente para que a umidade interna dos mesmos atinja patamares da ordem de 50-60%, o que leva a maior frente de penetração de CO_2 . Assim, os corpos de prova foram curados sob condições saturadas por 14 dias e por mais 14 dias foram curados sob condições ambientes.

Após a cura, os corpos de prova foram colocados dentro da câmara de carbonatação para proceder a penetração do CO_2 conforme descrito anteriormente. Na sequência, os corpos de prova foram retirados da câmara de carbonatação e seccionados em duas metades por meio de compressão diametral. Após a fratura em duas metades, a solução de fenolftaleína (1% m/v em etanol 70 v/v) foi pulverizada na superfície, permitindo avaliar a coloração do concreto. Se a coloração for um rosa carmim, indicará que o concreto tem um pH acima de 12 e, portanto, protetor às armaduras, sendo um concreto durável. Se o incolor for verificado, indicará um concreto cujas armaduras são passíveis de corrosão devido um pH inferior a 9 (Balestra et al., 2023)

3.5 TRATAMENTO DOS DADOS

Com relação aos dados gerados para cada ensaio, cada ensaio foi tratado de acordo com diferentes métodos, julgados adequados para cada caso, com a utilização do software Microsoft Excel.

Para o trabalho em questão, valores de R^2 acima de 0,80 possuem um nível aceitável de confiabilidade de correlação, sendo acima de 0,95 foram considerados de alta confiabilidade.

3.5.1 Compressão uniaxial e Tração por compressão diametral

Foram avaliados seis corpos de prova à tração e seis corpos de prova à compressão. Os dados foram tratados por meio da avaliação de interquartil. Foram elaborados os quartis para os dados e os valores que ficaram mais distantes que 1,5 vezes o interquartil. Montgomery e Runger (2011) mencionam como método adequado para questões em engenharia, avaliando o gráfico de caixa, descartando valores superiores a 1,5 vezes o intervalo entre os quartis. Após análise dos outliers, é calculada média aritmética dos valores de resistência e desvio padrão populacional para os casos que não hajam valores extremos ou desvio padrão amostral nos casos de retirada de outliers.

3.5.2 Ultrassom

O ensaio de ultrassom foi realizado com 12 corpos de prova, os mesmos que posteriormente foram ensaiados a tração e compressão, separadamente. Para realização da avaliação de média, foi anteriormente feita a verificação de valores extremos com a mesma avaliação dos corpos de prova a tração e compressão. Porém, como os valores são mais variados, não houveram valores retirados. Com os valores então, foram calculados, novamente, a média de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, calculado desvio padrão e com intuito de esclarecer as amostras mais variadas, foi calculado o coeficiente de variação em porcentagem, sendo a divisão do desvio padrão populacional pela média, analisando percentualmente qual a representatividade do valor encontrado.

Como foram os corpos de prova a tração e a compressão passaram por dois processos de curas distintos, os resultados são apresentados para os corpos de prova a tração e os corpos de prova a compressão separadamente.

3.5.3 Carbonatação

Para avaliação da profundidade de carbonatação, os valores máximos não podem ser descartados, mesmo se forem isolados, visto sua relevância em relação à espessura de cobrimento que faz a proteção das armaduras do

concreto armado. Dessa maneira, os dados da carbonatação foram avaliados por meio de carbonatação média, desvio padrão, coeficiente de variação e também profundidade máxima, segunda profundidade máxima e profundidade mínima. Porém, como já mencionado, os valores de maior relevância, desde que avaliados caso a caso, são os de profundidade máxima, visto a importância com relação à proteção das armaduras.

3.5.4 Absorção por capilaridade

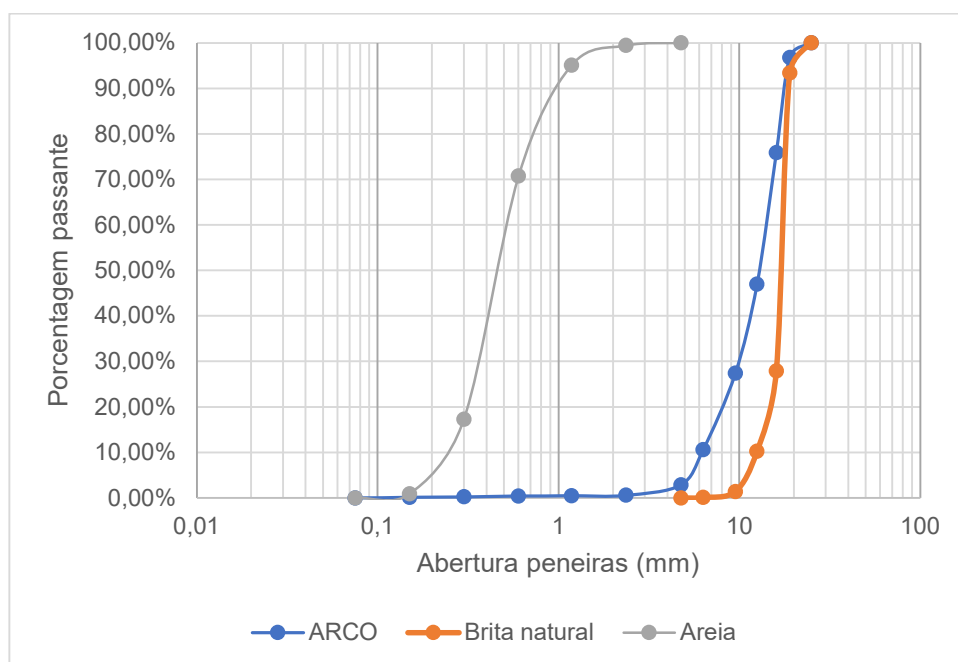
A absorção por capilaridade gera dados para diferentes tempos de ensaios. Os dados de 3 e 6 horas iniciais representam como a água é absorvida no início do contato com a água. Já os demais tempos representam como se desenvolvem essa “estabilização” da entrada de água. Dessa forma, os dados extremos foram retirados por meio do método do gráfico de caixa informado anteriormente, e após essa retirada, foram calculadas as médias e desvio padrão dos dados, para então plotagem em gráficos. Porém, para o gráfico de absorção por capilaridade, Fagerlund (1993) indica que a quantidade de água absorvida, dividida pela área de contato se desenvolve de acordo com a raiz do tempo. Logo, o eixo gráfico do tempo, deve ser convertido para raiz do tempo, gerando um modelo que se comporta em situação próxima a linearidade com esse novo eixo. Dessa forma, foram eliminados os outliers novamente por meio do gráfico de caixa e posteriormente foram plotados os dados em gráficos cujos eixos são absorção por área (g/cm^2) e raiz do tempo em minutos. Após a plotagem, gera-se uma linha de tendência, que parte da origem nos eixos, e avalia-se, mediante o R^2 o ajuste do modelo matemático com os dados experimentais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 GRANULOMETRIA: AGREGADO MIÚDO, AGREGADO GRAÚDO NATURAL E ARCO

Na Figura 9 estão representadas as curvas granulométricas dos materiais a serem utilizados, agregado miúdo, agregado graúdo natural e ARCO, respectivamente.

Figura 9. Curva granulométrica agregados



Fonte: o autor (2024)

Com relação à curva granulométrica do agregado miúdo, não há comparativo visto que o mesmo material é utilizado para todos os traços, entretanto, há de se pontuar que o mesmo apresenta uma dimensão máxima característica (DMC) igual a 1,18mm. No caso da curva granulométrica comparativa entre os agregados gráudo natural e ARCO é notada a presença de finos na granulometria do ARCO, sendo que abaixo de 6,3mm houve porcentagem de aproximadamente 10% da amostra.

A influência nesse caso, segundo Biela e Oliveira (2023), se dá pois os agregados reciclados possuem maior quantidade de finos e textura mais porosa, influenciando a quantidade de água para a mistura. De qualquer maneira, observa-se que embora as britas tenham apresentado um DMC igual a 19mm, a distribuição granulométrica entre as mesmas é um pouco diferente. Neste ponto, enquanto a brita natural apresenta distribuição uniforme (Britas com dimensões próximas), a brita proveniente de ARCO apresenta distribuição que tende a ser contínua (Britas com diferentes dimensões). Esse aspecto influi no empacotamento de partículas, visto que há preferência por agregados com distribuição contínua em relação à uniforme para redução de vazios na mistura.

4.2 ÍNDICE DE FORMA DOS AGREGADOS

Para o ensaio em questão, segundo a DNIT 425 (2020), foram analisados os seguintes tamanhos de grão e respectiva quantidade de grãos, segundo apresentado nas Tabelas 8. Sendo possível determinar o índice de forma entre os 200 grãos analisados conforme a Equação 2.

Tabela 8. Número de grãos por peneira para agregado graúdo natural e ARCO

Agregado graúdo natural				
	Graduação (mm)	Massa (g)	Percentual	Número de grãos
Agregado graúdo natural	25	0	0%	0
	19	332,1	7%	13
	16	3302,9	66%	133
	12,5	889	18%	36
	9,5	446,4	9%	18
	6,3	65,7	1%	0
	4,75	0	0%	0
	2,36	0	0%	0
	Fundo	5,2	0%	0
		5041,3		200
ARCO	25	0	0%	0
	19	167,1	3%	0
	16	1102,2	21%	60
	12,5	1520,7	29%	83
	9,5	1030,1	20%	56
	6,3	883,4	17%	0
	4,75	405,7	8%	0
	2,36	121,2	2%	0
	Fundo	0,1	0%	0
		5230,4		200

Fonte: o autor (2024)

Tendo o número de grãos, após realização dos ensaios, os índices de forma estão representados na Tabela 9.

Tabela 9. Índice de forma agregado graúdo natural

	Comprimento médio (cm)	Espessura média (cm)	Índice de forma
Agregado graúdo natural	$23,16 \pm 3,55$	$14,46 \pm 2,56$	$1,60 \pm 0,35$
ARCO	$20,99 \pm 8,60$	$11,98 \pm 2,29$	$1,75 \pm 0,90$

Fonte: o autor (2024)

Ambos os índices de forma possuem ordem de grandeza semelhante, porém é notado que o comprimento médio diminuiu e a espessura média também diminuiu. Além disso, em análise visual, nota-se que quanto menor o tamanho de grão, mais suscetível à lamelaridade o agregado tende a ser. Na Figura 10 abaixo, é notada a variação de formato de acordo com o tamanho de grão.

Figura 10. Formato ARCO em granulometria de 19mm até 4,75 mm



Fonte: o autor (2024)

O resultado do índice de forma significa que quanto mais próximo de 1, mais próximo de um material cúbico a amostra está e, quando mais distante de 1, mais lamelar. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022a) o índice de forma não deve ser superior a 3 segundo Silva e Geyer (2018) quanto mais cúbico o agregado é, mais resistente será o concreto, ao passo que e quanto mais lamelar, menos resistente. Segundo Santos et al (2023), a influência do aumento da lamelaridade está relacionado ao fato de prejudicar o empacotamento com a criação de vazios, reduzindo também o módulo de elasticidade.

Além disso, agregados lamelares tendem a apresentar maior superfície e, consequentemente, maior zona de transição na interface do agregado com a pasta de cimento, sendo está uma região muito porosa e consequentemente com impactos na resistência mecânica do concreto. Não foi detectada diminuição da qualidade do concreto em função do índice da lamelaridade.

4.3 MATERIAL PULVERULENTO DOS AGREGADOS

Para a porcentagem de material pulverulento, após o ensaio, a Tabela 10 representam para o material pulverulento e para o agregado gráúdo natural, respectivamente.

Tabela 10. Resultados material pulverulento

	Massa Agregado gráúdo natural (g)	Massa ARCO sem lavagem (g)	Massa ARCO pós lavagem (g)
Pré-ensaio	2499,8	2500,2	2500,1
Pós-ensaio	2497,1	2491,2	2497,1
Teor de pulverulento (%)	0,11	0,36	0,12

Fonte: o autor (2024)

É notado que o percentual de pulverulento nos três casos fica inferior ao 1% prescrito pela NBR 7211 (2022a). Porém, ao permitir um percentual de pulverulento de 0,36% (três vezes superior ao convencional do agregado natural) é possível que a quantidade superior de pulverulento, afetasse características de estado fresco e estado endurecido, podendo resultar em diferenças de trabalhabilidade, resistência a compressão e tração. Outro aspecto está no fato de que quanto maior a presença de pulverulentos, maior sua possibilidade de dispersão. No processo de britagem e no processo de mistura do concreto, essa dispersão pode gerar problemas de saúde do trabalhador envolvido, sendo prudente manusear o ARCO em situação molhada.

Dessa forma, foram realizadas as lavagens nos agregados conforme descrito anteriormente, alcançando um valor semelhante de pulverulento em comparação do ARCO e do agregado natural.

4.4 MASSA ESPECÍFICA

Os resultados de massa específica aparente e massa específica saturada de superfície seca, são apresentados na Tabela 11 para agregado gráúdo natural e ARCO.

Tabela 11. Resultados massa específica e massa específica saturada superfície seca de agregado gráúdo natural e ARCO

	$\gamma_{ss}(g/cm^3)$	$\gamma_{ap}(g/cm^3)$
Agregado gráúdo natural	2,98	3,05
ARCO	2,58	2,88

Fonte: o autor (2024)

A respeito da massa específico de ambos os agregados, como esperado, tanto a massa específica aparente, quanto as massas específicas saturadas com superfícies secas apresentaram valores entre 2,5 e 3,1 g/cm³. A diferença entre a aparente e a saturada superfície seca indica quão poroso é o material avaliado, demonstrando que de fato ARCO apresenta maior porosidade, conforme já mencionado por Biela e Oliveira (2023). Segundo Muda et al (2023), sua porosidade influencia diretamente na absorção de água em função da presença de poros da argamassa antiga que absorvem grande quantidade de água na mistura, gerando alteração na trabalhabilidade e irá influenciar diretamente na absorção de água e resistência do concreto uma vez que quanto mais poroso, maior a absorção de água e menos resistente será o concreto.

Neste aspecto há de se considerar a diferença de porosidade entre o agregado natural basáltico e o ARCO, no qual o primeiro, geralmente apresenta porosidade inferior, o que remete a maior resistência mecânica do concreto. Esse aumento de porosidade influencia diretamente o decréscimo de resistência. Segundo Sasanipour e Aslani (2020) quanto mais porosidade dos agregados, maior será a absorção de água no concreto e consequentemente menos resistente a compressão.

4.5 CARACTERÍSTICAS DOS TRAÇOS

O desenvolvimento dos traços parte dos três traços denominados anteriormente como pobre, intermediário e rico, os quais já possuem pré-definição da relação de massa de agregados com relação a massa de cimento. Porém, há a substituição do agregado gráúdo natural pelo ARCO, e presença de aditivo de acordo com a necessidade para que o slump fosse mantido entre 160±20 mm. Na Tabela 12 está o resumo do traço, quantidade de aditivo

utilizado, slump e massa específica no estado fresco. O traço está no formato cimento:areia:brita:ARCO. Os fatores a/c foram definidos para o traço referência e então repetidos para os demais. Para os traços ricos, o fator a/c é 0,49. Para o traço intermediário é 0,56 e para o traço pobre 0,60, sendo o último o limite considerado para concreto estrutural. O aditivo utilizado foi aditivo redutor de água tipo 1, plastificante multifuncional, exceto para os traços S756 e S1006, nos quais foram utilizados aditivo redutor de água tipo 2, superplastificante a base de polímeros policarboxilatos.

Tabela 12. Parâmetros dos traços em estado fresco.

Nomenclatura	Traço	Aditivo (%)	Slump (mm)	Massa específica (g/cm³)
R4	1:2:2:0	0	162	2,40
R5	1:2,6:2,4:0	0	157	2,36
R6	1:3,2:2,8:0	0,25	141	2,33
S54	1:2:1,9:0,1	0,15	176	2,43
S55	1:2,6:2,28:0,12	0,15	162	2,38
S56	1:3,2:2,66:0,14	0,75	144	2,32
S104	1:2:1,8:0,2	0,15	161	2,41
S105	1:2,6:2,16:0,24	0,21	165	2,38
S106	1:3,2:2,52:0,28	1,3	158	2,33
S154	1:2:1,7:0,3	0,15	168	2,40
S155	1:2,6:2,04:0,36	0,21	163	2,37
S156	1:3,2:2,38:0,42	1,65	143	2,34
S204	1:2:1,6:0,4	0,15	178	2,41
S205	1:2,6:1,92:0,48	0,21	165	2,39
S206	1:3,2:2,24:0,56	1,95	144	2,34
S504	1:2:1:1	0,3	141	2,37
S505	1:2,6:1,2:1,2	0,6	145	2,32
S506	1:3,2:1,4:1,4	6,7	141	2,31
S754	1:2:0,25:0,75	0,6	149	2,34
S755	1:2,6:0,6:1,8	1,2	142	2,31
S756	1:3,2:0,7:2,1	0,3	152	2,19
S1004	1:2:0:2	1,8	150	2,31
S1005	1:2,6:0:2,4	3,5	140	2,30
S1006	1:3,2:2:2,8	0,35	179	2,13

Fonte: o autor (2024)

É possível notar que a substituição do agregado natural pelo ARCO impacta de modo pouco significativo a massa específica do concreto no estado fresco. As massas específicas de ambos os agregados, apesar de distintos, possuem valores que são de mesma ordem de grandeza, e como, os agregados gráudos compõe apenas uma fração na composição do concreto, esta pequena variação já era esperada. Em contrapartida, para os traços S756 e S1006, nos quais foi utilizado o aditivo superplastificante, a massa específica possuiu impacto significativo. Em comparação com o traço referência, a massa específica do traço S756 ficou em $2,19 \text{ g/cm}^3$, o traço S1006 apresentou valor igual a $2,13 \text{ g/cm}^3$ e o referência R6, $2,33 \text{ g/cm}^3$. Ainda sobre o leve aumento de massa específica em traços até 20% de substituição, pode ser relacionado ao empacotamento devido a presença de mais finos.

Em função da porosidade e da presença de materiais pulverulentos no ARCO, quanto maior a quantidade percentual do ARCO, maior foi a dificuldade para alcançar o slump previamente definido. No traço de referência, em função da limitação a um a/c 0,6, no traço pobre já foi necessário o uso de aditivo convencional. Até os 20% de substituição, o uso do aditivo convencional foi de acordo, chegando a 1,95% de aditivo. A recomendação de uso desse aditivo é até 1,5% sobre a massa de cimento, o que já representaria a necessidade de troca de aditivo. Porém, a fim de não incluir mais uma variável nos dados, foi mantido o aditivo até que ele não se tornasse mais viável no quesito manuseio, trabalhabilidade e desmoldagem.

Apesar de ter sido realizada a lavagem do ARCO, buscando uma presença de materiais pulverulentos semelhantes ao agregado gráudo natural, a influência do material pulverulento ainda é presente. Ao introduzir o material gráudo dentro da betoneira, a movimentação do mesmo acaba por gerar atrito entre os grãos. Esse atrito, por ser um concreto já endurecido, gera desagregação de pequenas partículas de tamanho inferior ao agregado miúdo, impactando diretamente nas características do concreto tanto em estado fresco, na trabalhabilidade, quanto em estado endurecido por meio do empacotamento.

O traço pobre contendo uma substituição de 50% ultrapassou os 5% de aditivo, porém foi realizado o concreto nessas condições. A consequência foi a dificuldade de desmoldagem em função da retenção de água. Dessa maneira, foram necessárias 168 horas (7 dias) para a desforma e consequente início de

cura úmida. Isso inviabilizaria o uso do concreto em função da necessidade de avaliação de tempo de desforma para um concreto estrutural. Tal comportamento está relacionado a super dosagem. Apesar do fabricante do aditivo mencionar que não possui efeito retardador, o percentual de aditivo utilizado estava acima da recomendação, o que pode acarretar o retardo. Portanto, mediante este panorama, houve a necessidade de uso de um superplastificante.

É possível notar essa retenção de água na Figura 11, que mostra a ruptura diametral dos 6 corpos de prova. Há coloração mais escura por parte de uma parcela dos dois corpos de prova, demonstrando a presença de água interna, mesmo antes da cura.

Figura 11. Presença de água no traço S506



Fonte: o autor (2024)

Houve também dificuldade de adensamento nos últimos corpos de prova, devido a uma piora mais acelerada na trabalhabilidade dos últimos corpos de prova dentre os 15 moldados, em comparação aos demais traços, conforme verificado na Figura 12.

Figura 12. Problema de adensamento em traço S506



Fonte: o autor (2024)

4.6 ENSAIOS MECÂNICOS

Para os resultados dos ensaios mecânicos, a seção foi dividida em resultados de compressão axial simples e tração por compressão diametral.

4.6.1 Compressão uniaxial

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2022b), conforme apresentado na Tabela 13, para que o concreto seja considerado de classe estrutural, é necessário que possua uma classe de resistência à compressão de pelo menos 25 MPa. Essa informação é delimitadora para que os traços sejam classificados como concreto estrutural, através dos resultados apresentados nas Tabela 13.

Tabela 13. Resistência à compressão e desvio padrão segundo diferentes traços

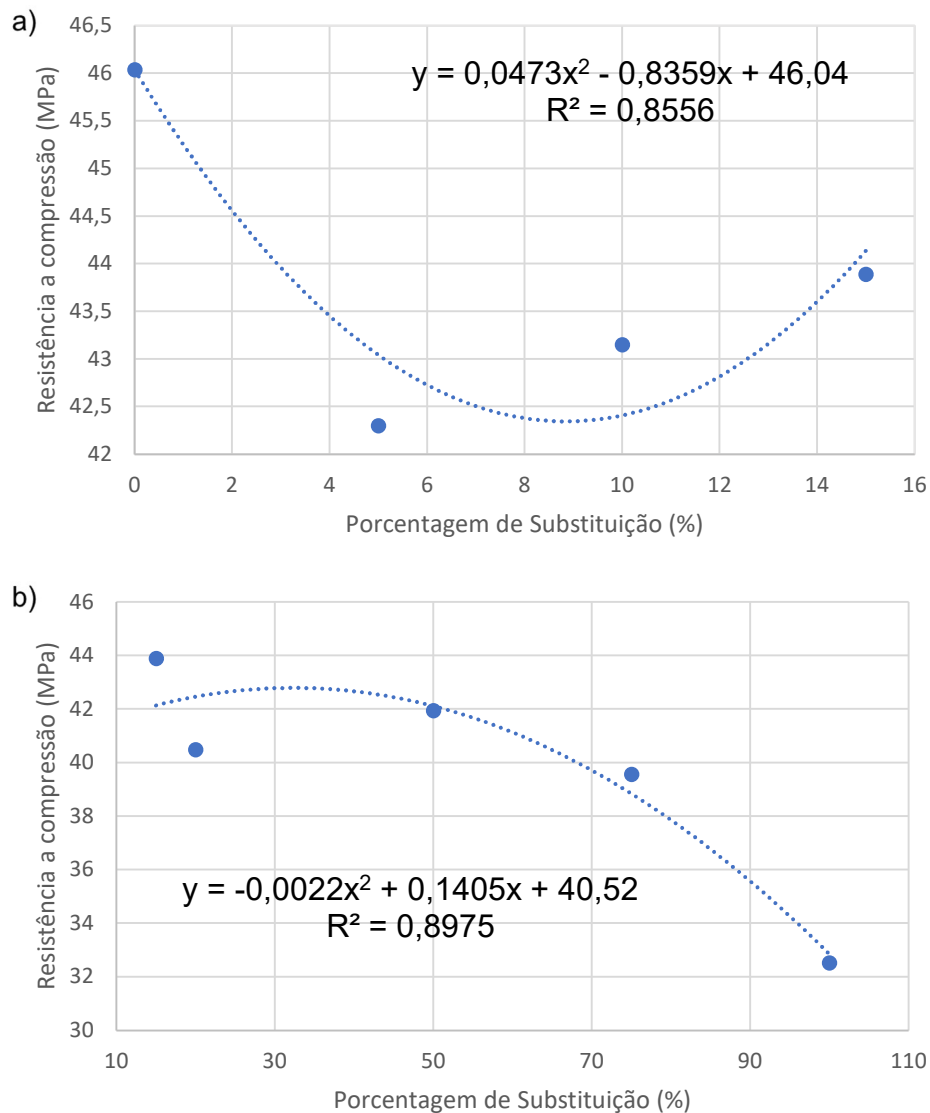
Identificação	Traço rico (MPa)	Traço intermediário (MPa)	Traço pobre (MPa)
Referência	46,04 ± 1,40	36,40 ± 0,92	30,59 ± 0,67
Substituição 5%	42,30 ± 0,13	34,13 ± 0,60	31,75 ± 0,60
Substituição 10%	43,15 ± 0,86	35,05 ± 0,48	33,47 ± 0,09
Substituição 15%	43,89 ± 0,33	34,23 ± 0,60	35,98 ± 0,89
Substituição 20%	40,48 ± 1,12	35,00 ± 0,30	39,64 ± 0,81
Substituição 50%	41,94 ± 0,60	36,09 ± 1,42	17,20 ± 1,82
Substituição 75%	39,57 ± 0,03	38,36 ± 0,84	23,48 ± 1,09
Substituição 100%	32,52 ± 1,49	28,75 ± 0,40	17,69 ± 0,53

Fonte: o autor (2024)

Foram elaborados gráficos com respectivas linhas de tendência para cada traço: rico, intermediário ou pobre. Os gráficos foram elaborados e foram testadas as seguintes linhas de tendência: linear, exponencial, logarítmica, polinomial grau 2. Cada um dos três traços possuíram sua respectiva linha de tendência com melhor ajuste. Em todos os gráficos o eixo vertical mostra a resistência em MPa e o eixo horizontal o percentual de substituição.

Para o traço rico, o melhor ajuste foi para uma curva polinomial de grau 2. O valor de R^2 e a equação é conforme mostrado na Figura 13.

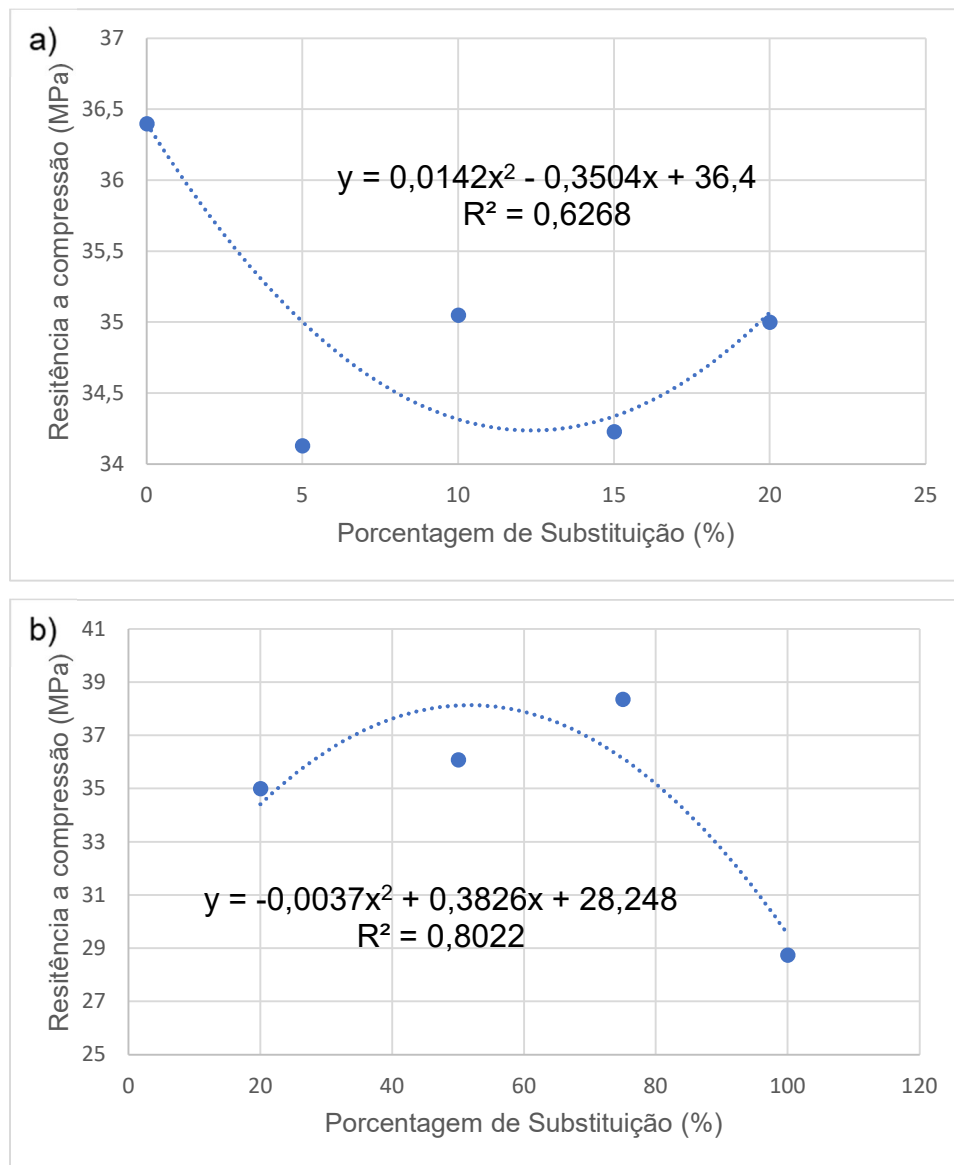
Figura 13. Tendência de dados traços rico a) de 0% a 15% de substituição e b) de 15% a 100% de substituição



Fonte: o autor (2024)

Para o traço intermediário, o melhor ajuste foi para uma curva polinomial de grau 2. O valor de R^2 e a equação é conforme mostrado na Figura 14.

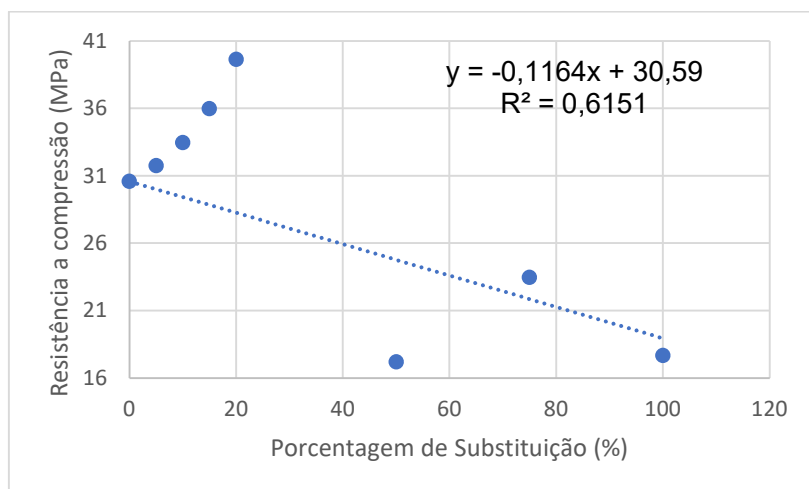
Figura 14. Tendência de dados traços intermediário a) de 0% a 20% e b) de 20% a 100%



Fonte: o autor (2024)

Para o traço pobre, o melhor ajuste considerando todos os dados foi para função afim. O valor de R^2 e a equação é conforme mostrado na Figura 15.

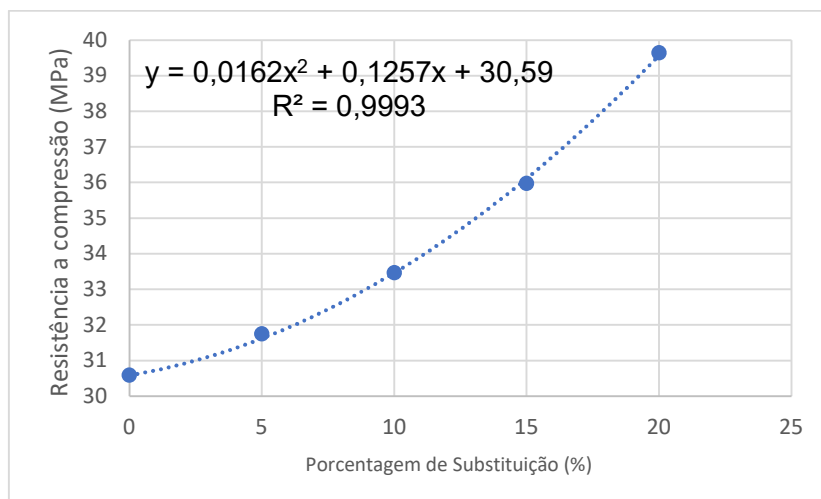
Figura 15. Tendência de dados traços pobre



Fonte: o autor (2024)

Porém, buscando um melhor ajuste, para o traço pobre, é possível melhorar o ajuste da curva de tendência separando apenas os dados até 20%. Para esse trecho de dados, a Figura 16 ilustra um ajuste ótimo para função polinomial de grau 2, com $R^2 = 0,9993$.

Figura 16. Tendência de dados traços pobre de 0% a 20% de substituição



Fonte: o autor (2024)

A tendência de crescimento em traços pobres pode estar vinculada a melhora do empacotamento do concreto. Isso ocorre em função do desgaste do agregado reciclado no misturador, aumentando a disponibilidade de materiais em pó, consequentemente melhorando o empacotamento.

Em contrapartida, dentre todos os traços ensaiados, apenas os traços pobres de substituição de 50% e 100% não se enquadram como concretos estruturais. Podendo ter tido quantidade excessiva de pulverulento na mistura. A ruptura de ordem de grandeza inferior para as porcentagens de 50%, 75% e 100% pode ter ocorrido em função de mudança em qual zona houve a ruptura nos corpos de prova. O fato de substituir por um material já manuseado, triturado e retriturado, pode ter gerado superfícies mais fraturadas e/ou mais frágeis. Ao aumentar o percentual de ARCO, esses agregados vão começar a gerar superfícies com diversos pontos de agregados mais frágeis, gerando então uma redução na resistência à compressão. Para as substituições com pequenas porcentagens, em função da variabilidade da mistura de concreto, os pontos de fragilidade possivelmente não chegam a gerar uma superfície toda menos resistente, formando apenas pontos mais isolados de redução de resistência.

A Figura 17, apesar de ser resultante de uma ruptura em compressão diametral, representa a distribuição dos grãos do ARCO no concreto com substituição de 100%. É possível visualizar que a presença de inúmeros grãos de ARCO podem gerar uma superfície de possível ruptura com condições de tensões inferiores. Visto que de modo geral a ruptura do concreto não ocorre no próprio agregado gráudo e sim na argamassa envolvente do mesmo, a figura explicita mais pontos de ruptura do que em situação de 100% de agregado gráudo natural.

Figura 17. Ruptura em compressão diametral de substituição 100% em traço pobre



Fonte: o autor (2024)

Além disso, para o concreto com 50% de substituição, no qual foi utilizado um aditivo de pega normal, sua porcentagem de aditivo foi excessiva como mencionado anteriormente. Apesar de não ter gerado segregação, houve um retardo, visto o tempo de desmoldagem. Consequentemente houve impacto no início de sua cura úmida.

Sobre o traço de substituição de 75%, como o valor limite para concreto estrutural perante norma é de 20 MPa, o traço pobre com 75% de substituição ainda se enquadra como concreto estrutural, apesar de estar próximo ao valor mínimo de resistência. É possível que para sua utilização estrutural fosse necessário algum ajuste de dosagem ou utilização de aditivo com o intuito de melhora na resistência. Para o traço pobre com 50% de substituição, o uso excessivo de aditivo plastificante, em função de um teor alto de pulverulento, pode ser o causador da resistência baixa. Além disso, os valores de desvio padrão, significam valores baixos comparados aos resultados alcançados de resistências médias. O maior de todos os desvios padrões relativos às médias é do traço pobre para 50% de substituição. Excetuando esse traço, todos os outros ficaram com coeficiente de variação inferior a 10%, significando dados próximos, podendo então representar uma boa padronização de ensaio.

A diferença entre a resistência do traço intermediário comparado ao traço rico, foi diminuindo de acordo com o aumento da substituição. Por exemplo, o traço intermediário de referência representa 79% da resistência do traço rico referência, sendo diferenças semelhantes até os 15% de substituição. Porém, ao aumentar a substituição, nota-se que para o caso de 75% de substituição, ambos os traços (intermediário e rico) possuíam resistência muito semelhantes, sendo o intermediário aproximadamente 97% da resistência do traço rico. De modo semelhante, na substituição de 20% de agregado graúdo, o mesmo ocorre se comparar o traço pobre com o traço rico. O traço pobre representa 98% da resistência do traço rico.

A respeito dos dados anteriormente mencionados, a substituição de até 20% é viável do ponto de vista de resistência a compressão, visto que dentre os traços rico, intermediário e pobre, todos tiveram variações com relação ao traço de referência. Além do mais, há uma tendência de aumento de resistência no traço pobre que deve ser levada em consideração visto seu ajuste ótimo para

polinomial de grau 2. Porém, é necessário relacionar a resistência com as questões de ajustes de trabalhabilidade, através do aditivo plastificante ou superplastificante a ser utilizado.

Segundo Salles et. al. (2021), as substituições realizadas com agregados reciclados de característica cimentícia, com substituições de 25%, 50%, 75% e 100%, geraram redução de pelo menos 10% de resistência e no máximo 16,2%. O que fica dentro dos parâmetros dos traços ricos ensaiados. Demonstrando a possibilidade de classificação e manutenção de concreto estrutural, necessitando ajustes de dosagens.

A utilização de ARCO em diferentes percentuais, embora apresente valores de resistência com um contínuo decréscimo, deve ser analisada segundo a necessidade em cada aplicação. O traço pobre, apresentou um comportamento de aumento de resistência ao aumentar a porcentagem de ARCO, visto o melhor empacotamento da mistura por desgaste do agregado reciclado no misturador.

A mesma tendência não é notada dos 20% aos 100%. Com relação ao traço rico, até os 20% é notado um decréscimo gradativo da resistência, alcançando aos 20% de substituição, 88% da resistência do traço referência. Porém, esse decréscimo não inviabilizaria o uso do material como concreto estrutural, visto que o ganho ambiental continua presente. Através da avaliação de resistência e trabalhabilidade, essa informação mostra a possibilidade de usos de agregado reciclado em porcentagem superior a 20%.

A única substituição que possui elevado decréscimo de resistência à compressão é para a substituição de 100% no traço rico, que reduziu 29% em comparação ao referência. Isso é semelhante ao resultado de Silva (2023), que utilizando CP II F 32, mostrou que com 25% de substituição do agregado gráúdo natural, apresentou apenas 12% de redução na resistência. Porém, comparando a substituição de 100%, a redução foi superior, chegando apenas a 48% da resistência referência. O autor justifica pela porosidade, porém, ao comparar com o uso do cimento CP II F-40, os resultados são satisfatórios, uma vez que estes cimentos apresentam maior superfície específica e teores de silicatos de cálcio para reagir com a água e garantir maior resistência.

Para o traço intermediário, é notada tendência de manter as resistências até os 50% de substituição, ao passo que a resistência do concreto referência

foi de 36,40 MPa, o de 50% de substituição foi de 36,09 MPa e o de 75% 38,36MPa. Excetuando o traço de 100% que possuiu um decréscimo de 21% na resistência, nos demais traços intermediários em comparação ao referência, o que possuiu maior decréscimo foi o de substituição de 5%, que reduziu em apenas 6,2% a resistência do concreto.

Para o traço pobre o comportamento foi distinto a depender da porcentagem de substituição. Partindo do traço de referência até a substituição de 20% foi observado acréscimo de resistência cujo comportamento, conforme já mencionado é ajustado por um polinômio de grau 2. Esse acréscimo de resistência pode ser vinculado ao fato do ARCO possuir resistência superior as zonas de ruptura ocorridas no traço de referência. Diminuindo as zonas de menores tensões, aumentando trechos de resistência superiores e consequentemente a resistência final do traço. Já para o trecho acima dos 20%, sendo 50%, 75% e 100% o comportamento é distinto e com resistência inferior. Possivelmente devido a lamelaridade do ARCO, dificultando a pasta de cimento de envolver todos os agregados presentes, gerando então pontos de fragilidade dentro do corpo de prova.

Dessa maneira, a taxa de decréscimo possui diferentes comportamentos de acordo com a proporção aglomerante/agregado. Uma relação entre porcentagens de substituições de traços ricos em comparação com traços pobres geram equívocos de análise que não podem ser desconsiderados. Dessa maneira, ao avaliar diferentes porcentagens de substituição, é necessário saber em quais proporções de aglomerante/agregado está sendo realizada análise.

4.6.2 Tração por compressão diametral

Para a tração por compressão diametral, não há parametros limitadores para valores mínimos, porém, a tração influencia diretamente a questão de fissuração do concreto. Os resultados são apresentados nas Tabela 14.

Tabela 14. Resistência à tração e desvio padrão

identificação	Traço rico (MPa)	Traço intermediário (MPa)	Traço pobre (MPa)
Referência	3,38 ± 0,13	2,93 ± 0,12	2,32 ± 0,17
Substituição 5%	3,00 ± 0,14	2,47 ± 0,13	2,50 ± 0,12
Substituição 10%	2,94 ± 0,39	2,65 ± 0,16	2,50 ± 0,11
Substituição 15%	3,00 ± 0,20	2,42 ± 0,14	2,67 ± 0,10
Substituição 20%	2,37 ± 0,15	1,92 ± 0,26	2,22 ± 0,41
Substituição 50%	2,12 ± 0,29	2,02 ± 0,17	0,68 ± 0,14
Substituição 75%	2,46 ± 0,16	2,41 ± 0,21	1,58 ± 0,18
Substituição 100%	1,92 ± 0,20	1,62 ± 0,07	1,33 ± 0,08

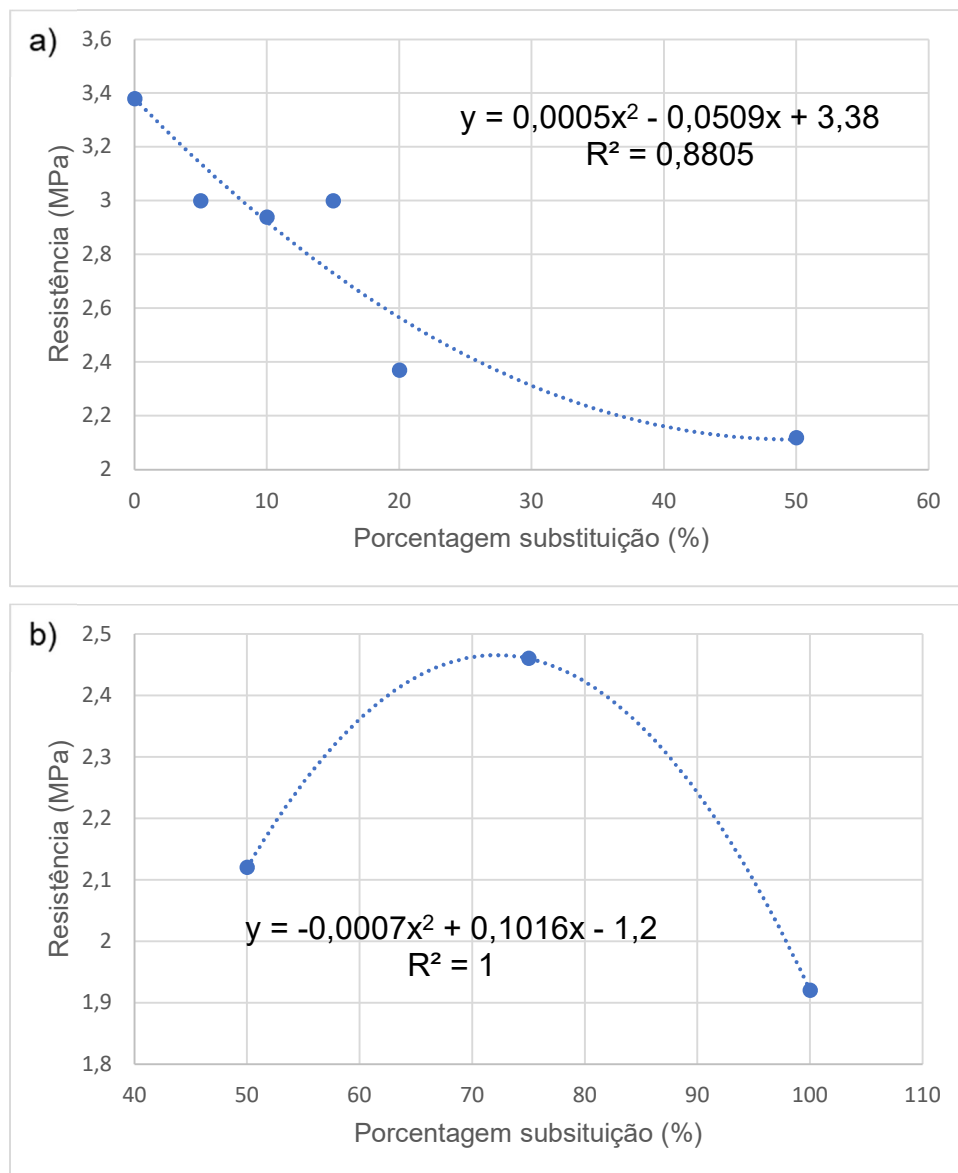
Fonte: o autor (2024)

Com relação a resistência à tração em compressão diametral, a influência do agregado reciclado de concreto, em porcentagem, foi mais presente. É notado que a resistência à tração do traço com 100% de substituição possui apenas 56,8% da resistência do concreto de referência do traço rico. Já no traço pobre, o traço de menor resistência é apenas 25,4% da maior resistência alcançada. O traço intermediário também possui grande variação dos resultados de resistência. Essa variação não é entre os corpos de prova de cada traço, pois os desvios padrão não são de valores alto. Mas sim, a variação entre um traço e outro. Segundo Neville (2016), o interesse dos valores de resistência à tração está vinculado a dimensionamentos ao cisalhamento, projetos de pistas de pouso, pistas rodoviárias e também quando é de interesse a resistência à fissuração, entretanto para fins de dimensionamento esta resistência é desprezada, ficando a cargo das armaduras o suporte a este tipo de carregamento. Porém, a resistência à tração do concreto tem uma particularidade de interesse que trata da sua fissuração, ou seja, considerando vigas sob flexão, a tração no bordo inferior pode levar a abertura de fissuras do concreto, fazendo com que agentes agressivos do meio degradem a estrutura, portanto, é importante ressaltar que a medida que o teor de ARCO aumenta, menor a resistência à tração e consequentemente, menor sua provável durabilidade.

De forma análoga a compressão uniaxial, foram elaborados gráficos buscando ajustar linhas de tendência por meio dos testes: linear, exponencial,

logarítmica, polinomial grau 2. Os eixos também são a resistência em MPa no eixo vertical e a porcentagem de substituição no eixo horizontal. Para o traço rico, foi ajustada uma curva polinomial de grau 2, conforme mostrada na Figura 18. Para o trecho após 50%, matematicamente o R^2 fica igual a 1 em função de haver apenas 3 pontos.

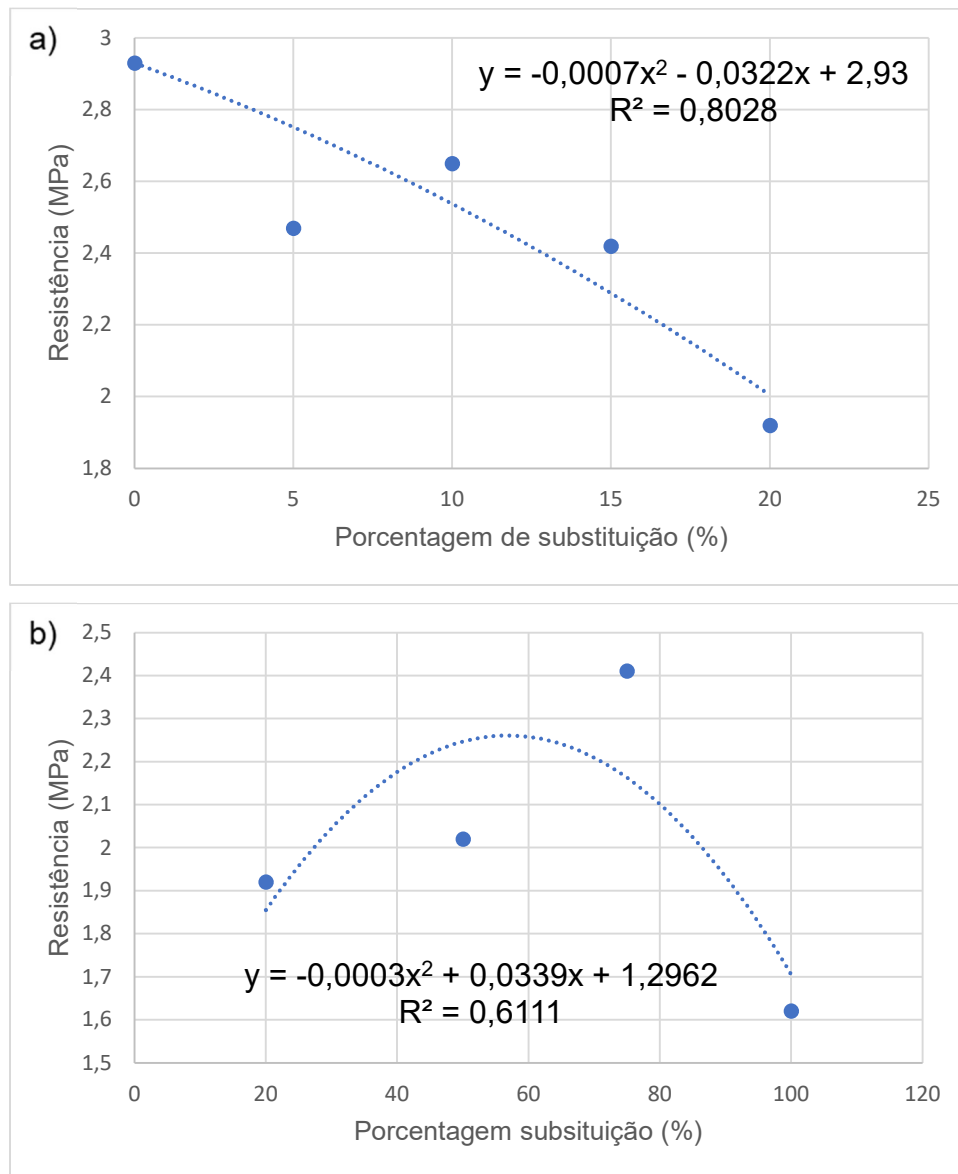
Figura 18. Tendência de dados a compressão diametral de traços rico a) de 0% a 50% e b) de 50% a 100%



Fonte: o autor (2024)

Para o traço intermediário, o ajuste foi realizado com curva de segundo grau, com valor de R^2 conforme mostrada na Figura 19.

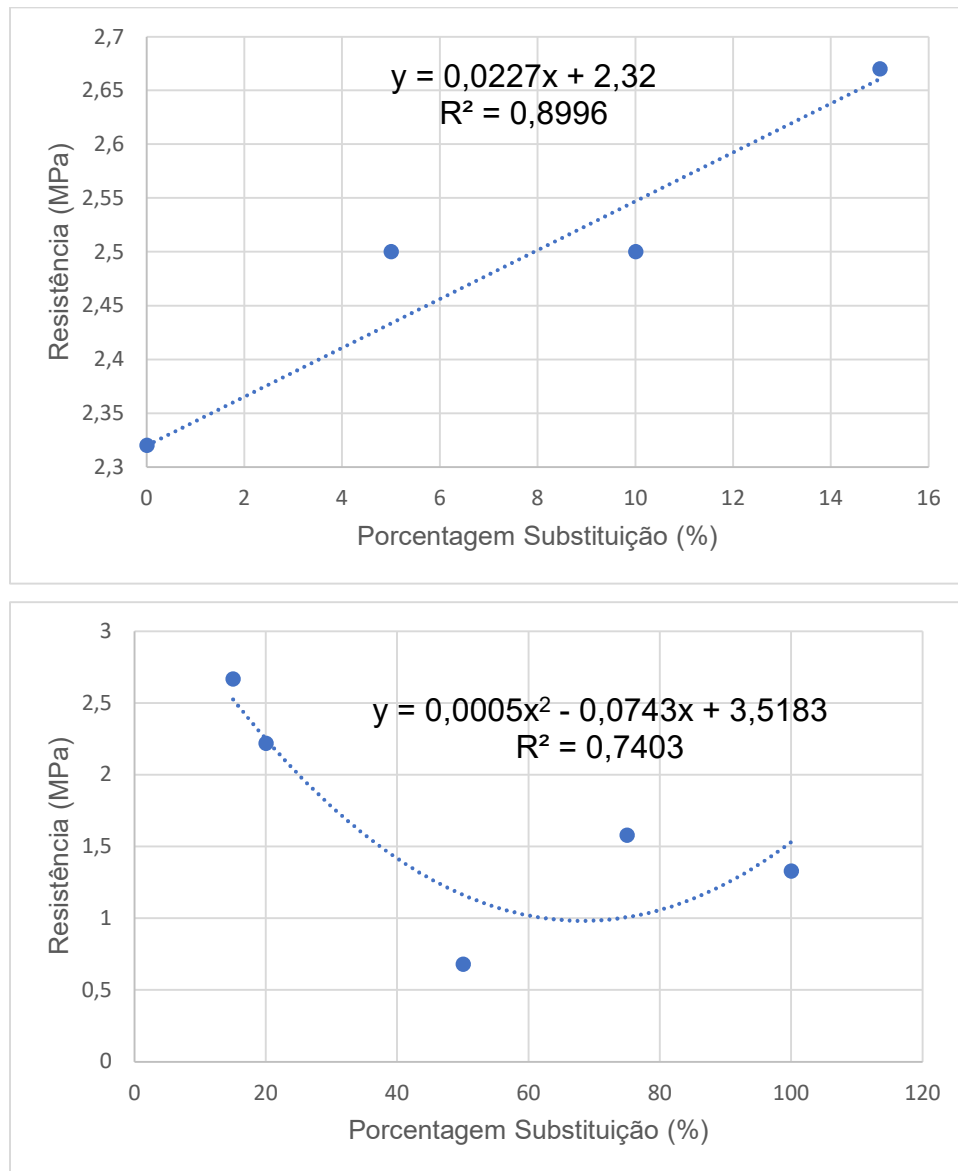
Figura 19. Tendência de dados a compressão diametral de traços intermediário a) de 0% a 20% e b) de 20% a 100%



Fonte: o autor (2024)

E para o traço pobre, a curva polinomial também foi linear até 15% e de polinomial de de grau 2 de 15% a 100% de substituição, com R^2 conforme Figura 20.

Figura 20. Tendência de dados a compressão diametral de traços pobre a) de 0% a 15% e b) de 15% a 100%



Fonte: o autor (2024)

A relação entre as resistência à tração e a compressão pode ser representada por meio da porcentagem que uma representa com relação a outra. Essa porcentagem pode significar que um concreto que apesar de resistência à compressão de valor ótimo, pode ter maiores problemas com fissuração ou efeitos relacionados à tração do concreto. A Tabela 15 representa a porcentagem que a resistência à tração é com relação à resistência a compressão. Para os ensaios, excetuando os valores do traço pobre com 50% de substituição, os demais ficaram com porcentagem entre 5% e 8,06%,

representando uma constância na proporção entre as resistências, mesmo com suas variações.

Tabela 15. Percentual de resistência da tração em relação a compressão

Identificação	Traço rico (%)	Traço intermediário (%)	Traço pobre (%)
Referência	7,34	8,05	7,58
5%	7,09	7,24	7,87
10%	6,81	7,56	7,47
15%	6,84	7,07	7,42
20%	5,85	5,49	5,60
50%	5,05	5,60	3,95
75%	6,22	6,28	6,73
100%	5,90	5,63	7,52

Fonte: o autor (2024)

4.7 ENSAIOS DE DURABILIDADE

Com relação a durabilidade do concreto, características relacionadas ao adensamento, entrada de agentes agressivos para as armaduras e penetração de gás carbônico são fatores a serem avaliados. Dessa maneira, estão descritos os ensaios de propagação de ondas ultrassônicas, absorção por capilaridade e penetração de gás carbônico em câmara de carbonatação.

4.7.1 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

Foram ensaiados para cada traço de concreto 12 corpos de prova, os quais são avaliadas a velocidade de propagação da onda em km/s, o desvio padrão de cada grupo e seu respectivo coeficiente de variação. A Tabela 16 apresenta os valores de velocidade de propagação de onda e seus respectivos desvios padrão, para os corpos de prova em cura úmida até 28 dias. Na Tabela 16 é possível notar que os desvios padrões são baixos, exceto para o traço pobre de substituição de 50%. O maior coeficiente de variação ocorreu no traço pobre de substituição de 50%, no qual o coeficiente foi de aproximadamente 21%. Excetuando esse dado, todos os demais desvios foram inferiores a 2,5%.

Tabela 16. Velocidade de propagação de onda com cura úmida até 28 dias

identificação	Traço rico (km/s)	Traço intermediário (km/s)	Traço pobre (km/s)
Referência	4,24 ± 0,04	4,09 ± 0,10	4,03 ± 0,06
Substituição 5%	4,41 ± 0,06	4,26 ± 0,05	4,31 ± 0,05
Substituição 10%	4,35 ± 0,03	4,28 ± 0,08	4,13 ± 0,08
Substituição 15%	4,31 ± 0,03	4,27 ± 0,02	4,24 ± 0,08
Substituição 20%	4,44 ± 0,06	4,33 ± 0,06	4,22 ± 0,04
Substituição 50%	4,25 ± 0,02	4,20 ± 0,07	2,52 ± 0,56
Substituição 75%	4,27 ± 0,05	4,20 ± 0,04	3,92 ± 0,06
Substituição 100%	4,22 ± 0,05	4,12 ± 0,05	3,59 ± 0,08

Fonte: o autor (2024)

Com relação a qualidade do concreto das amostras que passaram por cura úmida até os 28 dias, excetuando os traços pobres de substituição 50%, 75% e 100%, todos os demais tiveram qualidade classificada como muito boa, com base na Tabela 3 apresentada anteriormente. O traço com 75% ficou próximo ao nível de qualidade muito boa. O traço com 100% ficou com qualidade boa, porém próximo ao limite inferior para qualidade média. E o de 50%, com excesso de aditivo plastificante, ficou com qualidade fraca. Os três traços em questão podem ter sofrido com a lamelaridade do ARCO, visto que por um teor baixo de aglomerante, o concreto pode ter tido menos pasta cimentícia disponível para envolver os agregados graúdos, gerando problemas com adensamento e consequente qualidade final do concreto.

A Tabela 17 apresenta os valores de velocidade de onda e seu respectivo ultrassom para os corpos de prova cuja cura foram 21 dias de cura úmida, 3 dias em processo de secagem em estufa e outros 3 dias em análise de capilaridade. Os resultados possuem valores distintos e inferiores para as velocidades, demonstrando que o processo de cura influenciou na qualidade final do concreto. Dentre os traços, o de maior coeficiente de variação foi novamente o traço pobre de 50% de substituição com aproximadamente 22%. Excetuando esse valor, os demais todos ficaram inferiores a 6,2%.

A cura aos 28 dias gerou concretos de qualidade superior mas não afetou os desvios padrão, significando que não gerou maior variabilidade nos resultados, mas sim prejudicou o acabamento e qualidade do concreto.

Com relação a qualidade do concreto, para o traço rico apenas a substituição de 20% e 50% ficou com qualidade muito boa, sendo as demais de qualidade boa, conforme Tabela 17. Para o traço intermediário, apenas o traço com substituição de 5% ficou com qualidade fraca, porém estando no limite para qualidade média. Os demais traços intermediários todos ficaram em qualidade boa. Já para o traço pobre, a variação foi mais notada. Apenas os traços com substituição 10%, 15% e 20% ficaram com qualidade boa. Os traços com 75% e 100% de substituição qualidade média. O traço de 5% de substituição ficou em limite da qualidade fraca para média e o traço de 50% de substituição, que foi o caso do uso aditivo de plastificante, ficou com qualidade muito fraca.

Tabela 17. Velocidade de propagação de onda com cura úmida até 21 dias e posterior secagem e realização de ensaio de absorção por capilaridade

identificação	Traço rico (km/s)	Traço intermediário (km/s)	Traço pobre (km/s)
Referência	3,92 ± 0,05	3,74 ± 0,06	3,43 ± 0,07
Substituição 5%	3,63 ± 0,11	2,99 ± 0,03	2,99 ± 0,06
Substituição 10%	3,99 ± 0,04	3,81 ± 0,04	3,72 ± 0,07
Substituição 15%	3,93 ± 0,02	3,63 ± 0,08	3,74 ± 0,04
Substituição 20%	4,05 ± 0,07	3,69 ± 0,05	3,81 ± 0,03
Substituição 50%	4,00 ± 0,04	3,74 ± 0,05	1,22 ± 0,26
Substituição 75%	3,89 ± 0,04	3,74 ± 0,08	3,45 ± 0,11
Substituição 100%	3,71 ± 0,03	3,63 ± 0,05	3,07 ± 0,04

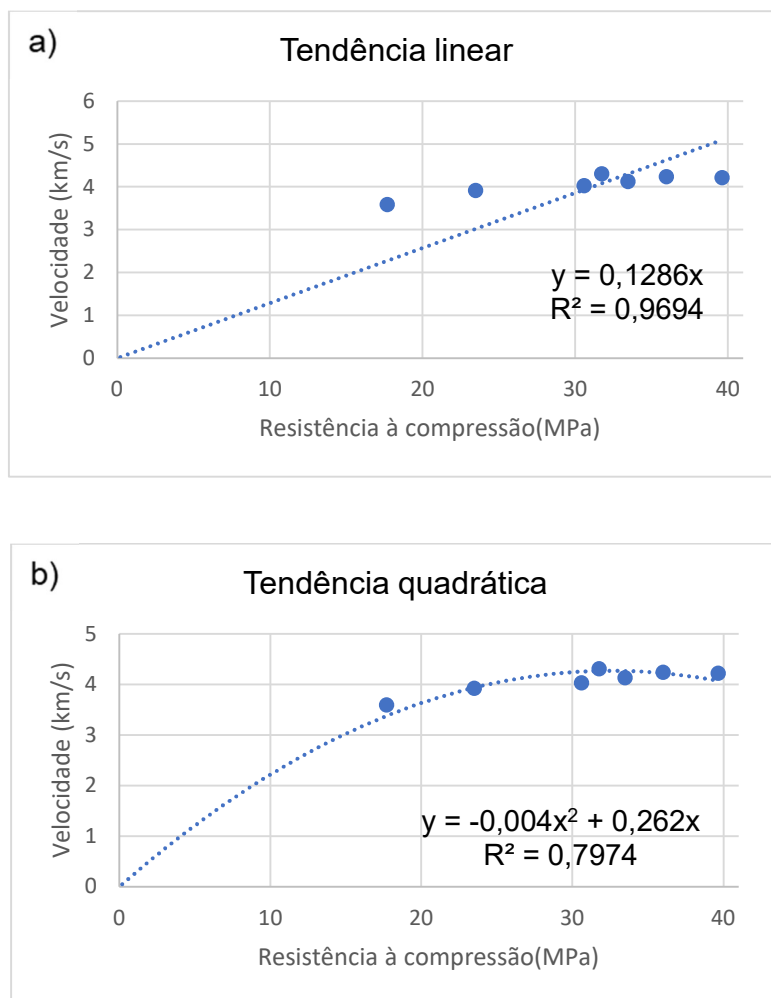
Fonte: o autor (2024)

A correlação entre a resistência à compressão e a velocidade de pulso ultrassônico não gerou relações estatisticamente significantes. Foram testados ajustes exponencial, logarítmico, linear, polinomia grau 2, polinomial grau 3 e polinomial grau 4, porém a conclusão é de que a velocidade do pulso ultrassônico e a resistência a compressão se dá de forma aleatória.

Para o traço pobre, ao realizar a retirada do dado de substituição com uso excessivo de aditivo, gera-se dispersão de pontos que pode ser ajustada com uma função linear com R^2 de 0,9694 ou função polinomial de grau 2, com R^2 de 0,7974. Porém, como a tendência não é notada para os outros traços, é

necessário que seja aprofundado o estudo nesse caso para obtenção de dados que confirmem a tendência apresentada na Figura 21.

Figura 21. Correlação entre velocidade de pulso ultrassônico e resistência a compressão para traços pobres a) com ajuste linear b) com ajuste quadrático



Fonte: o autor (2024)

A qualidade do concreto também pode ser avaliada com relação ao slump relacionado. Foi avaliada graficamente a tendência linear, exponencial ou logarítima para os três traços. Na Tabela 18 estão os ajustes para cada caso. O caso que possui ajuste melhor está no traço rico, porém, com valores de R^2 inferiores a 0,7. O significado deste comportamento infere que o ajuste não é interessante ao ponto de considerar uma linha de tendência para esses casos. Isso pode acontecer pois a lamelaridade do ARCO introduzido interfere de forma não tendenciosa em cada traço, especialmente nos traços pobres em função de pouca disponibilidade de aglomerado para a mistura.

Tabela 18. Ajuste Slump versus velocidade pulso ultrassônico

	R ² Traço rico	R ² traço intermediário	R ² Traço pobre
Linear	0,6954	0,432	0,0022
Exponencial	0,6976	0,4431	0,0022
Logarítmico	0,6946	0,4272	0,00003

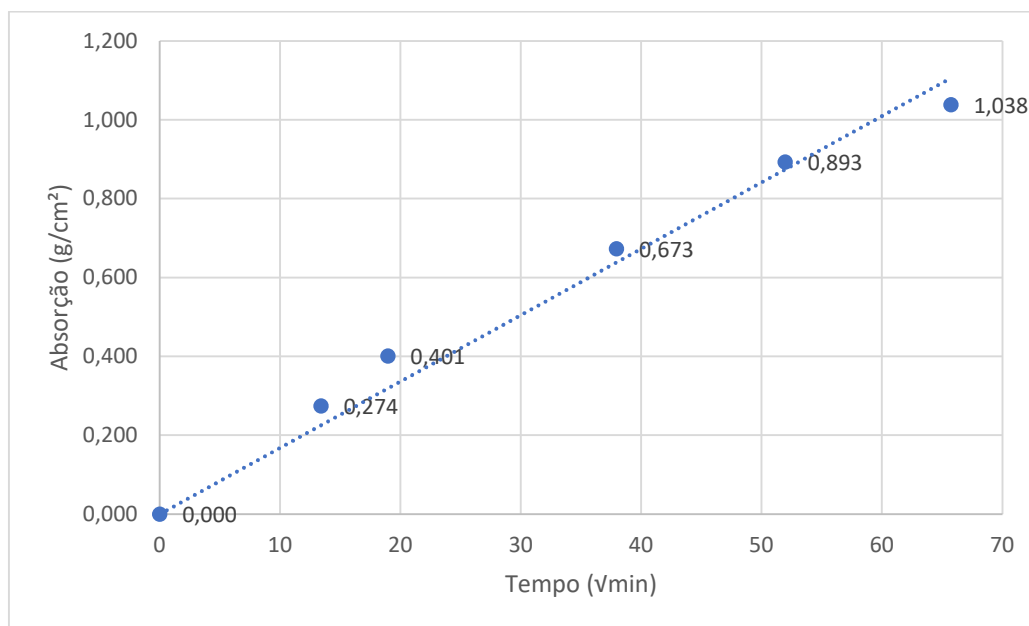
Fonte: o autor (2024)

4.7.2 Absorção por capilaridade

A absorção por capilaridade ocorre de modo que nos primeiros períodos do ensaio haja um crescimento acelerado da água absorvida pelo concreto que com o passar do tempo acaba por estabilizar-se. Como o ensaio tem duração de 72 horas, possivelmente o incremento de água absorvida a partir desse período de tempo seja baixo e limitado em função da força capilar. O método gráfico adotado, como citado anteriormente, está relacionado ao eixo do tempo ser transformado na raiz do tempo. Após a transformação do eixo no método gráfico, realiza-se aproximação linear, com avaliação de R².

Um exemplo de gráfico de traço intermediário de referência está na Figura 22. Nela o eixo vertical está em g/cm² e o eixo horizontal está em $\sqrt{min}$. É possível notar que nas primeiras 6 horas de ensaio (360 minutos ou $18,93 \sqrt{min}$) a velocidade de absorção é ligeiramente superior ao trecho subsequente, por meio da análise da inclinação dos dados. O valor máximo alcançado encontra-se em 72 horas (4320 minutos ou $65,73 \sqrt{min}$). Pontos importantes a serem notados são: a velocidade de absorção nessas 6 horas iniciais, visto sua possibilidade de absorção mais acelerada dependendo da dosagem de concreto; O valor de absorção máxima alcançado pelo traço, representando maior ou menor quantidade absorvida em situação próxima a estabilização; e a tendência de comportamento do concreto no decorrer de todo ensaio por meio da regressão linear após mudança de eixo, visto que a tendência é que a força capilar e a força gravitacional se igualem, parando então a ascensão capilar.

Figura 22. Absorção por capilaridade em traço intermediário de referência

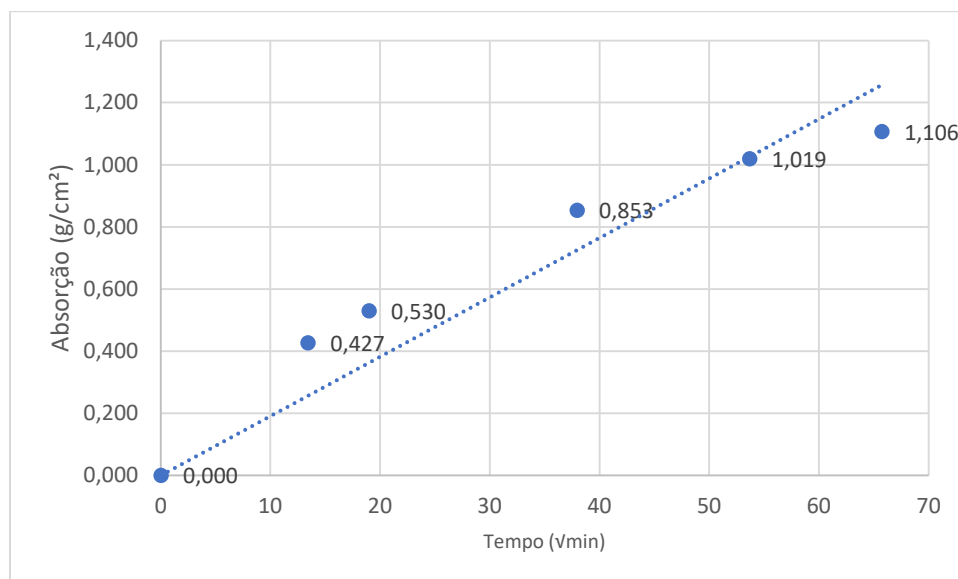


Fonte: O autor (2024)

Para o exemplo em questão, traço intermediário de referência, com 6 horas de ensaio havia absorvido aproximadamente 38,63% da máxima absorção em ensaio. Esse percentual pode representar que para alguns traços a absorção inicial de água seja mais acelerada do que para outros. Passadas as primeiras 6 horas (360 minutos ou $18,93 \sqrt{\text{min}}$) a tendência de crescimento acontece em velocidade inferior ao trecho anterior, indicando a estabilização mencionada anteriormente. Para o traço apresentado, a equação da reta foi $y = 0,0168x$ com $R^2 = 0,9941$, representando um ajuste ótimo da linha de tendência.

Já na Figura 23, é possível notar uma equação de reta de inclinação superior, com valor de absorção máxima superior também. A reta está com ajuste um pouco menos preciso, porém ainda acima de 0,95. O valor de R^2 é 0,9700. Porém, a principal diferença entre ambos os traços está no fato das 6 horas iniciais de ensaio terem absorvido aproximadamente 47,92%. Em comparação aos 38,63% do traço de referência, é possível notar que a substituição de 100% do agregado graúdo gerou uma tendência de acelerar o processo inicial de absorção, alcançando valores próximos a 50% em período de tempo menor. Utilizando a linha de tendência, o traço referência leva em torno de 16 horas para atingir 50% da absorção máxima do ensaio, enquanto o traço com 100% de substituição leva 14 horas.

Figura 23. Absorção por capilaridade em traço intermediário com substituição de 100%



Fonte: o autor (2024)

A Tabela 19 mostra os resultados de absorção por capilaridade para todos os traços, os gráficos estão todos no anexo A1.

A apresentação dos dados foi dividida entre os traços ricos, intermediários e pobres a fim de comparar a consequência da substituição dos agregados graúdos. Para o traço rico, é possível notar que a partir de 20% de substituição, em 6 horas o corpo de prova já havia absorvido mais de 40% do máximo absorvido em 72 horas. Esse valor chega ao máximo de 49,5% para o traço de 75% de substituição. Para o traço intermediário, os valores de máximo foram alcançados no traço com 50% e 100% de substituição. Para o traço pobre, o máximo foi na substituição de 50%.

O maior impacto sofrido com relação a absorção está presente nos traços com maior presença de cimento (traços ricos). Segundo Li et al (2023), a consequência de adição de um material pode alterar a proporção de poros internos e as estruturas dos poros em função de graduação dos materiais. O autor também menciona que a velocidade de saturação da absorção está relacionada ao conteúdo das vazios capilares e sua estrutura de porosidade. Além disso, o fator a/c também interfere na absorção de água, visto que poros com dimensões superiores aos capilares podem ser observados. Dessa maneira, visto que os traços ricos são os de menor fator água/cimento, o uso de

ARCO muda a proporção de poros internos e, conseqüentemente, interfere de forma mais notória a velocidade de absorção da água.

Tabela 19. Dados absorção por capilaridade

Nomenciatura	Equação da reta	R ²	Valor 6 horas	Valor 72 horas	6horas/72 horas (%)
R4	y = 0,0179x	0,9934	0,43	1,1	39,1
S54	y = 0,0189x	0,9943	0,43	1,16	37,1
S104	y = 0,0221x	0,9939	0,51	1,36	37,5
S154	y = 0,0185x	0,9942	0,42	1,14	36,8
S204	y = 0,0167x	0,9768	0,45	0,98	45,9
S504	y = 0,0141x	0,9773	0,39	0,83	47,0
S754	y = 0,0175x	0,9698	0,50	1,01	49,5
S1004	y = 0,0213x	0,9825	0,55	1,27	43,3
R5	y = 0,0168x	0,9941	0,40	1,04	38,5
S55	y = 0,0225x	0,9945	0,51	1,39	36,7
S105	y = 0,0229x	0,9918	0,54	1,40	38,6
S155	y = 0,0249x	0,9968	0,54	1,55	34,8
S205	y = 0,0172x	0,9976	0,36	1,09	33,0
S505	y = 0,0186x	0,9826	0,48	1,11	43,2
S755	y = 0,0199x	0,9980	0,46	1,21	38,0
S1005	y = 0,0191x	0,9722	0,53	1,11	47,7
R6	y = 0,176x	0,9939	0,41	1,08	38,0
S56	y = 0,0196x	0,9952	0,51	1,39	36,7
S106	y = 0,0184x	0,9973	0,39	1,15	33,9
S156	y = 0,0178x	0,9967	0,39	1,12	34,8
S206	y = 0,0169x	0,9955	0,37	1,06	34,9
S506	y = 0,0118x	0,9543	0,36	0,67	53,7
S756	y = 0,018x	0,9907	0,43	1,10	39,1
S1006	y = 0,018x	0,9903	0,43	1,09	39,4

Fonte: o autor (2024)

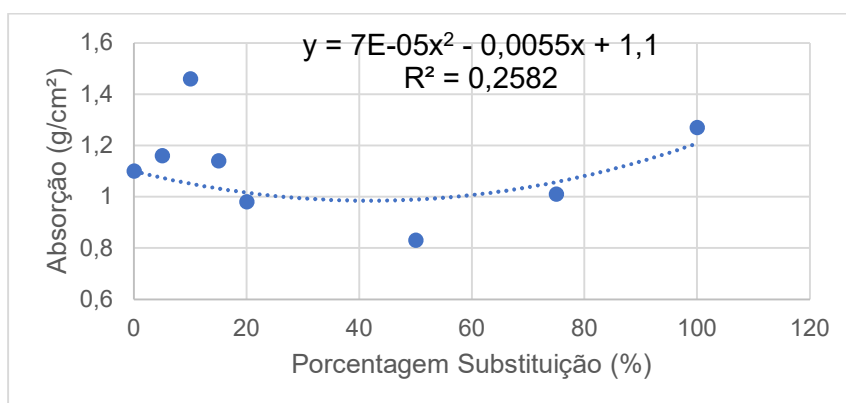
A correlação dos dados de absorção por capilaridade, através da utilização de linha de tendência quadrática e não somente linear, em alguns casos gerou valores de R² superiores. Porém, devido ao fato de que os valores de R² estão em nível de confiabilidade acima de 0,95, a utilização de da tendência linear foi adotada como suficiente visto sua proximidade com o método para concretos convencionais com agregados naturais.

Com relação aos valores máximos de absorção por cm^2 de área, os valores de absorção máxima não possuem uma tendência de aumento ou diminuição do valor máximo que possa ser afirmada. As maiores inclinações das retas de tendência ocorreram para substituição de 15% no traço intermediário. Em contrapartida, a menor inclinação houve em traço pobre de 50% de substituição. Como não há tendência notada, esses valores em estudos futuros devem ser avaliados com maior volume de estudos.

Além disso, a regressão linear possuiu R^2 em todos os casos superior a 0,95, demonstrando que a tendência possui forte relação com os dados. Dentre os 24 traços, 17 deles possuíram R^2 superior a 0,99, o que representa regressão linear mais próxima dos dados ainda. Dessa forma, o uso do método de regressão, com eixo do tempo transformado em raiz de tempo, para os dados avaliados, também é válido para os casos de substituição de agregado graúdo por ARCO.

O impacto da porosidade possui uma tendência semelhante mesmo em diferentes proporções aglomerante/agregado. Há uma tendência do aumento da quantidade total de água absorvida no concreto que ocorre entre 0% e 20%. Após alcançado o valor máximo dos dados, sua absorção máxima varia conforme Figura 24. De modo análogo ao mencionado anteriormente, novamente a influencia está vinculada a questão do desgaste do agregado reciclado no misturador e sua conseqüente melhora no empacotamento. É possível notar que para os traços ricos, a absorção máxima ocorre com 10% e a mínima com 50%. Isso pode representar o fato de que ao iniciar as substituições em função da força capilar aumenta em função da presença de uma pequena quantidade de poros que representa facilidade de passagem para a água. Quando essa presença de poros começa a aumentar, a força capilar reduz em função do aumento significativo da distância entre materiais sólidos internamente ao concreto.

Figura 24. Porcentagem com quantidade máxima absorvida - traço rico



Fonte: o autor (2024)

Para os traços intermediários, o máximo ocorre aos 15% enquanto o mínimo ocorre no traço referência, com valor de 1,04 g/cm². Porém aos 50% de substituição, o valor é de 1,09 g/cm², representando valor próximo ao mínimo. De modo semelhante, para o traço pobre o máximo ocorre com 5% de substituição e o mínimo com 50% de substituição.

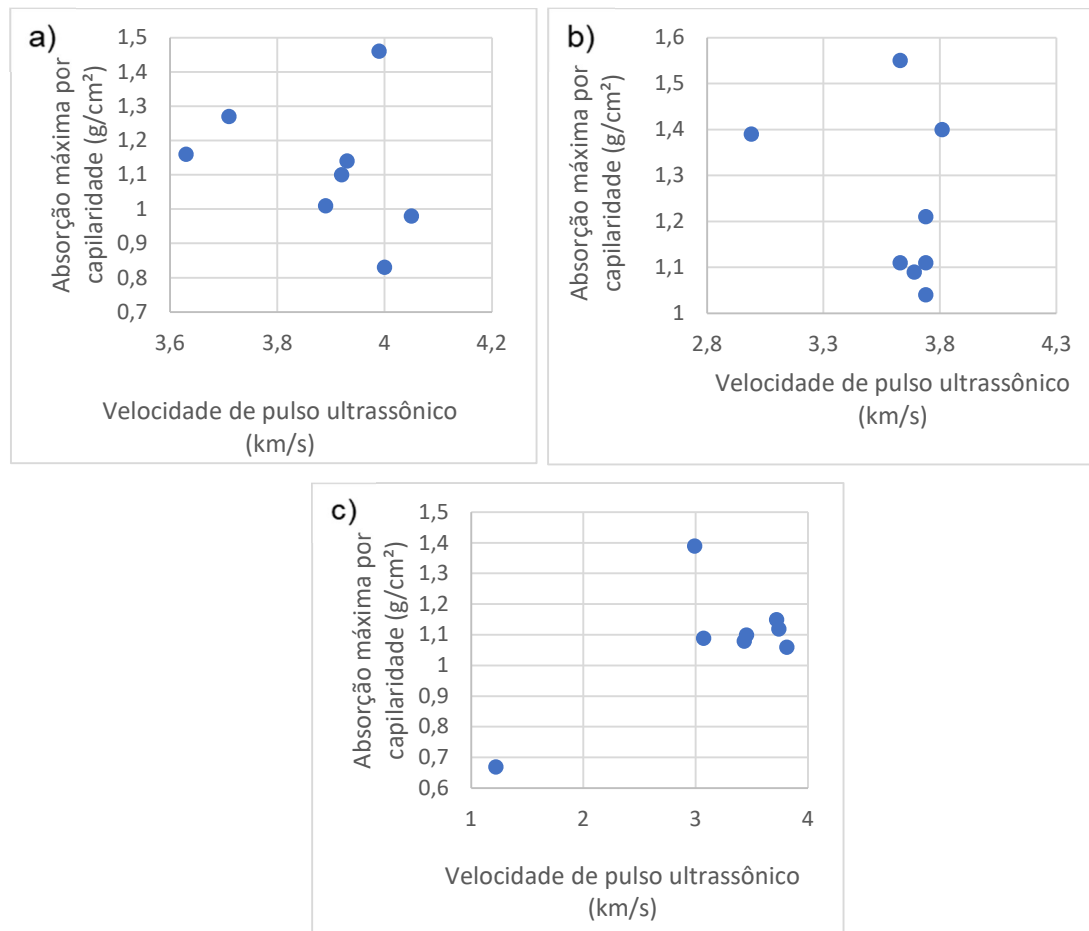
Esse aumento na proporção de poros não obrigatoriamente significa redução na resistência mecânica do concreto. Utilizando o traço de substituição de 5% para os traços pobres, é visto que apesar de aumentar a quantidade de poros mediante a substituição de 5%, a resistência mecânica à compressão aumentou de 30,59 MPa para 31,75 MPa. Mesmo que esse valor possa ser advindo de outras alterações como adensamento ou algo relacionado a influencia positiva de uma pequena parcela de agregados graúdos lamelares, o resultado não trouxe a obrigatoriedade de redução de resistência.

Além disso, o aumento de poros para o traço pobre, com 20% de substituição, não representou acréscimo na capilaridade, visto que a força capilar não depende somente da quantidade de poros, mas sim seu tamanho e distribuição. Esse traço possuiu um acréscimo considerável de resistência mecânica a compressão uniaxial em comparação ao traço referência, subindo de 30,59 MPa para 39,64 MPa.

A tentativa de correlação entre velocidade de pulso ultrassônico não gerou ajustes de retas ou curvas com valor de R^2 razoáveis. A dispersão dos dados estão na Figura 25 a, b e c. É possível notar que em nenhum dos três traços houve correlação. Apesar da velocidade do pulso ultrassônico estar ligada aos

poros, e que quanto maior a porcentagem de ARCO maior a quantidade de poros, o valor de absorção por área não possui relação inversamente proporcional a quantidade de poros.

Figura 25. Correlação entre absorção por capilaridade e velocidade de pulso ultrassônico. a) traço rico b) traço intermediário c) traço pobre



Fonte: o autor (2024)

4.7.3 Carbonatação

Segundo Ribeiro, Silva e Dias (2023), havendo concretos sujeitos à carbonatação, uma possibilidade de melhores resultados para o concreto é utilizando uma gradação funcional, modificando diretamente a porosidade do concreto e seu desempenho frente à durabilidade. O autor também menciona que a carbonatação é influenciada pela relação a/c. Quanto maior a relação a/c, maior a profundidade de carbonatação. Os dados estão na Tabela 20.

Tabela 20. Resultados dos ensaios de carbonatação acelerada

Nomenclatura	Slump (mm)	Profundidade média (mm)	Profundidade máxima (mm)	Segunda profundidade máxima (mm)
R4	162	3,3	7	6
S54	176	3,1	5,5	4,5
S104	161	3,5	7	5
S154	168	3,3	5	5
S204	178	3,0	5	5
S504	141	1,9	4	4
S754	149	1,7	4	4
S1004	150	1,9	4	3
R5	157	8,1	12	12
S55	162	7,3	9	9
S105	165	6,5	9	8
S155	163	8,7	13	12
S205	165	10,4	18	18
S505	145	6,2	11	11
S755	142	1,9	5	4
S1005	140	6,0	14	11
R6	141	9,7	13	12
S56	144	7,0	9	9
S106	158	8,3	11	11
S156	143	4,4	7	7
S206	144	5,4	12	11
S506	141	3,5	7	6
S756	152	8,7	16	15
S1006	179	5,1	13	10

Fonte: o autor (2024)

Para a situação de carbonatação e consequentemente cobrimento em estruturas de concreto, mais importante do que a média das profundidades, é o valor máximo alcançado pela carbonatação. Dessa forma, é notada que para os traços ricos, a profundidade de carbonatação não foram superiores a 10 mm. Em uma situação de cobrimento de 25mm (classe de agressividade ambiental I para

pilares e vigas ou classe de agressividade ambiental II para lajes), nenhum dos traços ricos teria problema com carbonatação, visto que sua profundidade foram inferiores a 40% do cobrimento adotado. Entre os próprios traços ricos, as maiores substituições não foram os valores mais altos e relevantes, mostrando que para os dados ensaiados, a substituição nesse traço não gerou aumento dessa profundidade carbonatada.

Já para os traços intermediário e pobre, a média de carbonatação para cada grupo de dados, é de aproximadamente 11 mm, sendo o valor máximo observado para o traço intermediário igual a 18mm e para o traço pobre igual a 16 mm. Ambas as situações de máximo ocorrem em traços com substituição (75 e 20% respectivamente), o que significa que a profundidade carbonatada torna-se próxima ao valor de cobrimento de cada peça específica. Além disso, as condições de avaliação tecidas acima são em situação de classe de agressividade ambiental especificada anteriormente, portanto, se outras classes forem consideradas, o nível de agressividade pode ser diferente, como uma classe de agressividade ambiental IV em pilares e vigas onde o cobrimento deve ser de 50mm.

O caso de carbonatação diferente do padrão foi o traço S506, cujo problema foi o excesso de aditivo e consequentemente adensamento insuficiente. Nesse caso, a presença de problemas de adensamento conforme Figura 26 a e b, gerou carbonatação diferenciada. Na figura 26a demonstra adensamento adequado e carbonatação padrão. A figura 26b mostra adensamento inadequado e consequente carbonatação despadronizada.

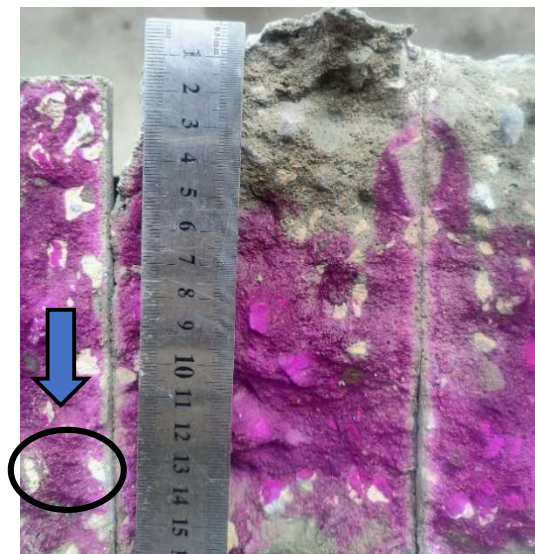
Figura 26. Carbonatação em padrão convencional, do traço S205



Fonte: o autor (2024)

O padrão desconfigurado pode ter sido em função de problema de adensamento ou “buraco” com entrada facilitada de gás carbônico. A Figura 27 mostra em detalhe um dos corpos de prova e sua profundidade de carbonatação de topo, comportamento incomum comparado aos demais ensaios de carbonatação. Na mesma figura é possível notar que no ponto marcado circularmente que a proximidade entre os dois grãos pode gerar uma frente de carbonatação de valor maior se comparado aos valores apresentados anteriormente.

Figura 27. Profundidade incomum de carbonatação de topo



Fonte: o autor (2024)

Além disso, a carbonatação está vinculada a questão de porosidade do concreto. Porém, essa porosidade depende de quão poroso está a frente “atacada” pelo gás carbônico. Como os corpos de provas são mensurados a carbonatação em sua superfície lateral, a presença ou não de ARCO nas bordas torna o material mais ou menos suscetível a carbonatação. Na Figura 28 está representado três corpos de provas carbonatados de substituição de 100% em traço intermediário. É possível notar, através das elipses que circundam alguns elementos que muitos grãos próximos a borda estão carbonatados. Esses grãos seriam frentes de entrada de gás carbônico para possíveis ataques às armaduras.

Figura 28. ARCO carbonatados



Fonte: o autor (2024)

Além disso, apesar das profundidades médias terem se alterado de forma mais significativa em apenas alguns concretos, a presença de ARCO torna o concreto como um todo mais poroso. Essa porosidade, dependendo de como a mistura fica em sua superfície, gera uma superfície de suscetibilidade à carbonatação que os valores médios e máximos podem não representar adequadamente.

4.8 DIAGRAMAS MÉTODO IPT/EPUSP

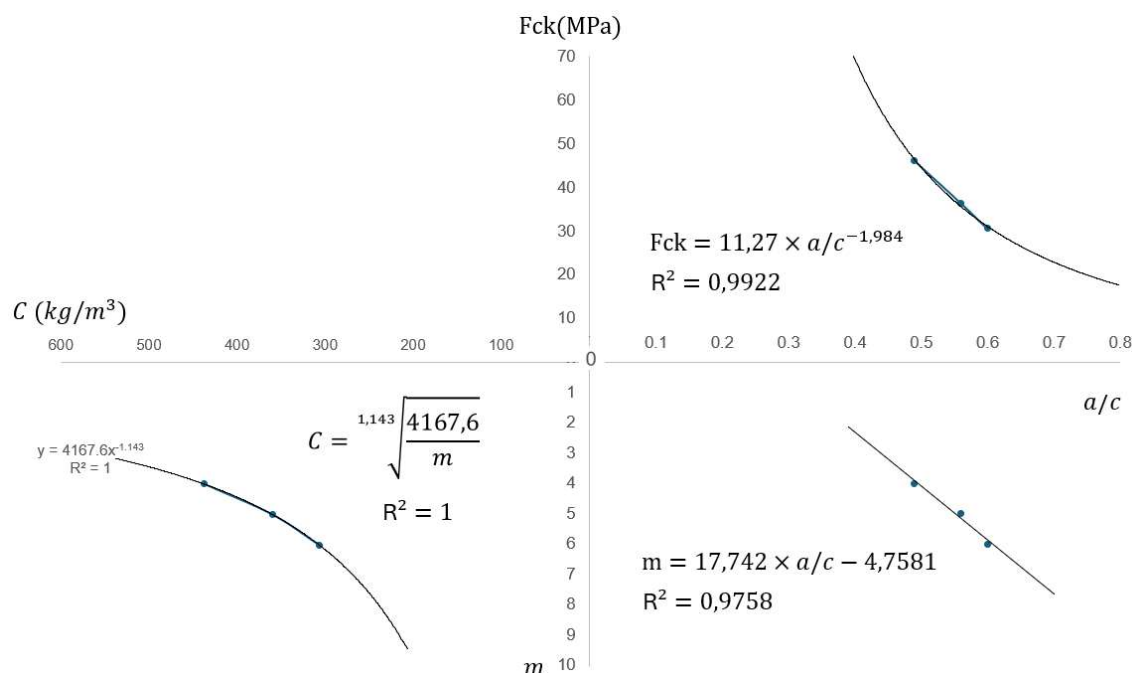
O resultado da utilização de três traços, com diferentes proporções de agregados, faz com que seja possível gerar um diagrama de dosagem de concreto no qual é possível, através de uma variável desejada, encontrar as demais informações. De modo geral, por exemplo, a informação inicial de projeto

é a resistência desejada do concreto. Partindo desse início, é possível com a resistência e o diagrama gerado, calcular qual o fator a/c necessário, com a respectiva proporção de materiais (m) e consequentemente o consumo de cimento daquele concreto em questão. Para concretos sem substituição por agregados reciclados, o R^2 da reta e das curvas encontradas, possuem ótimo ajuste. Porém, ao adicionar agregados, algumas características são alteradas.

No trabalho, como o ARCO era colocado substituindo proporção de agregado gráúdo natural, a proporção m não alterava. Dessa maneira, para todos os traços em questão, a reta m , calculada mediante ajuste entre os três pontos calculados, foi igual. A reta que relaciona a proporção de agregados e o fator água cimento é $m = 17,742 \times \left(\frac{a}{c}\right) - 4,7581$, com ajuste R^2 0,9758. Caso o fator a/c tivesse sido alterado sem a utilização de aditivo plastificante, a reta m possivelmente teria melhor ajuste. Mas o significado físico para uso do agregado como substituto em concretos estruturais não seria adequado.

Cada traço gera um diagrama de dosagem, no qual é possível correlacionar resistência, fator a/c , proporção de agregados e consumo de cimento, conforme Figura 29. Na figura está representado o traço de referência e é possível, com a utilização da informação de resistência (necessária definição para projetos estruturais), averiguar os demais parâmetros para a dosagem desejada. Por exemplo, deseja-se uma resistência de 40MPa para o traço referência. Com essa informação, inicia-se a utilização da dosagem através do quadrante direito superior. Por meio da equação do quadrante, é calculado o valor de a/c para o traço, que nesse caso, fica em 0,528 ou aproximadamente 0,53. Passa-se ao quadrante direito inferior e calcula-se o valor da proporção de agregados m . Para o traço em questão, com 0,53, o m fica aproximadamente 4,65. Com a taxa de argamassa já mencionada anteriormente de 60%, é possível calcular a proporção de agregado gráúdo e agregado miúdo. Além disso, tendo o valor de m é possível calcular o consumo de cimento por meio do quadrante inferior esquerdo utilizando a equação, gerando consumo de cimento de equação 382,87 kg/m³. Assim concluindo a definição do traço com os materiais em questão e o traço de referência. O mesmo pode ser feito para os demais diagramas dos demais traços. Todos os diagramas para todos os traços encontram-se no Anexo A2.

Figura 29. Curvas de dosagem para o traço referência



Fonte: o autor (2024)

Outras duas curvas são geradas na dosagem, uma sendo Consumo de cimento relacionado a proporção de agregados e outra resistência à compressão e fator a/c . Na Tabela 21 estão todos os traços, a equação de suas respectivas curvas e os ajustes R^2 . É possível notar que todas as curvas de consumo de cimento tiveram ótimo ajuste, visto que a proporção de agregados se manteve a mesma para todos os traços. Nesse caso, o consumo de cimento acaba por depender especialmente do peso específico da amostra, que anteriormente mencionado não possuiu variações tão expressivas de modo geral. Com a curva de consumo de cimento é possível averiguar se, para diferentes classes de agressividade ambiental, o consumo de cimento mínimo perante norma é alcançado. Também é possível averiguar que as curvas de resistência possuem ajustes bem distintos. O concreto referência é esperado que possua um ajuste excelente visto que o método de dosagem é para concretos convencionais. Porém, apenas os traços com substituição de 5% e 10% possuíam R^2 acima de 0,95. O pior dos ajustes está no traço de 20% de substituição. Isso ocorreu em função da resistência do traço pobre ter sido muito próxima do valor de resistência do traço rico.

Tabela 21. Curvas e ajustes para consumo de cimento e resistência

Nomenclatura	Consumo Cimento (kg/m³)	R² consumo de cimento	Resistência (MPa)	R² resistência
R	$C = \sqrt[1,143]{\frac{4167,6}{m}}$	1	$11,27(a/c)^{-1,984}$	0,9922
S5	$C = \sqrt[1,092]{\frac{3108,4}{m}}$	0,9997	$15,033(a/c)^{-1,442}$	0,9921
S10	$C = \sqrt[1,13]{\frac{3891,9}{m}}$	0,9995	$16,976(a/c)^{-1,295}$	0,9756
S15	$C = \sqrt[1,157]{\frac{4549,6}{m}}$	0,9999	$19,508(a/c)^{-1,101}$	0,7826
S20	$C = \sqrt[1,144]{\frac{4233,1}{m}}$	0,9992	$33,207(a/c)^{-0,237}$	0,1055
S50	$C = \sqrt[1,14]{\frac{4044,7}{m}}$	0,9998	$2,744(a/c)^{-3,957}$	0,7083
S75	$C = \sqrt[1,033]{\frac{2108,8}{m}}$	0,9929	$8,458(a/c)^{-2,259}$	0,5917
S100	$C = \sqrt[0,993]{\frac{1634,5}{m}}$	0,9893	$4,952(a/c)^{-2,724}$	0,7493

Fonte: o autor (2024)

O ajuste de R² baixo não significa que o concreto não esteja com resultado válido para uso. Significa que a curva de ajuste, daquelas informações que são a resistência vinculada ao fator a/c podem possuir uma outra tendência de variação ou uma não correlação direta de variação com um ajuste matemático sem significado físico. Dessa maneira, para utilização das curvas de consumo de cimento, são necessários mais estudos que confirmem outro formato de tendência ou que seja necessária a avaliação mais minuciosa de um traço específico com aprofundamento superior para a dosagem.

Por meio dos diagramas de dosagem é possível realizar a averiguação de condições para concretos estruturais por meio de fator a/c máximo de 0,6, consumo de cimento superior a 280 kg/m³ e resistência superior a 20MPa.

Dependendo das condições e classes de agressividade ambiental esses parâmetros são alterados podendo ser conferidos e ajustados pelas curvas de resistência para o traço com seu respectivo percentual de substituição de agregado graúdo. Conforme Tabela 22, é possível notar os valores de consumo mínimo de cimento para cada traço com relação a sua resistência mínima de 20MPa. Apenas no traço de substituição de 50% e 100%, levando em consideração um consumo mínimo de 280 kg/m³, o valor de resistência mínimo, o valor de consumo mínimo e o fator a/c máximo são alcançados concomitantemente. Porém, visto a proximidade dos valores de referência normativos, é necessário atenção com relação a utilização de um traço tão próximo aos limites. Para todos os traços, o fator a/c limitante a 0,6 gera situações de concretos estruturais com resistência superior aos 20MPa e consequente consumo de cimento superior aos 280 kg. Dessa maneira, pelos diagramas é possível notar que para todos os 8 traços ensaiados, é possível alcançar concretos de características estruturais, devendo cada um deles serem avaliados individualmente com relação aos demais fatores já analisados.

Tabela 22. Valores mínimos de resistência, consumo de cimento e fator a/c

Nomenclatura	a/c para Fck 20 MPa	Consumo de cimento para 20MPa	Fck para consumo de cimento de 280 kg	Fck com a/c 0,60
R	0,75	224,75	27,06	31,05
S5	0,82	195,42	28,56	31,40
S10	0,88	182,24	29,97	32,89
S15	0,98	162,06	31,54	34,23
S20	8,5	18,97	36,81	37,48
S50	0.60	300,10	16,25	20,71
S75	0,68	240,84	24,86	26,82
S100	0,60	288,87	19,00	19,91

Fonte: o autor (2024)

4.9 ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂

Segundo Costa (2012) é possível gerar uma estimativa quanto a emissão de CO₂ na construção civil mediante fator de conversão, que está de acordo com

legislação brasileira, levando em consideração especificidades dos materiais, extração das matérias-primas, fabricação, transporte dos produtos e métodos construtivos e de manuseio e, por fim, geração de resíduos. Para os agregados graúdos, o fator de conversão é de 0,0858 toneladas de gás carbônico para cada tonelada de agregado graúdo produzido.

O autor avaliou diversos elementos e métodos construtivos da construção civil, porém, não há esse fator para os agregados reciclados de concreto. Dessa forma, visto que a rebitagem e reutilização dos agregados deve ocorrer dentro do espaço físico da própria usina, o processo de emissão de CO₂, com o intuito comparativo, será considerado de zero emissão, uma vez que dependerá também do tipo de triturador utilizado e da matriz local para geração de energia elétrica.

Supondo o quantitativo de 1000 toneladas de agregados graúdos utilizados mensalmente em uma central dosadora de concreto, a quantidade total de CO₂ emitida na atmosfera seria igual a 85,8 toneladas segundo os dados de Costa (2012), assim a Tabela 23 mostra o comparativo de quanto gás carbônico é evitado ao utilizar agregados reciclados de concreto em comparação ao agregado graúdo natural segundo as diferentes porcentagens de substituições propostas neste trabalho.

Tabela 23. Exemplo de emissão de CO₂ em agregados graúdos

Percentual de substituição	Quantidade de CO ₂ emitido (ton)	Quantidade de CO ₂ reduzido (ton)
0%	85,80	0,0
5%	81,51	4,29
10%	77,22	8,58
15%	72,93	12,87
20%	68,64	17,16
50%	42,90	42,90
75%	21,45	64,35
100%	0,0	85,8

Fonte: o autor (2024)

Os dados mostrados na Tabela 23 fornecem um exemplo da redução de CO₂ na atmosfera para cada 1000 toneladas de agregados reciclados substituindo a brita. Neste ponto, considerando as propriedades do concreto em estado fresco e endurecido, é possível notar que uma substituição de até 50% leva a uma redução expressiva nos níveis de emissão de CO₂ e, ao mesmo tempo, sem grandes prejuízos à trabalhabilidade e resistência à compressão de concretos com substituição parcial por ARCO, considerando um traço rico. Em outras palavras, concretos com traço rico e intermediário e substituição de 50% por ARCO apresentaram um decréscimo de 13% no slump, inserção de 0,3% de aditivo e uma variação de resistência de aproximadamente 9%, podendo reduzir as emissões de CO₂ em quase 43 toneladas a partir do emprego de uma tonelada de agregados graúdos totais.

Além disso, considerando dados da Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção – ANEPAC (2023), o Brasil consumiu em 2022, algo em torno de 266 Milhões de toneladas de brita. Assim, considerando uma taxa de substituição de 50%, a quantidade total de CO₂ que deixaria de ser emitida na atmosfera por meio da adoção de ARCO seria igual a 11,4 milhões de toneladas, o que reforça ainda mais a justificativa e o apelo ambiental que trata a emissão de substituição de agregados naturais por ARCO.

Outra perspectiva importante que deve ser ressaltada é com relação a quantidade de resíduos de concreto que são destinados à aterros sanitários sem nenhum tratamento. Grandisoli (2024) afirma que o Brasil gerou em 2021, cerca de 48 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição, o uso destes agregados reciclados contribui não somente para reduzir as emissões de gases na atmosfera, mas também para reduzir a quantidade de materiais dispostos em aterros sanitários. Neste ponto, considerando o consumo de agregados graúdos no Brasil e a quantidade de resíduos gerados, é possível que a quase totalidade dos resíduos de concreto de centrais dosadoras tenha potencial de ser utilizado na própria indústria por meio da substituição de agregados naturais por ARCO.

5. CONCLUSÕES

Este estudo, com diferentes dosagens de concreto e respectivos resultados alcançados possibilita a análise comparativa entre ensaios mecânicos e de durabilidade para diferentes proporções de agregados e diferentes proporções de substituições de agregados graúdos naturais por agregados reciclados de concreto. A primeira avaliação feita, com relação a sua viabilidade como concreto estrutural, perante premissas normativas, é de que os concretos com todas as substituições realizadas alcançam resistência mínima de 20MPa, com consumo de cimento superior a 280 kg/m³ e fator a/c máximo de 0,6. Para os concretos com maiores teores de substituição, isso ocorre com proporções de agregados menores. Já para os demais traços em todas as proporções de agregados ensaiadas (m=4, m=5 e m=6).

Além disso, a avaliação estrutural não pode ficar restrita a somente parâmetros de resistência mecânica a compressão uniaxial, consumo de cimento e fator a/c. Os concretos utilizados com substituição de 5% e 10%, ao avaliar o diagrama de dosagem, possuíram comportamentos semelhantes aos concretos convencionais, com valores de R² de ordem boa de confiabilidade. Isso mostra a possibilidade de reutilização de agregados graúdos de concreto com variações aceitáveis dentro de concretos estruturais.

Outro aspecto está no fato de que todos os níveis de substituições possuíram características com relação durabilidade e ensaios mecânicos, que são difíceis de serem correlacionadas linearmente através de proporções direta ou inversamente proporcionais de considerações. Por exemplo, comparar a substituição de 10% de agregados graúdos naturais com a substituição de 20% não gera uma variação linear entre as grandezas. É notada variações em cada traço de concreto porém para um uso estrutural em larga escala, é necessário estudos mais aprofundados para dosagens de concreto mais específicas. Não podendo ser generalizadas relações entre aumento de uma proporção e decréscimo de outra característica. Há então uma gama de traços que podem ser desenvolvidos mais aprofundados, avaliados impactos específicos para cada caso e estudo de possíveis soluções para criar padrões de concretos estruturais com percentuais específicos de substituições.

A resistência mecânica a compressão foi afetada negativamente pela substituição de agregados graúdos, porém, não inviabilizou seu uso com relação

a esse ensaio. Em contrapartida, o ensaio de resistência mecânica a tração possuiu variações mais relevantes, devendo receber atenção especialmente com relação as questões de fissurações envolvidas, visto que pode ser frente de entrada para agentes agressivos às armaduras e consequentes ataques químicos.

Com relação aos benefícios ambientais, a viabilidade de substituição como concreto estrutural gera uma possibilidade de economia circular dentro da indústria da fabricação de concretos usinados. Uma parcela dos resíduos gerados por essa indústria pode então ser reutilizada apenas com adaptações físicas, como rebitagem. Alguns dos benefícios dessa prática estão relacionados a não necessidade de destinação de resíduos desse tipo, visto que são reutilizados dentro de própria localidade da indústria; redução da extração de matéria prima e seus respectivos impactos ambientais; redução de emissão de gás carbônico em função de transporte tanto de matéria prima, quanto de resíduos; e possível redução no uso de cimento e seus respectivos impactos ambientais negativos.

No aspecto da durabilidade, houveram alterações nos concretos dosados, porém não inviabilizaram a possibilidade para uso em concretos estruturais. Algumas dosagens possuíram maiores impactos na absorção de água e na carbonatação, gerando a necessidade de aprofundamento de estudos para possíveis adaptações de dosagens e redução dos impactos negativos da substituição, porém, foram resultados que não inviabilizaram a substituição do material. Tanto a absorção por capilaridade quanto a carbonatação possuíram variações com relação ao concreto referência, porém, sua relação de dependência está mais vinculada a questão de porosidade dos agregados reciclados do que do ao resultado final do concreto endurecido advindo da mistura.

Dessa maneira, a substituição de agregado natural graúdo por agregado reciclado de concreto é viável no aspecto estrutural, porém, há a necessidade de definições de dosagens específicas para avaliação aprofundada de consequências para cada caso. As faixas de porcentagem de substituição podem ser reduzidas a amplitude com o intuito de buscar uma porcentagem ótima de utilização para cada proporção de agregados, gerando então resultados mais específicos para alguns traços. Por exemplo, para traços ricos, pode-se

realizar a avaliação de 5% a 10%, variando percentualmente de um em um por cento, gerando um resultado com mais acurácia especificamente nessa proporção de agregados e nessa substituição. O mesmo pode ser feito para traços intermediários e pobres, buscando encontrar trechos mais restritos de substituição com características mecânicas e de durabilidade mais previsíveis.

A reutilização do agregado reciclado de concreto, dentro da própria central de concreto, gera uma redução significativa com relação ao CO₂ emitido no processo de fabricação e transporte, se comparado a extração do agregado graúdo natural. Por consequência, a quantidade de resíduos destinadas a aterros sanitários é reduzida, gerando uma gestão sustentável desses resíduos da construção civil. A intensidade da redução de CO₂ é progressiva de acordo com a porcentagem de substituição, sendo necessária a otimização em concordância com as propriedades mecânicas e de durabilidade. Esse tipo de substituição contribui com o intuito de mitigação de mudanças climáticas, buscando práticas mais sustentáveis no setor da construção.

REFERÊNCIAS

ALLEN, E.; IANO, J. **Fundamentos da engenharia de edificações: materiais e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

ALOTAIBI, S.; MARTINEZ-VAZQUEZ, P.; BANIOTOPOULOS, C. **Waste Generation Factors and Waste Minimisation in Construction**. In: UNGUREANU, V.; BRAGANÇA, L.; BANIOTOPOULOS, C.; ABDALLA, K. M. (eds). 4th International Conference "Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience" & Midterm Conference of CircularB "Implementation of Circular Economy in the Built Environment". CESARE 2024. Lecture Notes in Civil Engineering, v. 489, Springer, Cham, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-57800-7_51. Acesso em: 8 nov. 2024.

ALSHEYAB, M. A. T. **Recycling of construction and demolition waste and its impact on climate change and sustainable development**. International Journal of Environmental Science and Technology, v. 19, p. 2129–2138, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-021-03217-1>. Acesso em: 22 Ago 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM DO BRASIL - ABESC. **Manual do Concreto Dosado em Central**. São Paulo: ABESC, 2007. Disponível em: <https://abesc.org.br/assets/files/manual-cdc.pdf>. Acesso em: 10. Mar. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738:2016 Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211:2022 – Agregados para concreto – especificação**. Rio de Janeiro, ABNT, 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7212:2021, ABNT NBR 7212: Concreto dosado em central – Preparo, fornecimento e controle**. Rio de Janeiro: ABNT. 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222:2011, ABNT NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802:2019, ABNT NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro: ABNT 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953:2015 – Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9779:2012, ABNT NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro: ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9833:2008 Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655:2022 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento.** Rio de Janeiro, ABNT, 2022b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15112:2004 – Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, ABNT, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15113:2004 - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, ABNT, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15114:2004 – Resíduos sólidos da construção civil – áreas de reciclagem – diretrizes para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, ABNT, 2004c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116:2021 – Agregados reciclados para uso em argamassas de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, ABNT, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889:2020, ABNT NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro: ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054: 2022 Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2022c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2023. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 22 ago. 2024.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. Mercado. São Paulo. 2023. Disponível em: <https://anepac.org.br/mercado/#:~:text=Foi%20a%20chamada%20%E2%80%9CD%3%A9cada%20Perdida,se%20um%20crescimento%20de%203%25.%80%9CD%3%A9cada%20Perdida,se%20um%20crescimento%20de%203%25.> Acesso em: 30 Nov. 2024.

BALESTRA, C. E. T.; GARCEZ, L. R.; SILVA, L. C. da; VEIT, M. T.; JUBANSKI, E.; NAKANO, A. Y.; PIETROBELLI, M. H.; SCHNEIDER, R.; GIL, M. A. R. **Contribution to low-carbon cement studies: effects of silica fume, fly ash, sugarcane bagasse ash and acai stone ash incorporation in quaternary blended limestone-calcined clay cement concretes.** Environmental Development, v. 45, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221146452200094X>. Acesso em: 15 jun. 2024.

BALESTRA, C. E. T.; LIMA, M. G.; SILVA, A. R.; JUNIOR, R. A. M. **Corrosion degree effect on nominal and effective strengths of naturally corroded reinforcement.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 28, n. 10, 2016. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Corrosion-Degree-Effect-on-Nominal-and-Effective-of-Balestra-Lima/20a4ae72981b52ad6a2ba852e2f8212e3e2149f0>. Acesso em: 15 jun. 2024.

BIELA, M. V.; OLIVEIRA, C. E. de. **Substituição do agregado natural miúdo por agregado reciclado no concreto.** Cianorte: FACEC - Faculdade de Administração e Ciências Econômicas, 2023. Disponível em: <https://umfg.edu.br/2023/repositorio/wp-content/uploads/sites/7/2023/01/MILENA-VICENTE-BIELA.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2024.

BRASIL. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 307, de 5 de Julho de 2002.** Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988.** Brasília, DF: Presidência da República. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 15 dez. 2023.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos;** altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 15 dez. 2023.

BRASIL. **Relatório de atualização bienal do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. 4. ed. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://repositorio.mctic.gov.br/handle/mctic/4312>. Acesso em: jun. 2023.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Desempenho da construção civil em 2022 e perspectivas para 2023**. Dez. 2022. Disponível em: <https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2022/12/panorama-construcao-dez-2022-final.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2023.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **CBIC reforça compromisso de reduzir o déficit habitacional no país**. Ago. 2023. Disponível em: <https://cbic.org.br/cbic-reforca-compromisso-de-reduzir-o-deficit-habitacional-no-pais/>. Acesso em: 26 mar. 2024.

CANEJO, C.. **Gestão integrada de resíduos sólidos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2021. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 27 mar. 2024.

CASCAVEL. Decreto nº 9775, de 7 de janeiro de 2011. **Institui o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil – PGRCC no município de Cascavel, e dá outras providências**. Cascavel: Gabinete do Prefeito Municipal de Cascavel, 2011.

CAVALLIERE, C.; HABERT, G.; DELL'OSSO, G. R.; HOLLBERG, A. **Continuous BIM-based assessment of embodied environmental impacts throughout the design process**. *Journal of Cleaner Production*, v. 211, p. 941-952, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.247>. Acesso em: 02 nov. 2024.

CONSELHO DE CONSTRUÇÃO VERDE DO REINO UNIDO. **Aggregates and their embodied ecological impacts**. UKGBC, 2023a. Disponível em: <https://ukgbc.org/our-work/topics/embodied-ecological-impacts/aggregates/>. Acesso em: 27 ago. 2024.

CONSELHO DE CONSTRUÇÃO VERDE DO REINO UNIDO. **Cement and its embodied ecological impacts**. UKGBC, 2023b. Disponível em: <https://ukgbc.org/our-work/topics/embodied-ecological-impacts/cement/>. Acesso em: 27 ago. 2024.

COSTA, B. L. C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil**. Orientador: Jairo José de Oliveira Andrade. 2012. 100-190 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/303850992_Quantificacao_das_Emissoes_de_CO2_geradas_na_Producao_de_Materiais_Utilizados_na_Construcao

_Civil_no_Brasil_Quantification_of_Carbon_Dioxide_Releases_Generated_by_the_Production_of_Building_Materials_. Acesso em: 11 Nov. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT 425/2020: Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

FAGERLUND, G. **The long time water absorption in the air-pore structure of concrete.** (Report TVBM; Vol. 3051). Division of Building Materials, LTH, Lund University, 1993. Disponível em:
<https://lup.lub.lu.se/search/files/4761222/1786685.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2024.

FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL. **This is the next hurdle in the construction industry's race to net-zero.** In: Reuniões de Impacto de Desenvolvimento Sustentável, Nova Iorque, setembro, 2022. Disponível em:
<https://www.weforum.org/stories/2022/09/construction-industry-zero-emissions/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

FURIAN, B. O.; FORTI, N. C. S.; PIMENTEL, L. L.; JACINTHO, A. E. P. G. A. **Análise do comportamento mecânico do concreto com agregado reciclado e adição de fibras de aço e de vidro AR.** Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, 2022. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/rmat/a/yLkz4wG9GXpnqGhFBB3rM3h/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 nov. 2024.

GRANDISOLI, E.; **O Brasil produz 48 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição.** Revista AdNormas. São Paulo. 2024. Disponível em: <https://revistaadnormas.com.br/2024/03/12/o-brasil-produz-48-milhoes-de-toneladas-de-residuos-de-construcao-e-demolicao#:~:text=E%20paga%2Dse%20tamb%C3%A9m%20pelo,comprados%20e%20descartados%20sem%20uso.&text=O%20Brasil%20produziu%20cerca%20de,02/2024%2005:05>. Acesso em: 30 Nov. 2024.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland.** In: ISAIA, Geraldo (ed.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 1 e 2, p. 945-984.
JIN, Liu; ZHANG, Renbo; DU, Xiuli; LI, Yue. Investigation on the cracking behavior of concrete cover induced by corner located rebar corrosion. Engineering Failure Analysis, v. 52, p. 129-143, 2015. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630715001077>. Acesso em: 25 out. 2024.

LI, Y.; ZHANG, H.; CHEN, S.; WANG, H.; LIU, X.; GAO, W. **Influence of Aeolian Sand on Capillary Water Absorption of Concrete Under Freeze–Thaw Conditions.** International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 17, n. 16, 2023. Disponível em:
<https://ijcsm.springeropen.com/articles/10.1186/s40069-022-00577-x>. Acesso em: 11 nov. 2024.

MANCINI, S. D.; FERRAZ, J. L.; BIZZO, W. A. **Resíduos Sólidos**. In: ROSA, A. H.; FRACETO, L. F.; MOSCHINI-CARLOS, V. (Org.) Meio Ambiente e Sustentabilidade. Porto Alegre: Bookman, 2012. P. 346-374.

MARTÍN-MORALES, M.; ZAMORANO, M.; RUIZ-MOYANO, A.; VALVERDE-ESPINOSA, I. **Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08**. Construction and Building Materials, v. 25, n. 2, p. 742-748, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181000379X>. Acesso em: 15 jun. 2024.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedade e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p. ISBN 978-85-98576-12-1.

MIRALDO, S.; LOPES, S.; TORGAL, F. P.; LOPES, Adelino. **Advantages and shortcomings of the utilization of recycled wastes as aggregates in structural concretes**. Construction and Building Materials, v. 298, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821014896>. Acesso em: 15 jun. 2024.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 5. ed. Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, 2011. p. 208-209

MUDA, M. M.; LEGESE, A. M.; URGESSA, G.; BOJA, T. **Strength, Porosity and Permeability Properties of Porous Concrete Made from Recycled Concrete Aggregates**. Construction Materials, v. 3, p. 81-92, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-7108/3/1/6#metrics>. Acesso em: 08 nov. 2024.

NAGALLI, A.. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2014.

NADAZDI, A.; NAUNOVIC, Z.; IVANISEVIC, N. **Circular Economy in Construction and Demolition Waste Management in the Western Balkans: A Sustainability Assessment Framework**. Sustainability, v. 14, p. 871, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14020871>. Acesso em: 07 nov. 2024.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**; tradução Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**; tradução Ruy Alberto Cremonini. 2. ed. Dados eletrônicos. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, A. M. de; BUTH, M. C. de M.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. **Indicadores de resistência à carbonatação em concretos com materiais cimentícios suplementares**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil,

Goiânia, v. 20, n. 1, p. 14–29, 2024. DOI: 10.5216/reec.v20i1.80502. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/80502>. Acesso em: 13 nov. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>. Acesso em: 25 maio 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável – Rio+20**. 2012. Disponível em: http://www.rio20.gov.br/documentos/documentos-da-conferencia/o-futuro-que-queremos/at_download/the-future-we-want.pdf. Acesso em: 28 maio 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento**. 1992. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global.html#:~:text=A%20Agenda%2021%20pode%20ser,justi%C3%A7a%20social%20e%20efici%C3%Aancia%20econ%C3%B4mica>. Acesso em: 6 jun. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Cúpula Mundial**. 2002. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/acoesadministrativas/relatoriogestao/rio10/riomaisdez/index.php.39.html>. Acesso em: 1 jun. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Declaração do Milênio**. 2000. Disponível em: <https://www.oas.org/dil/port/2000%20Declara%C3%A7%C3%A3o%20do%20Milenio.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Protocolo de Quioto**. 1997. Disponível em: https://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf. Acesso em: 3 jun. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Relatório Brundtland: Our Common Future**. 1987. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Relatório da Conferência das Partes sobre a sua vigésima sétima sessão, realizada em Sharm el-Sheikh de 6 a 20 de novembro de 2022**. Adendo. Parte dois: Ações tomadas pela Conferência das Partes em sua vigésima sétima sessão. 2023. Disponível em: <https://unfccc.int/documents/626563>. Acesso em: 5 abr. 2024.

Our World in Data (2024). **Multiple sources compiled by World Bank (2024) – processed by Our World in Data**. “Urbanization”. Disponível em:

<https://ourworldindata.org/grapher/share-of-population-urban?tab=chart&country=~BRA>. Acesso em: 23 Ago. 2024.

PAPE, T. M.; MELCHERS, R. E. **Performance of 45-year-old corroded prestressed concrete beams**. Structures and Buildings, v. 166, n. 10, p. 547–559, 2012. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/epdf/10.1680/stbu.11.00016>. Acesso em: 14 nov. 2024.

PARÁ. Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas. **Boletim da Mineração 2023**. Pará, 2023. Disponível em: [https://www.fapespa.pa.gov.br/sites/default/files/Boletim%20da%20Minera%C3%A7%C3%A3o%202023%20\(vers%C3%A3o%2017.04.2023\)%20EXPEDIENTE.PUBLICA%C3%87%C3%83O.pdf](https://www.fapespa.pa.gov.br/sites/default/files/Boletim%20da%20Minera%C3%A7%C3%A3o%202023%20(vers%C3%A3o%2017.04.2023)%20EXPEDIENTE.PUBLICA%C3%87%C3%83O.pdf). Acesso em: 11 nov. 2024.

PLAZA, P.; SÁEZ DEL BOSQUE, I. F.; FRÍAS, M.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I.; MEDINA, C. **Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes: physical and mechanical properties and CO2 emissions**. Construction and Building Materials, v. 285, maio 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821006863>. Acesso em: 16 jun. 2023.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE; **Yale Center for Ecosystems + Architecture**. 2023. Building Materials and the Climate: Constructing a New Future. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/43293>. Acesso em: 22 Ago. 2024.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE – UNEP. **Mineral resource governance**. Resolução 19, 2019. Disponível em: <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/k19/011/46/pdf/k1901146.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2023.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE – UNEP/GRID-Geneva. **What is Sand – Results from a UNEP/GRID-Geneva expert discussion**. Technical report GS01-GSA-2022-002, 2022. Disponível em: https://unepgrid.ch/storage/app/media/Publications/3.%20FINAL_GS01-GSA-2022-002_What%20is%20sand.pdf. Acesso em: 14 mar. 2023.

RAUBER, R.; BALESTRA, C. E. T.; BAUMGARTNER, D. **Análise bibliométrica de resíduos da construção civil e sua reciclagem**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS AMBIENTAIS (CBCTA), 5., 2023, Toledo. Anais... Toledo: Universidade do Oeste do Paraná (UNIOESTE), 2023.

RAUBER, R.; SEBASTIEN, N. Y.; BALESTRA, C. E. T. **A evolução da construção civil nos eventos mundiais de desenvolvimento sustentável**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS AMBIENTAIS (CBCTA), 5., 2023, Toledo. Anais... Toledo: Universidade do Oeste do Paraná (UNIOESTE), 2023.

RIBEIRO, D. V.; SILVA, A. S.; DIAS, C. M. R. **Functionally graded concrete: porosity gradation to enhance durability under carbonation**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 24, e134936, jan./dez. 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/9dyKwzbXB4yx7ScfhTT7hrv/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 11 nov. 2024.

RIBEIRO, D. V.; CUNHA, M. P. T. **Técnicas de avaliação e monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado**. In: RIBEIRO, Daniel Vêras (org.). Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise. Rio de Janeiro: Campus, 2014.

RILEM RECOMMENDATIONS. CPC-18 (1988): **measurement of hardened concrete carbonation depth**. Materials and Structures, v. 21, p. 453-455, 1988. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02472327>. Acesso em: 16 jun. 2024.

SALGADO, F. de A.; SILVA, F. de A. **Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: a review**. Journal of Building Engineering, v. 52, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022200465X>. Acesso em: 15 Jun. 2023.

SALLES, P. V.; GOMES, C. L.; POGGIALI, F. S. J.; RODRIGUES, C. de S. **A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural**. Ambiente Construído, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 177–196, 2021. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/101137>. Acesso em: 10 nov. 2024.

SANTOS, C. C. dos; DAL MOLIN, D. C. C.; ISAIA, G. C.; MASUERO, J. R.; SANTOS, A. L.. **Efeitos da forma e do módulo de elasticidade dos agregados graúdos, dos parâmetros de dosagem e suas interações sobre o módulo de elasticidade do concreto**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 27, n. 1, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/3Z9TCf4ZtcSwysSckJFw69M/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 08 nov. 2024.

SCHIAVON, K. F. B. **Estudo da aplicação de ultrassom na medição de tensões em estruturas de concreto**. 2015. Dissertação (Mestrado em Estruturas) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-14082015-091127/publico/2015_ME_KarenFernandaBompanSchiavon.pdf. Acesso em: 4 abr. 2024.

SILVA, D. A. de; GEYER, A. L. B.. **Análise e classificação da forma do agregado graúdo britado para concreto**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, ano 3, ed. 12, v. 5, p. 18-28, dez. 2018. ISSN 2448-

0959. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/agregado-graudo>. Acesso em: 15 jun. 2023.

SILVA, J. L. O. **Análise de propriedades mecânicas de concreto produzidos com diferentes dosagens de agregados reciclados de concreto**. 2023. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/123456789/11956/1/An%c3%a1lise%20de%20propriedades%20mec%c3%a2nicas%20de%20concretos%20produzidos%20com%20diferentes%20dosagens%20de%20agregados%20reciclados%20de%20concreto.pdf> Acesso em: 08 Nov. 2024.

SILVA, R. C. da; NAGALLI, A.; COUTO, J. P. **A desconstrução como estratégia para recuperação de materiais e componentes da edificação**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2018. p. 2650–2657. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1671>. Acesso em: 6 abr. 2024.

SINIR. **Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos - Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos 2019 -** Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 27 ago. 2024.

SINIR. **Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos - Relatório Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos 2020**. Disponível em: <https://sinir.gov.br/relatorios/nacional/>. Acesso em: 27 ago. 2024.

STEFANIUK, D.; HAJDUCZEK, M.; WEAVER, J. C.; ULM, F. J.; MASIC, A. Cementing CO₂ into C-S-H: **A step toward concrete carbon neutrality**. PNAS Nexus, v. 2, n. 3, 2023. Disponível em: <https://academic.oup.com/pnasnexus/article/2/3/pgad052/7089570>. Acesso em: 12 nov. 2024.

TELLES, D. D. **Resíduos sólidos: gestão responsável e sustentável**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2022. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 27 mar. 2024.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. 149 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/3918>. Acesso em: 25 jun. 2024.

TUTIKIAN, B.; HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. In: ISAIA, Geraldo C. (Org.). Concreto: ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2011. v. 1, p. 415-451.

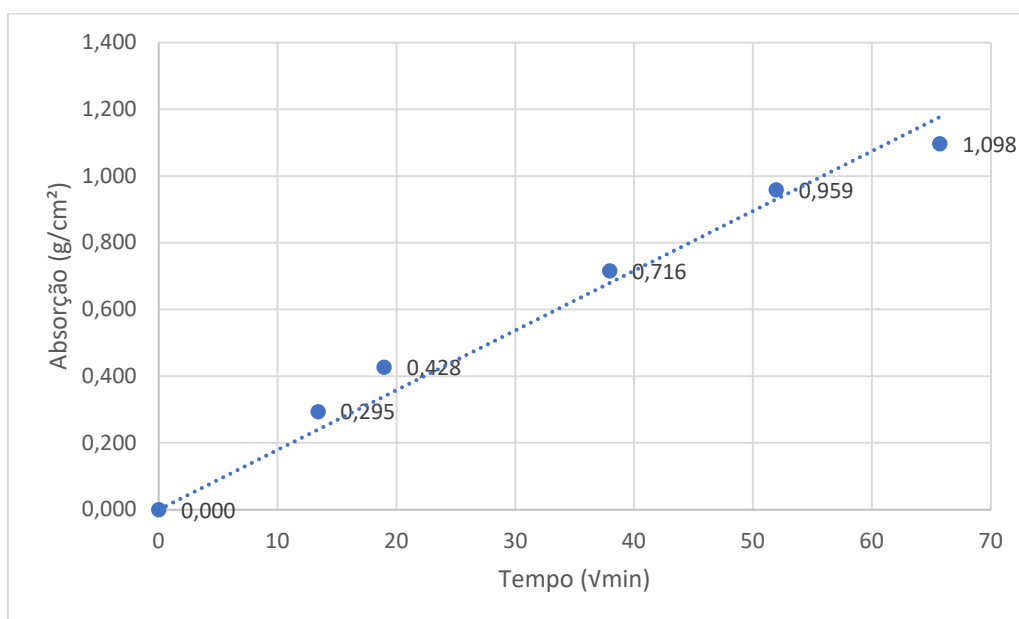
ANEXO A1 – Dados e diagramas de capilaridade

Tabela 24. Absorção por capilaridade referência traço rico

Referência traço rico			
Tempo (h)	Média (g/cm ²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,29	0,03	10,24
6	0,43	0,04	8,77
24	0,72	0,05	6,89
48	0,96	0,04	3,91
72	1,1	0,01	0,25

Fonte: o autor (2024)

Figura 30. Diagrama de capilaridade referência traço rico



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0179x$

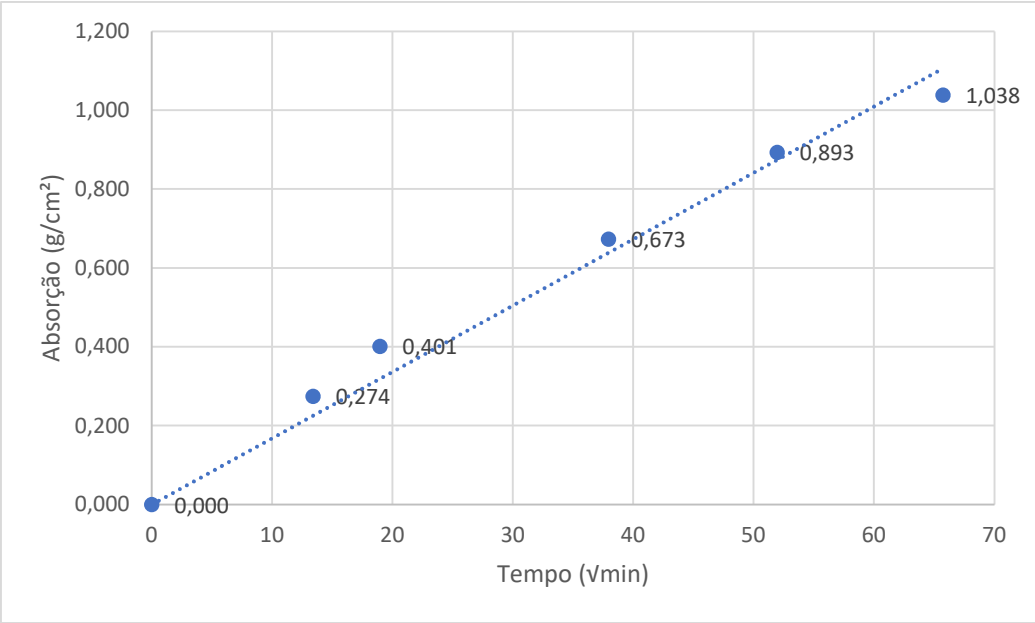
$R^2 = 0,9934$

Tabela 25. Absorção por capilaridade referência traço intermediário

Referência traço intermediário			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,27	0,01	3,05
6	0,40	0,01	2,45
24	0,67	0,02	3,68
48	0,89	0,04	4,32
72	1,04	0,05	4,65

Fonte: o autor (2024)

Figura 31. Diagrama de capilaridade referência traço intermediário



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0168x$

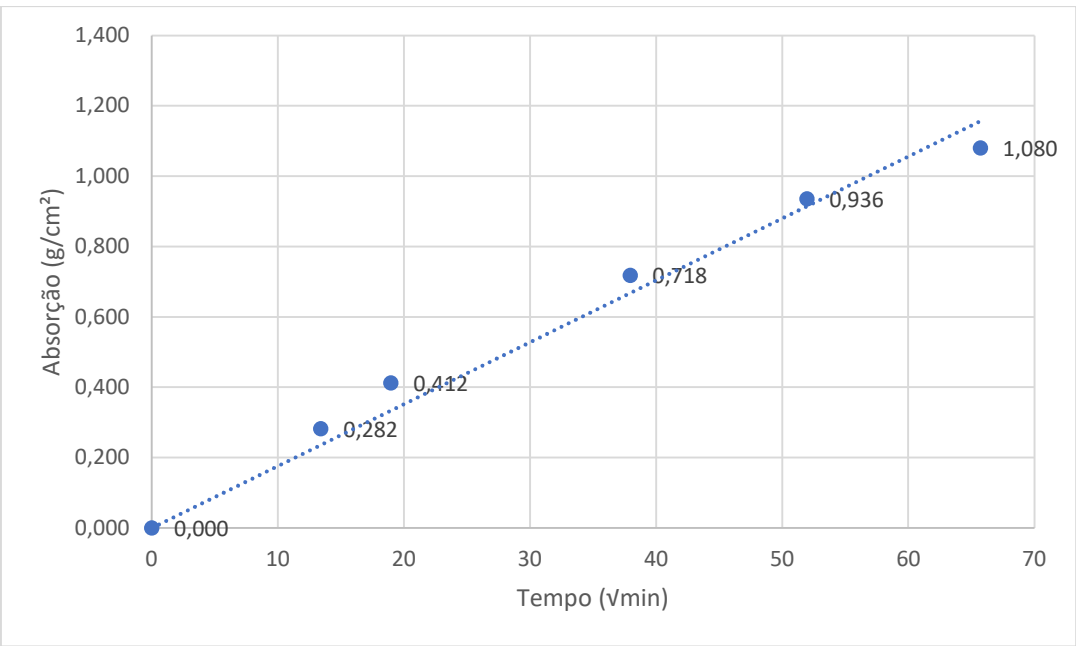
$R^2 = 0,9941$

Tabela 26. Absorção por capilaridade referência traço pobre

Referência traço pobre			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,28	0,01	4,22
6	0,41	0,01	3,58
24	0,72	0,03	4,42
48	0,94	0,07	7,26
72	1,08	0,10	8,85

Fonte: o autor (2024)

Figura 32. Diagrama de capilaridade referência traço pobre



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0176x$

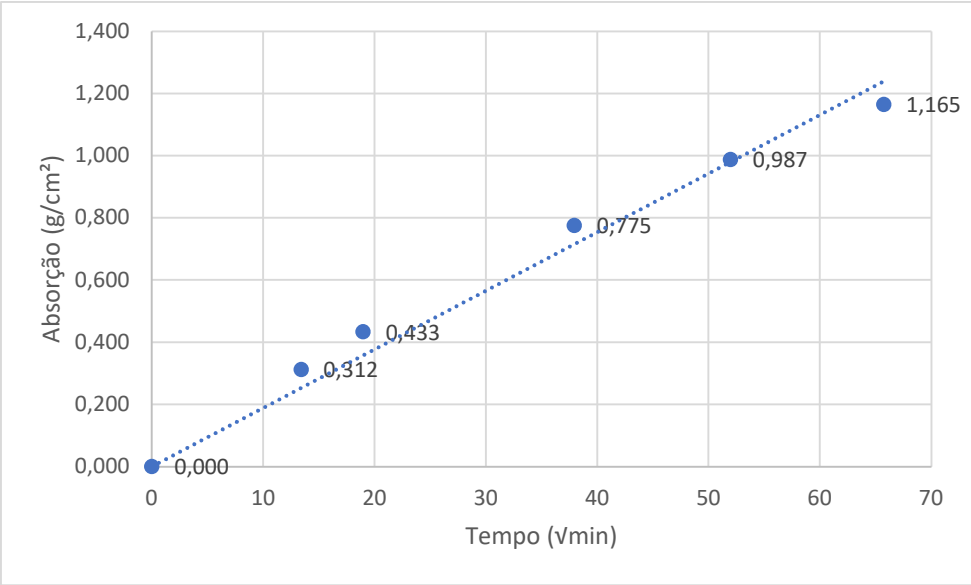
$R^2 = 0,9939$

Tabela 27. Absorção por capilaridade S5 traço rico

Substituição 5% traço rico			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,31	0,04	11,38
6	0,43	0,04	10,15
24	0,78	0,07	9,10
48	0,99	0,08	8,12
72	1,16	0,13	11,04

Fonte: o autor (2024)

Figura 33. Diagrama de capilaridade S5 traço rico



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0189x$

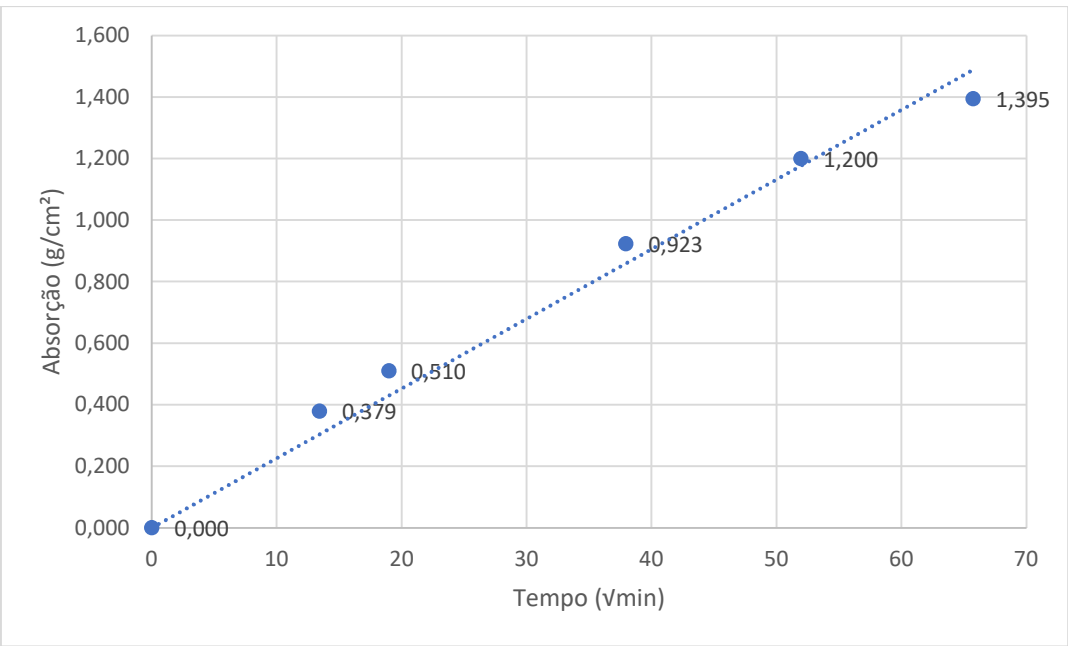
$R^2 = 0,9943$

Tabela 28. Absorção por capilaridade S5 traço intermediário

Substituição 5% traço intermediário			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,38	0,04	9,72
6	0,51	0,05	10,05
24	0,92	0,07	7,89
48	1,20	0,08	6,59
72	1,39	0,10	6,97

Fonte: o autor (2024)

Figura 34. Diagrama de capilaridade S5 traço intermediário



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0225x$

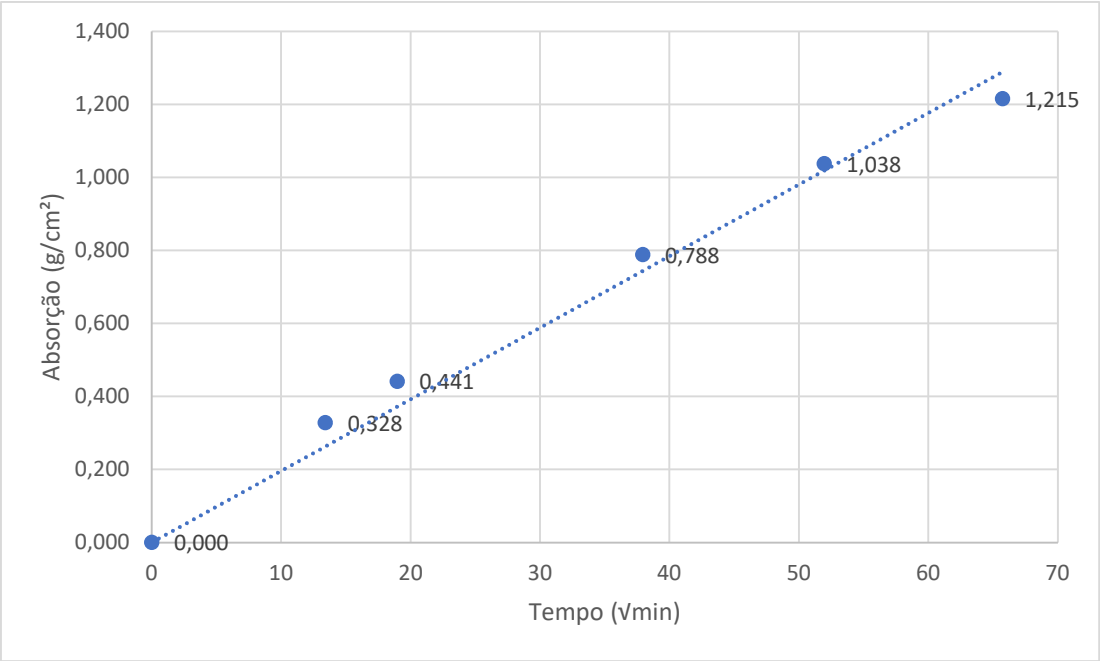
$R^2 = 0,9945$

Tabela 29. Absorção por capilaridade S5 traço pobre

Substituição 5% traço pobre			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,38	0,04	9,72
6	0,51	0,05	10,05
24	0,92	0,07	7,89
48	1,20	0,08	6,59
72	1,39	0,10	6,97

Fonte: o autor (2024)

Figura 35. Diagrama de capilaridade S5 traço pobre



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0196x$

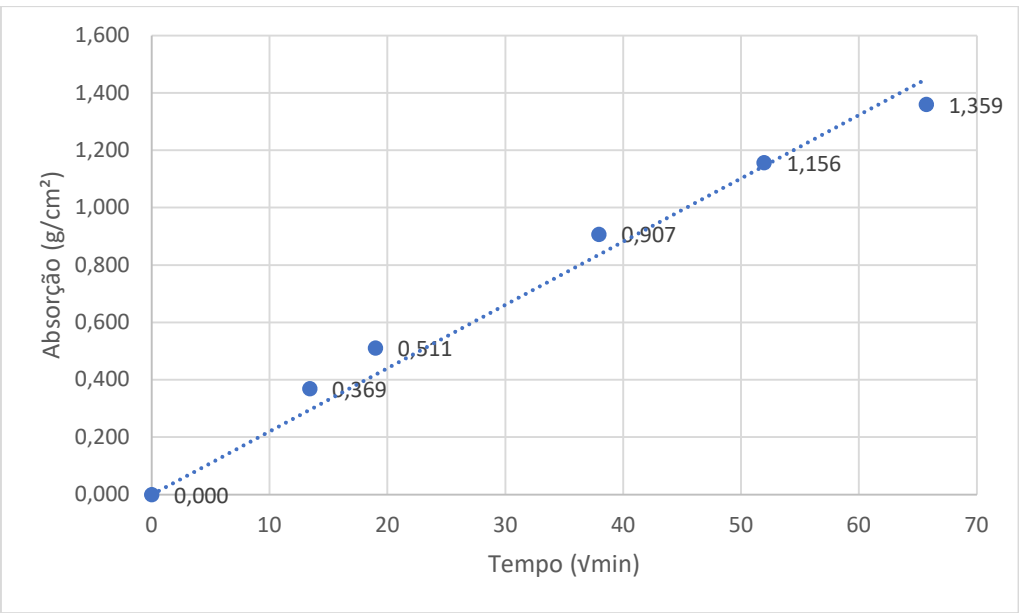
$R^2 = 0,9952$

Tabela 30. Absorção por capilaridade S10 traço rico

Substituição 10% traço rico			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,37	0,05	12,66
6	0,51	0,06	11,5
24	0,91	0,08	9,29
48	1,16	0,10	8,24
72	1,36	0,11	7,98

Fonte: o autor (2024)

Figura 36. Diagrama de capilaridade S10 traço rico



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0221x$

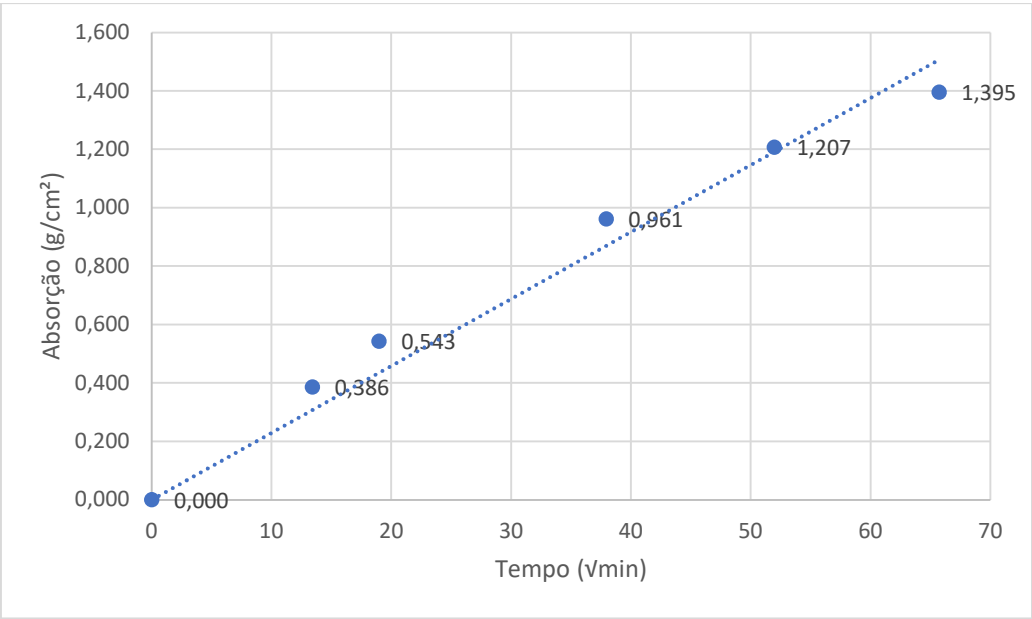
$R^2 = 0,9939$

Tabela 31. Absorção por capilaridade S10 traço intermediário

Substituição 10% traço intermediário			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,39	0,07	16,84
6	0,54	0,09	16,69
24	0,96	0,14	14,88
48	1,21	0,17	13,96
72	1,40	0,19	13,61

Fonte: o autor (2024)

Figura 37. Diagrama de capilaridade S10 traço intermediário



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0229x$

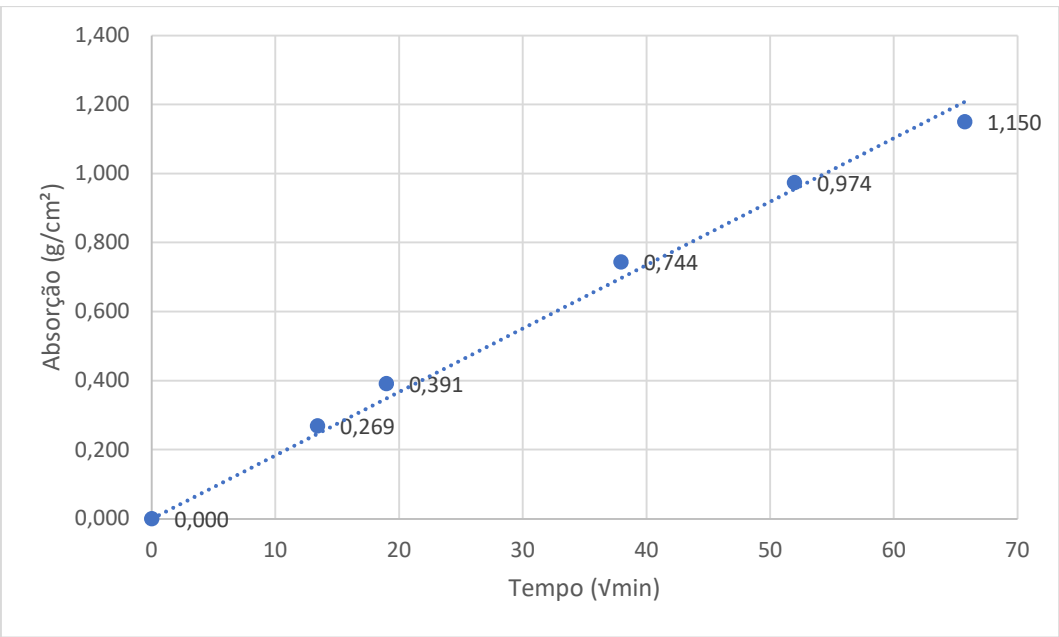
$R^1 = 0,9918$

Tabela 32. Absorção por capilaridade S10 traço pobre

Substituição 10% traço pobre			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,27	0,06	21,76
6	0,39	0,08	19,67
24	0,74	0,12	16,04
48	0,97	0,15	15,28
72	1,15	0,17	14,44

Fonte: o autor (2024)

Figura 38. Diagrama de capilaridade S10 traço pobre



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0184x$

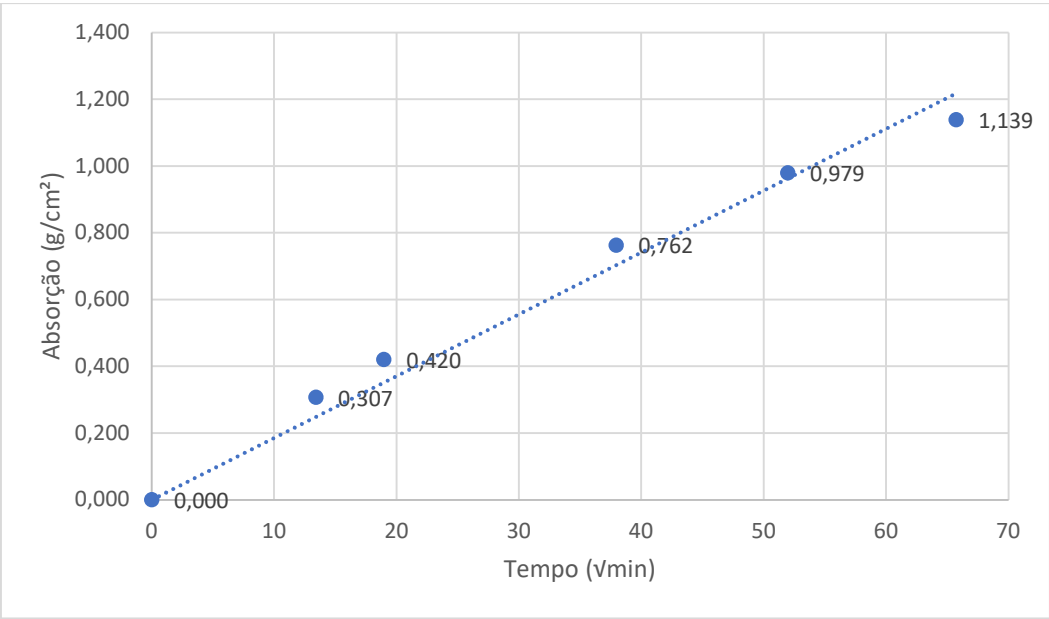
$R^2 = 0,9973$

Tabela 33. Absorção por capilaridade S15 traço rico

Substituição 15% traço rico			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,31	0,04	12,72
6	0,42	0,05	13,05
24	0,76	0,09	11,23
48	0,98	0,11	11,57
72	1,14	0,13	11,01

Fonte: o autor (2024)

Figura 39. Diagrama de capilaridade S15 traço rico



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0185x$

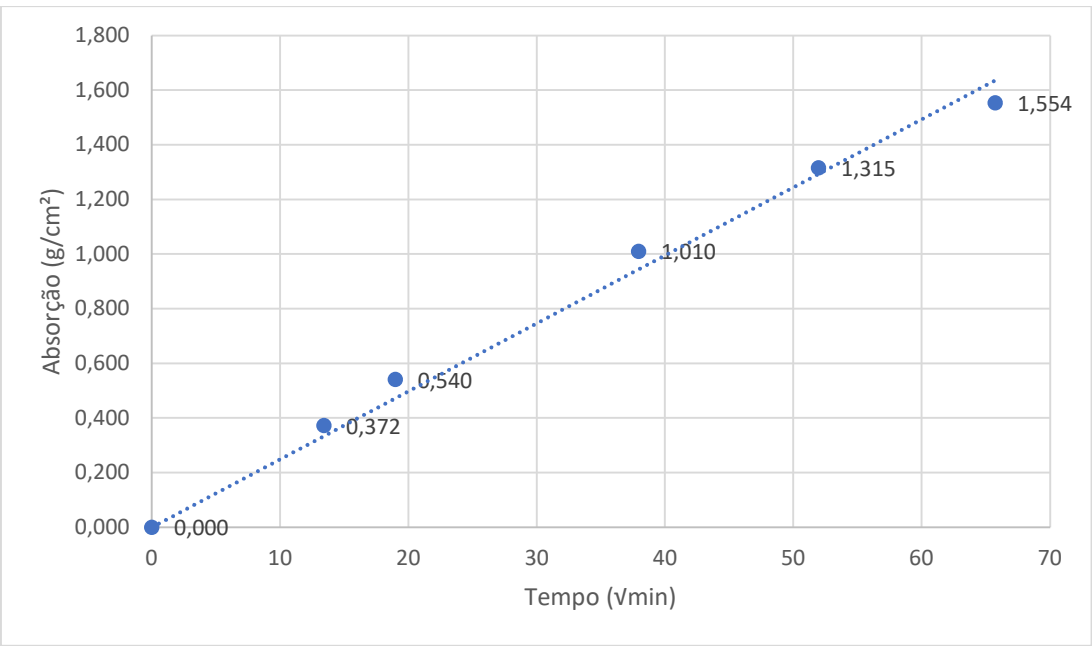
$R^2 = 0,9942$

Tabela 34. Absorção por capilaridade S15 traço intermediário

Substituição 15% traço intermediário			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,37	0,05	13,85
6	0,54	0,03	6,34
24	1,01	0,04	4,28
48	1,32	0,12	9,46
72	1,55	0,08	5,39

Fonte: o autor (2024)

Figura 40. Diagrama de capilaridade S15 traço intermediário



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0249x$

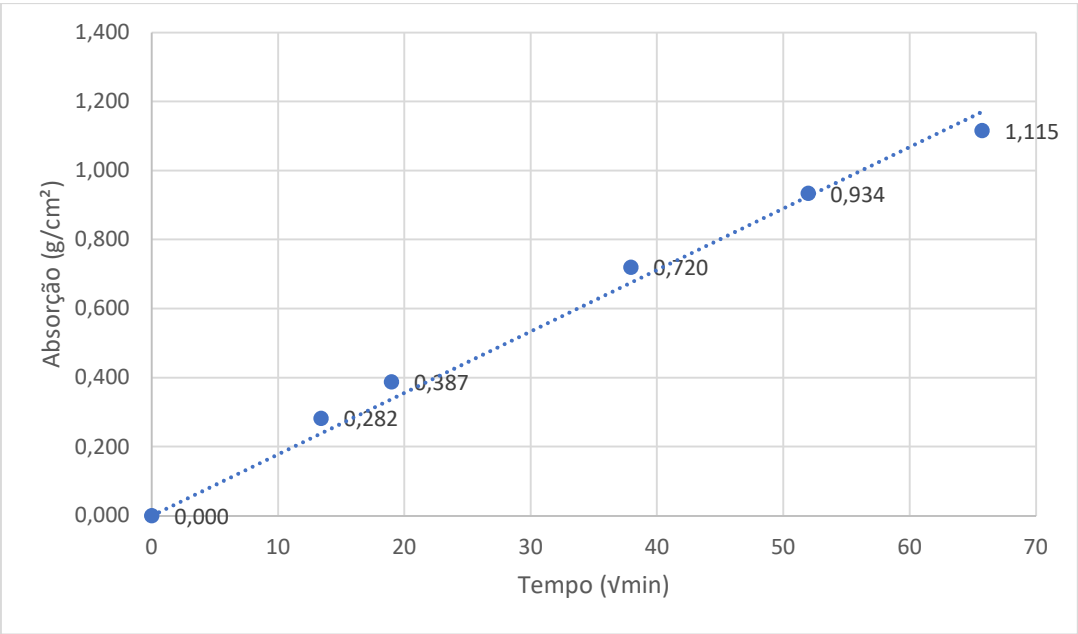
$R^2 = 0,9968$

Tabela 35. Absorção por capilaridade S15 traço pobre

Substituição 15% traço pobre			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,28	0,04	15,60
6	0,39	0,05	14,18
24	0,72	0,08	10,57
48	0,93	0,10	10,35
72	1,12	0,11	10,25

Fonte: o autor (2024)

Figura 41. Diagrama de capilaridade S15 traço pobre



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0178x$

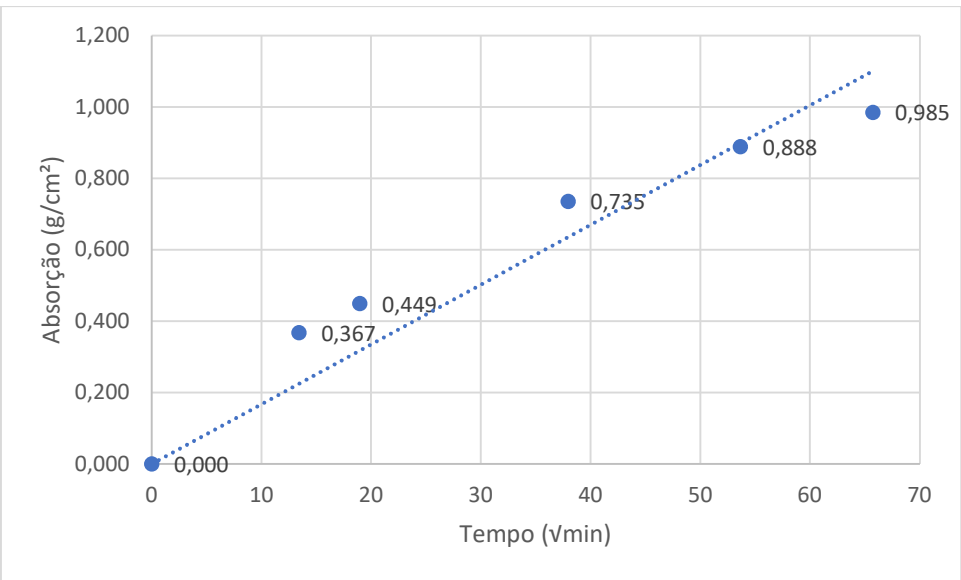
$R^2 = 0,9967$

Tabela 36. Absorção por capilaridade S20 traço rico

Substituição 20% traço rico			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,37	0,01	1,72
6	0,45	0,01	0,79
24	0,74	0,04	5,45
48	0,89	0,06	6,39
72	0,98	0,08	7,79

Fonte: o autor (2024)

Figura 42. Diagrama de capilaridade S20 traço rico



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0167x$

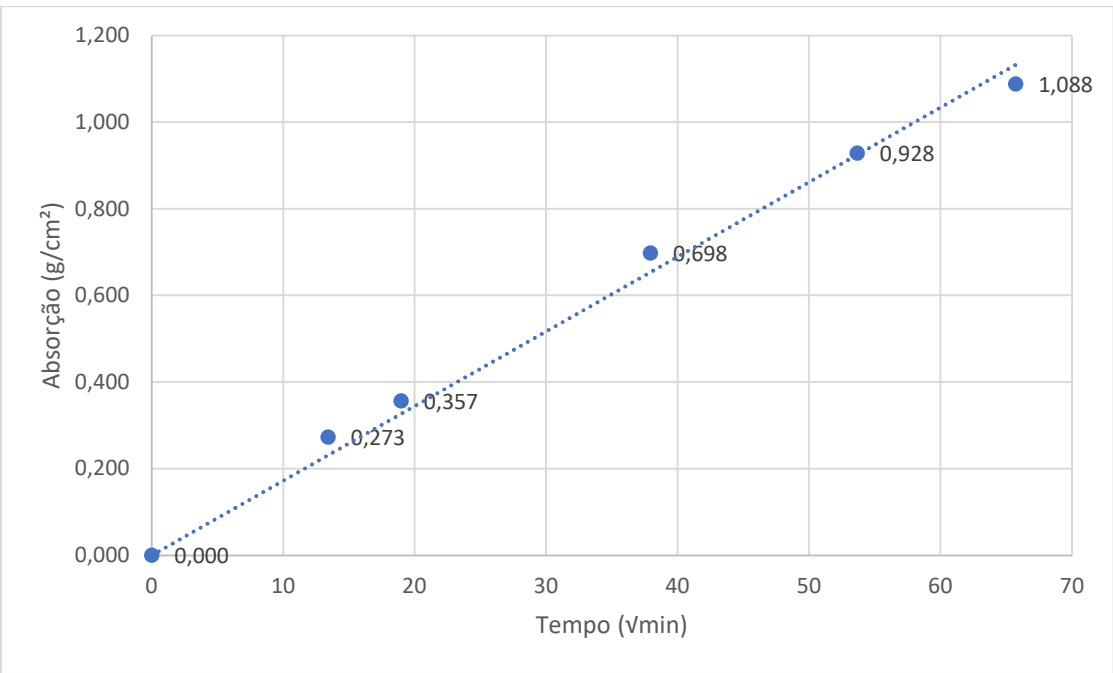
$R^2 = 0,9768$

Tabela 37. Absorção por capilaridade S20 traço intermediário

Substituição 20% traço intermediário			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,27	0,03	10,35
6	0,36	0,04	10,14
24	0,70	0,07	10,10
48	0,93	0,09	9,67
72	1,09	0,10	9,08

Fonte: o autor (2024)

Figura 43. Diagrama de capilaridade S20 traço intermediário



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0172x$

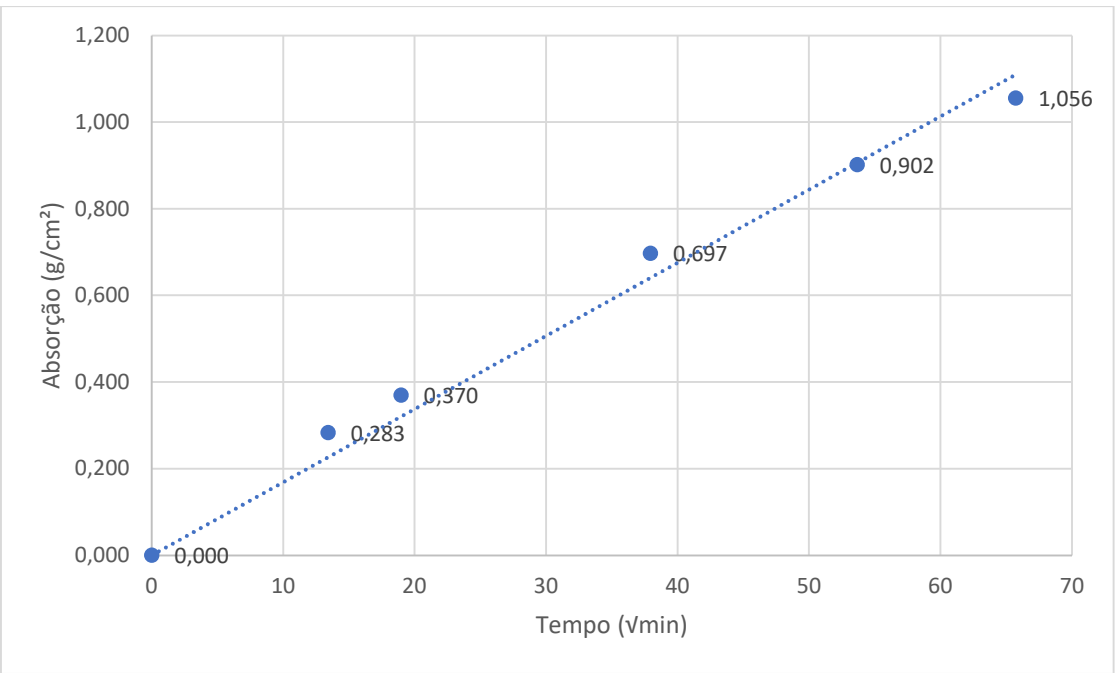
$R^2 = 0,9976$

Tabela 38. Absorção por capilaridade S20 traço pobre

Substituição 20% traço pobre			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,28	0,01	4,85
6	0,37	0,01	2,76
24	0,70	0,02	2,60
48	0,90	0,03	3,72
72	1,06	0,02	1,88

Fonte: o autor (2024)

Figura 44. Diagrama de capilaridade S20 traço pobre



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0169x$

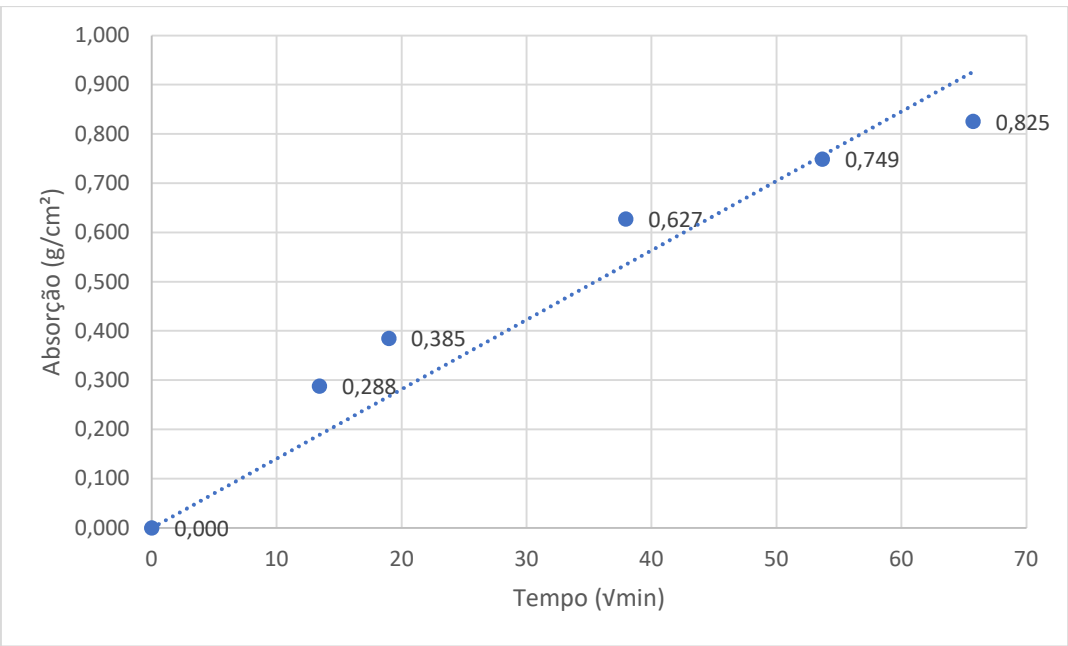
$R^2 = 0,9955$

Tabela 39. Absorção por capilaridade S50 traço rico

Substituição 50% traço rico			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,29	0,03	10,04
6	0,39	0,05	13,50
24	0,63	0,07	10,48
48	0,75	0,07	9,83
72	0,83	0,08	10,25

Fonte: o autor (2024)

Figura 45. Diagrama de capilaridade S50 traço rico



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0141x$

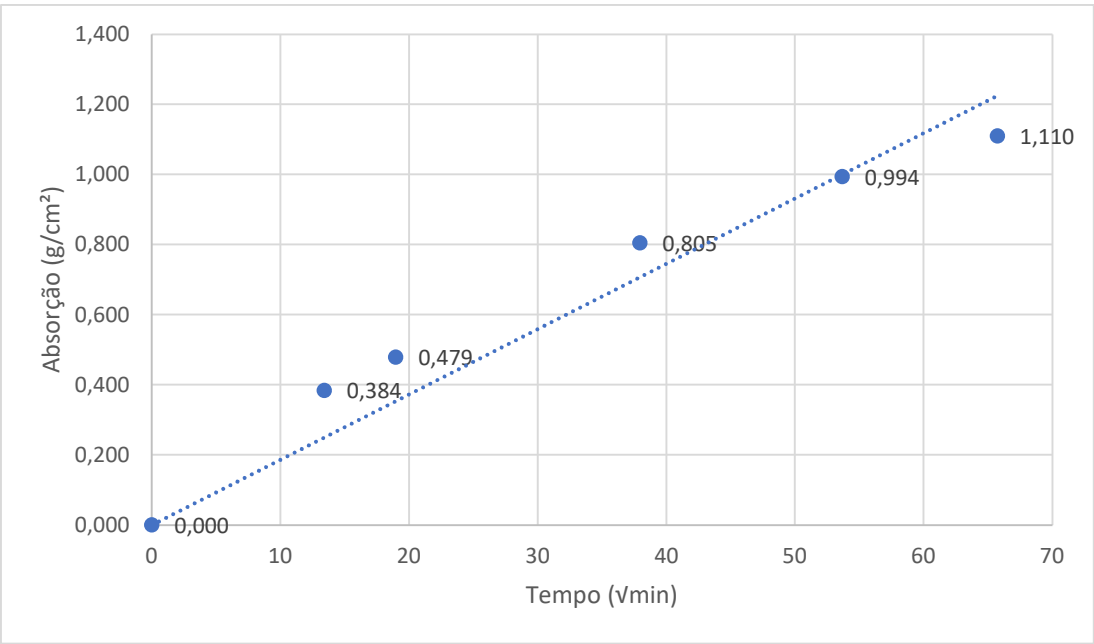
$R^2 = 0,9773$

Tabela 40. Absorção por capilaridade S50 traço intermediário

Substituição 50% traço intermediário			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,38	0,05	13,49
6	0,48	0,05	11,47
24	0,80	0,07	8,11
48	0,99	0,07	7,35
72	1,11	0,08	7,13

Fonte: o autor (2024)

Figura 46. Diagrama de capilaridade S50 traço intermediário



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0186x$

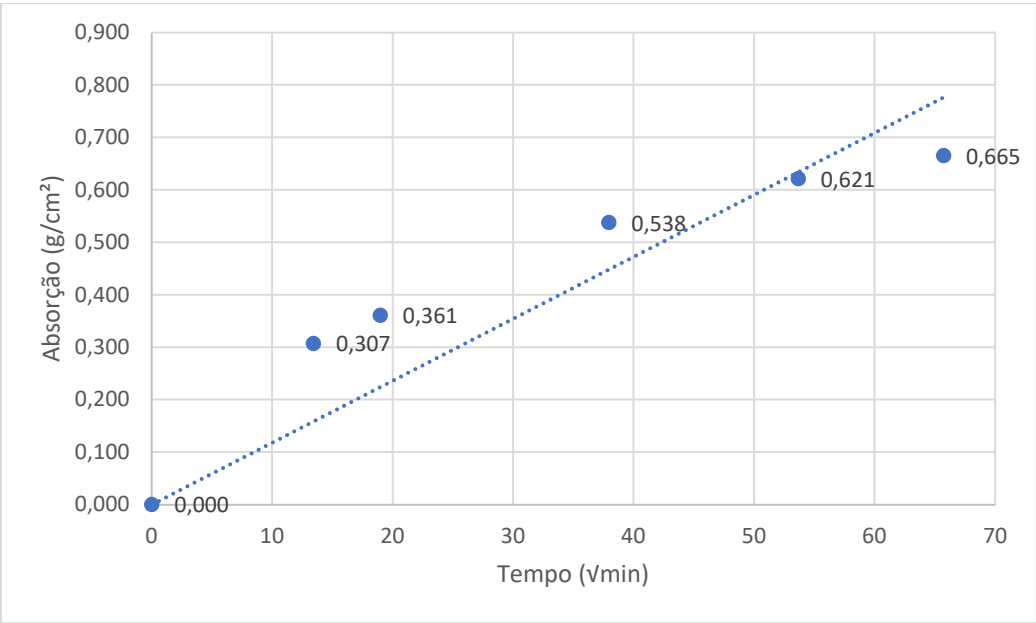
$R^2 = 0,9826$

Tabela 41. Absorção por capilaridade S50 traço pobre

Substituição 50% traço pobre			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,31	0,04	13,89
6	0,36	0,05	15,21
24	0,54	0,08	14,10
48	0,62	0,07	11,54
72	0,67	0,08	11,38

Fonte: o autor (2024)

Figura 47. Diagrama de capilaridade S50 traço pobre



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0118x$

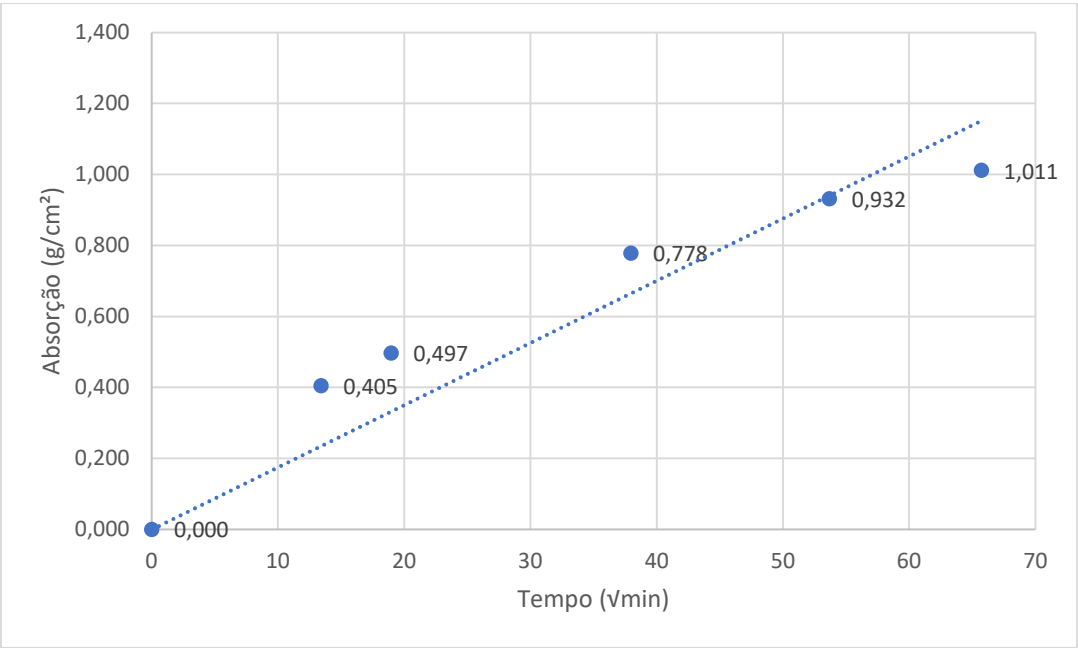
$R^2 = 0,9543$

Tabela 42. Absorção por capilaridade S75 traço rico

Substituição 75% traço rico			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,41	0,04	9,52
6	0,50	0,04	7,45
24	0,78	0,05	6,22
48	0,93	0,05	4,97
72	1,01	0,05	5,00

Fonte: o autor (2024)

Figura 48. Diagrama de capilaridade S75 traço rico



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0175x$

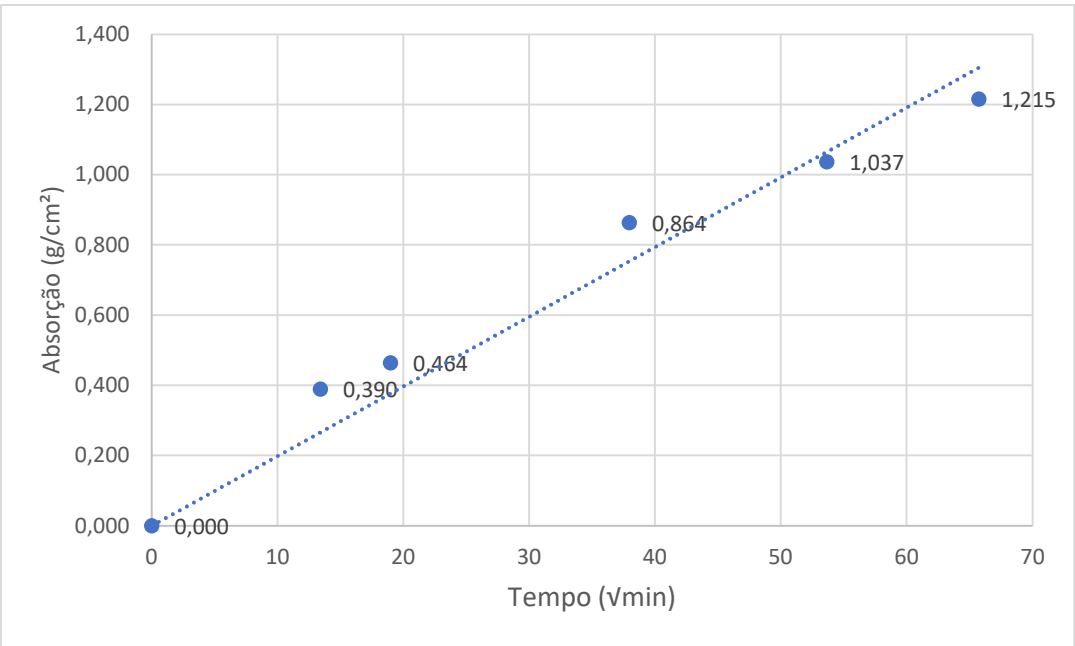
$R^2 = 0,9698$

Tabela 43. Absorção por capilaridade S75 traço intermediário

Substituição 75% traço intermediário			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,39	0,03	7,07
6	0,46	0,03	5,44
24	0,86	0,04	4,88
48	1,04	0,09	8,20
72	1,21	0,02	1,73

Fonte: o autor (2024)

Figura 49. Diagrama de capilaridade S75 traço intermediário



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0199x$

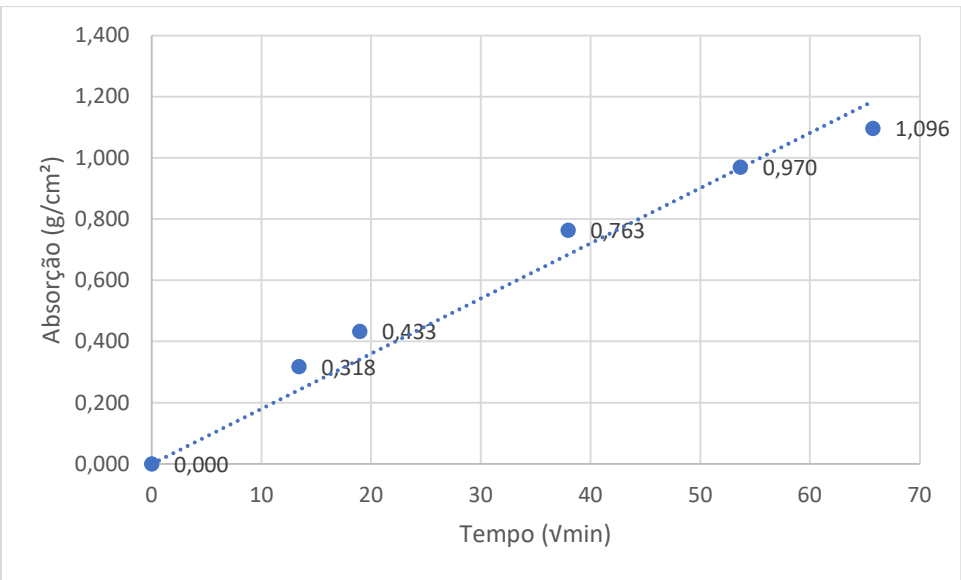
$R^2 = 0,988$

Tabela 44. Absorção por capilaridade S75 traço pobre

Substituição 75% traço pobre			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,32	0,02	4,78
6	0,43	0,02	5,36
24	0,76	0,03	4,46
48	0,97	0,04	4,07
72	1,10	0,05	4,31

Fonte: o autor (2024)

Figura 50. Diagrama de capilaridade S75 traço pobre



Fonte: o autor (2024)

$y = 0,018x$

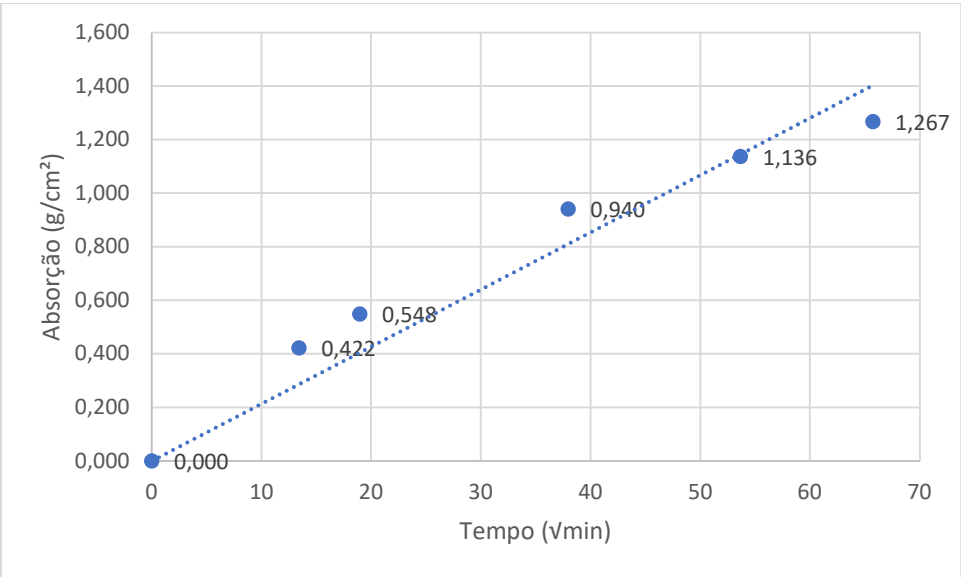
$R^2=0,9907$

Tabela 45. Absorção por capilaridade S100 traço rico

Substituição 100% traço rico			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,42	0,05	11,23
6	0,55	0,06	11,80
24	0,94	0,07	10,30
48	1,14	0,13	11,02
72	1,27	0,15	11,79

Fonte: o autor (2024)

Figura 51. Diagrama de capilaridade S100 traço rico



Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,0213x$

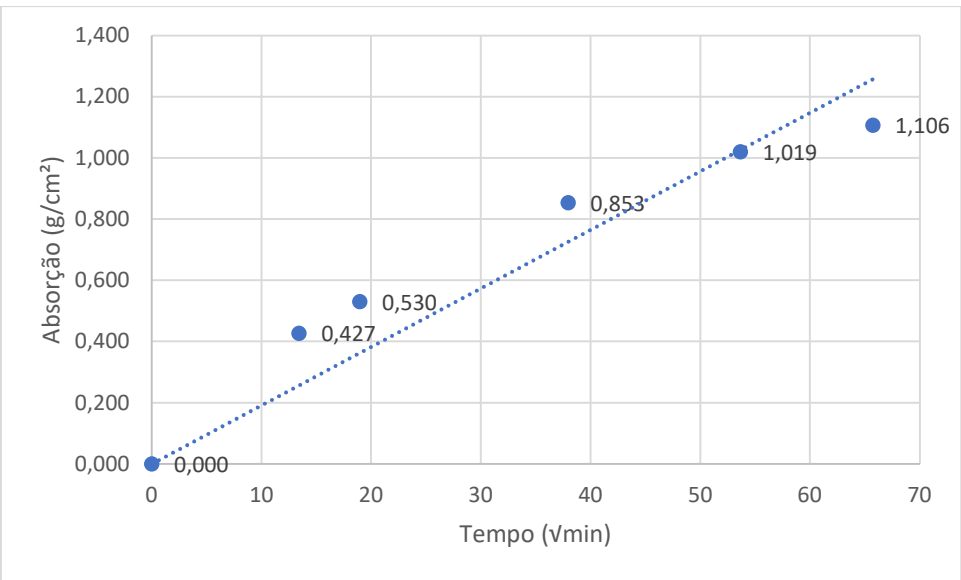
$R^2 = 0,9825$

Tabela 46. Absorção por capilaridade S100 traço intermediário

Substituição 100% traço intermediário			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,43	0,07	17,01
6	0,53	0,10	19,17
24	0,85	0,09	10,57
48	1,02	0,10	9,44
72	1,11	0,11	9,59

Fonte: o autor (2024)

Figura 52. Diagrama de capilaridade S100 traço intermediário



Equação da reta: $y = 0,0191x$

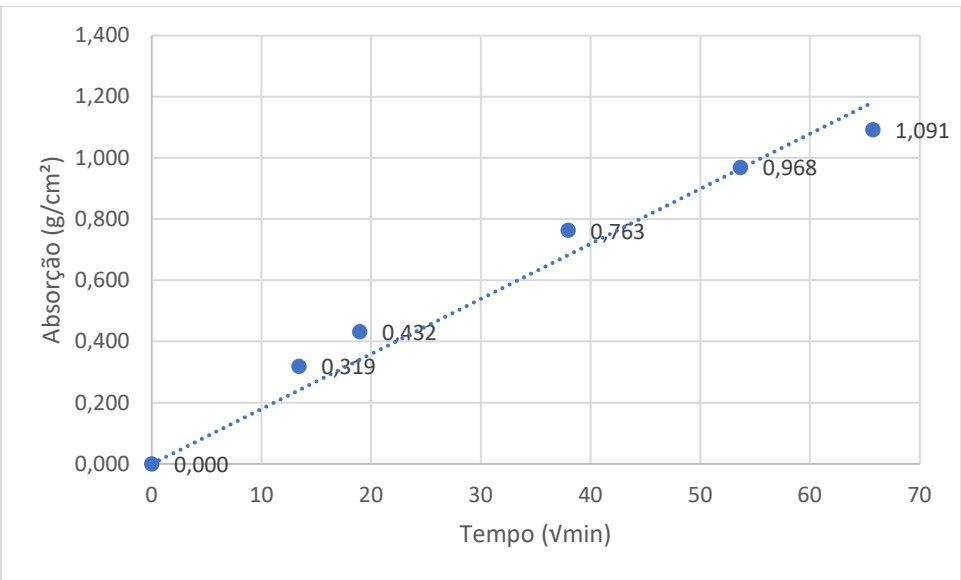
$R^2 = 0,9722$

Tabela 47. Absorção por capilaridade S100 traço pobre

Substituição 100% traço pobre			
Tempo (h)	Média (g/cm²)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
0	0	0	0
3	0,32	0,01	1,85
6	0,43	0,00	0,66
24	0,76	0,04	4,74
48	0,97	0,04	4,09
72	1,09	0,04	4,04

Fonte: o autor (2024)

Figura 53. Diagrama de capilaridade S100 traço pobre



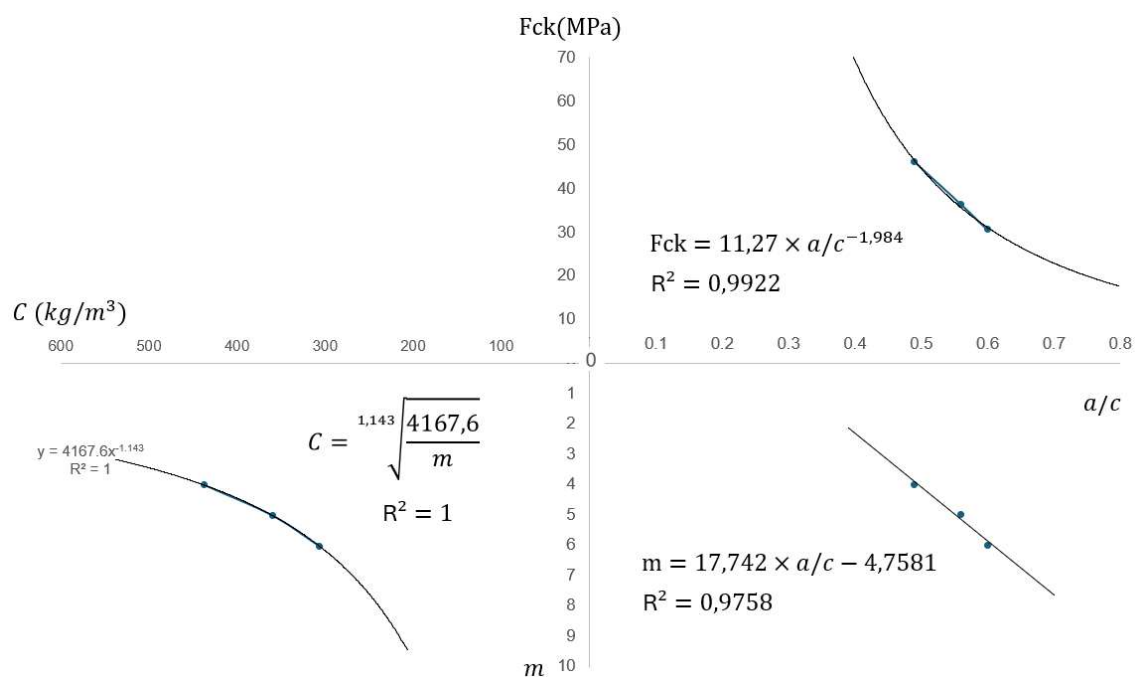
Fonte: o autor (2024)

Equação da reta: $y = 0,018x$

$R^2 = 0,9903$

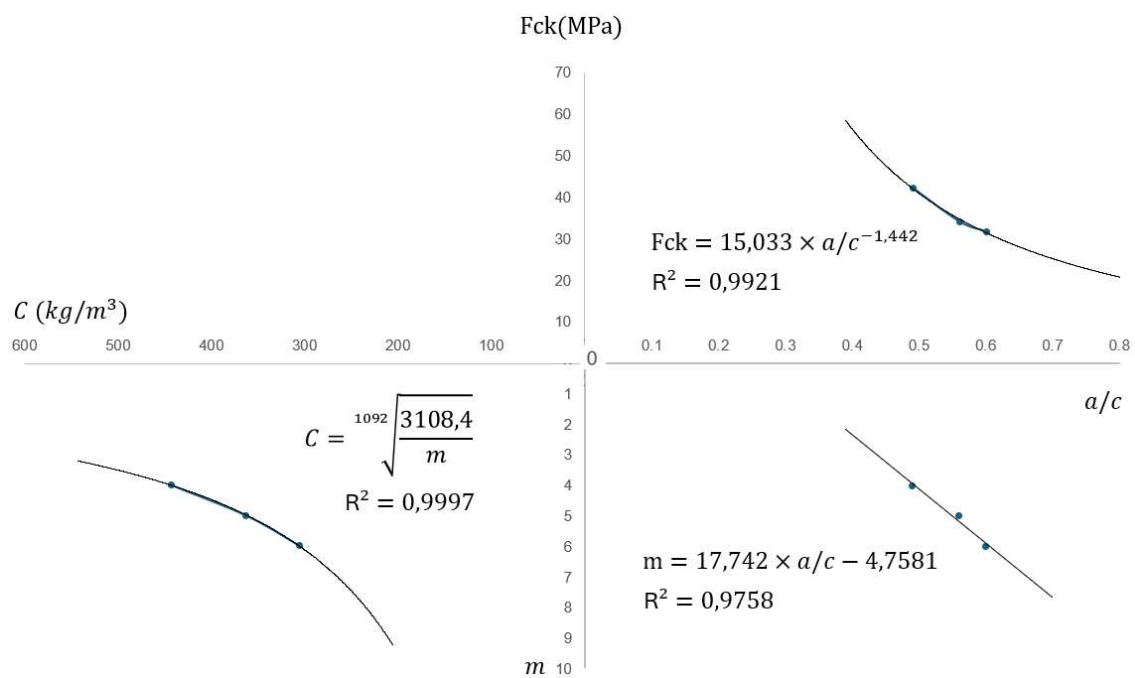
ANEXO A2 – Diagramas método IPT/EPUSP

Figura 54. Diagrama Traço Referência



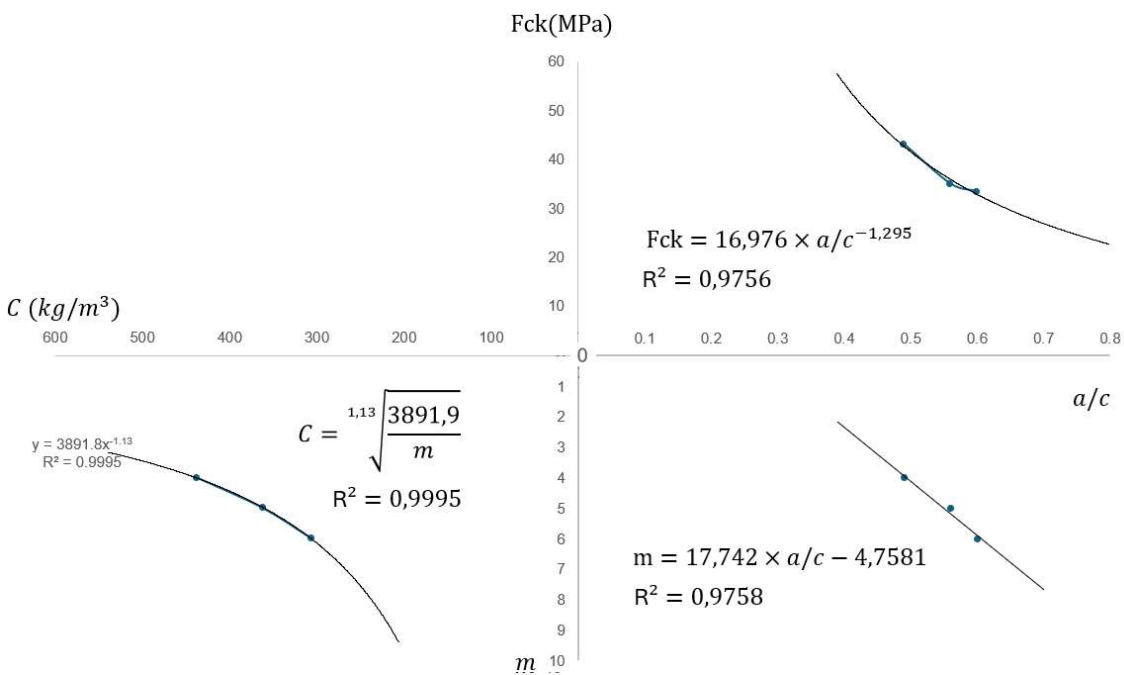
Fonte: o autor (2024)

Figura 55. Diagrama traço S5



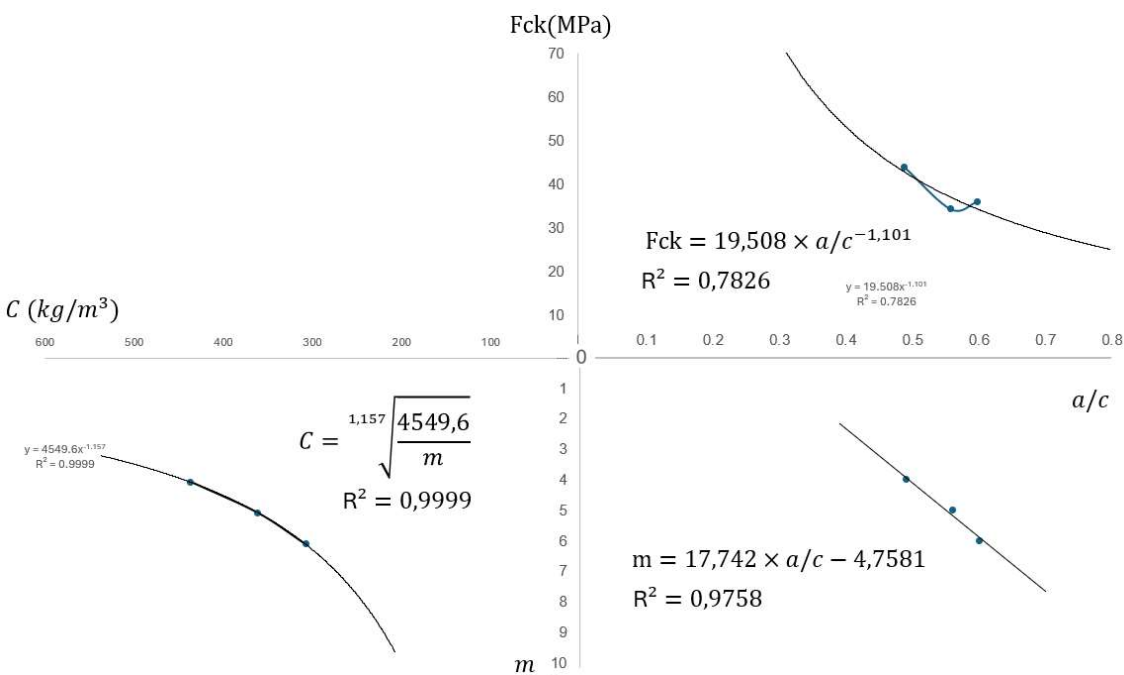
Fonte: o autor (2024)

Figura 56. Diagrama traço S10



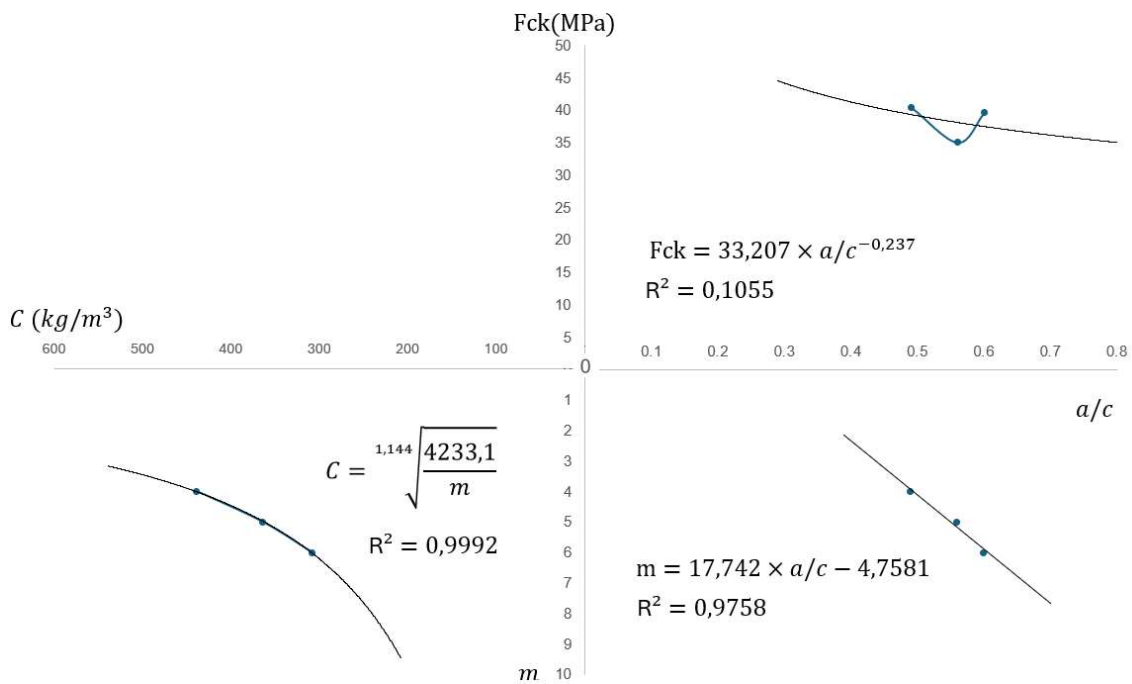
Fonte: o autor (2024)

Figura 57. Diagrama traço S15



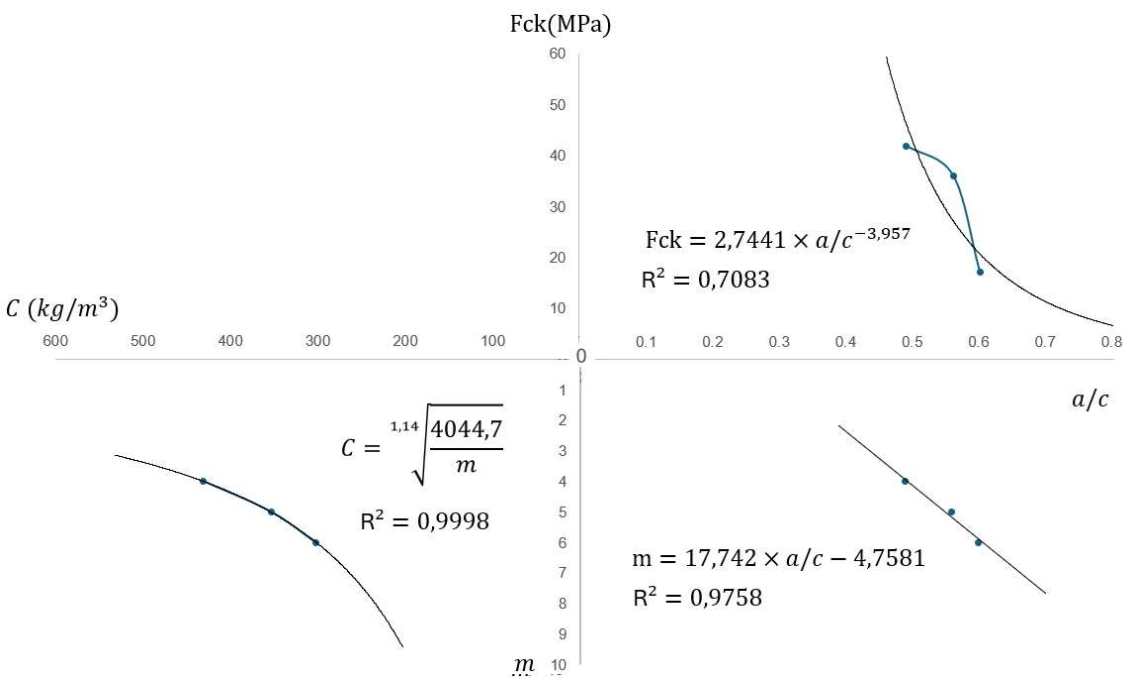
Fonte: o autor (2024)

Figura 58. Diagrama traço S20



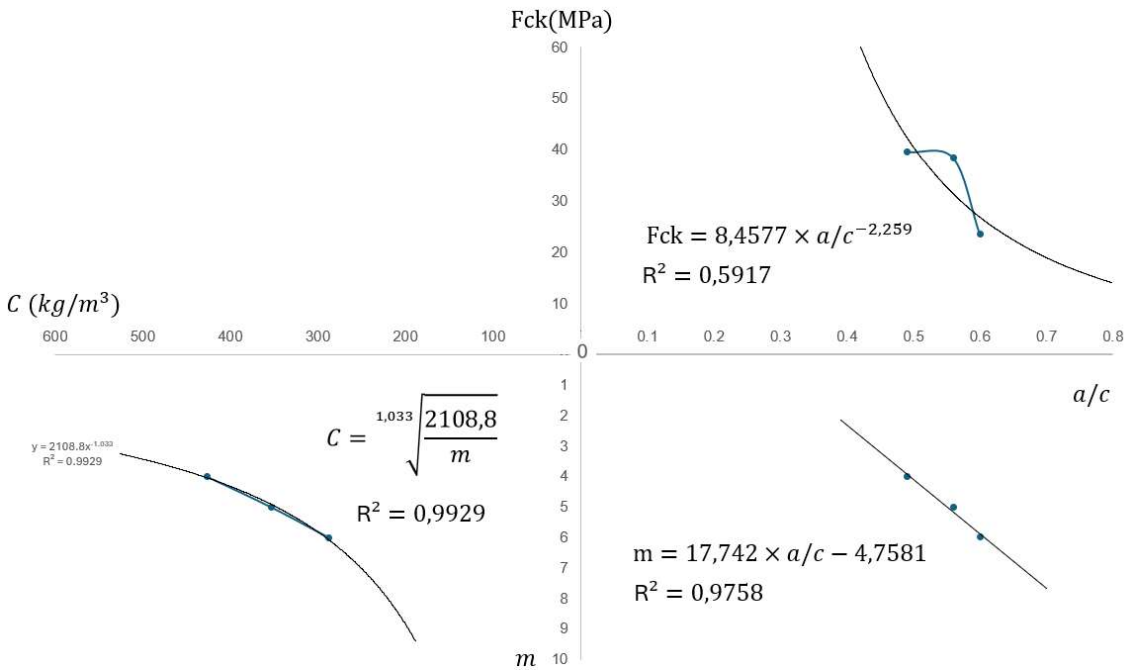
Fonte: o autor (2024)

Figura 59. Diagrama traço S50



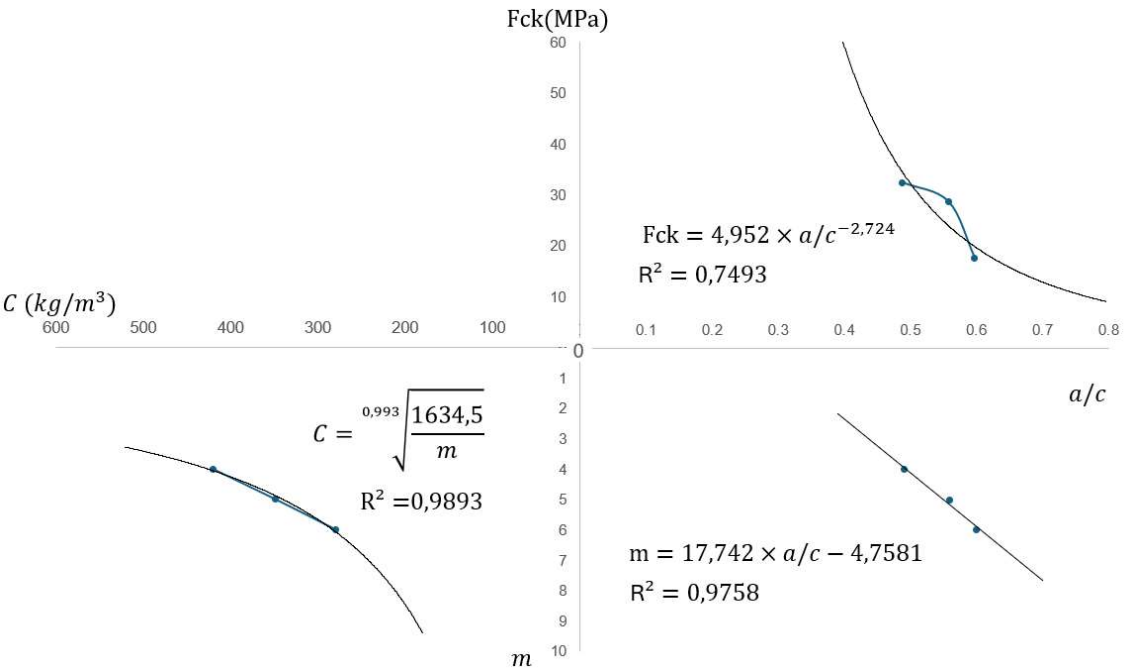
Fonte: o autor (2024)

Figura 60. Diagrama traço S75



Fonte: o autor (2024)

Figura 61. Diagrama traço S100



Fonte: o autor (2024)