

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
MESTRADO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA
URBANA**

IVANNY SOARES GOMES CAVALIERE

**O ESTUDO COMPARATIVO DO MÓDULO DE
ELASTICIDADE DE CONCRETOS
CONVENCIONAIS E CONCRETOS COM
MATERIAIS ALTERNATIVOS**

**CAMPINAS
2020**

IVANNY SOARES GOMES CAVALIERE

**O ESTUDO COMPARATIVO DO MÓDULO DE
ELASTICIDADE DE CONCRETOS
CONVENCIONAIS E CONCRETOS COM
MATERIAIS ALTERNATIVOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Área de concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana

Orientadora: Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho

Co-orientadora: Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel

**CAMPINAS
2020**

Ficha catalográfica elaborada por Vanessa da Silveira CRB 8/8423
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

620.136 Cavaliere, Ivanny Soares Gomes
C376e

Estudo comparativo do módulo de elasticidade de concretos convencionais e concretos com materiais alternativos / Ivanny Soares Gomes Cavaliere. - Campinas: PUC-Campinas, 2019.

157 f.: il.

Orientador: Ana Elisabete P. G. de Á. Jacintho; Coorientador: Lia L. Pimentel.

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2019.

Inclui bibliografia.

1. Concreto. 2. Elasticidade. 3. Agregados (Materiais de construção). I. Jacintho, Ana Elisabete P. G. de Á.. II. Pimentel, Lia L. III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. IV. Título.

CDD - 22. ed. 620.136

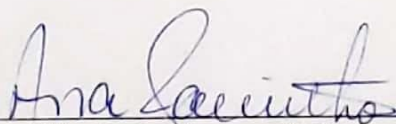
IVANNY SOARES GOMES CAVALIERE

**O ESTUDO COMPARATIVO DO MÓDULO DE
ELASTICIDADE DE CONCRETOS CONVENCIONAIS E
CONCRETOS COM MATERIAIS ALTERNATIVOS**

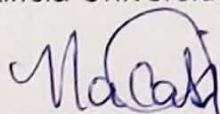
Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacitho.

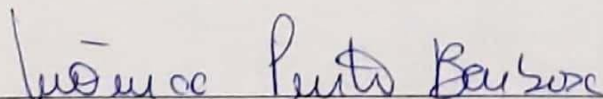
Dissertação defendida e aprovada em 27 de fevereiro de 2020 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacitho
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Nádia Cazarim da Silva Forti
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Mônica Pinto Barbosa
Universidade Estadual Paulista - UNESP

Dedico este trabalho para quem não só me ensinou,
mas me deu exemplo de inteligência, resiliência,
generosidade e amor. Dedico este trabalho à minha
mãe Kátia, mulher virtuosa, guerreira e cheia de amor.

AGRADECIMENTOS

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

Felizmente um projeto de pesquisa só é possível ser desenvolvido e concluído com a contribuição de muitas pessoas, e sou sinceramente grata a todos os envolvidos. Sem vocês realmente não teria conquistado esse sonho!

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela oportunidade de ter aprendido tanto nesses dois anos, por ter escolhido a dedo todas as pessoas que diretamente ou indiretamente fizeram parte dessa empreitada comigo.

Agradeço com lágrimas nos olhos a minha mãe, pois sem ela eu não teria finalizado esse mestrado, obrigada por fazer parte dos meus sonhos, obrigada por nunca me deixar duvidar do meu potencial, obrigada por sempre me lembrar que eu sou forte e capaz, obrigada mãe por todo o amor incondicional.

Agradeço com muito apreço aquela que abriu o caminho, limpou a passagem, complementou com o necessário, e retirou as ervas daninhas, para que só assim eu alcançasse a linha de chegada. Muito obrigada Professora Ana Elisabete P. G. A. Jacintho, por ter lutado e batalhado ao meu lado, por todo ensinamento e principalmente por ter me dado um exemplo de professora, engenheira e mulher forte e resiliente. Obrigada por não ter desistido de mim e desse trabalho!

Agradeço a minha Co-orientadora Professora Lia Lorena Pimentel por todas as contribuições, sugestões, conversas e incentivos.

Agradeço à todas as professoras e membros da banca examinadora, Prof.^a Mônica Pinto Barbosa e Prof.^a Nádia Cazarim da Silva Forti, por todas as sugestões e valiosas contribuições.

Agradeço a todos os meus amigos verdadeiros que fizeram parte dessa minha jornada, me apoiando, me ajudando, e me incentivando a ir adiante, muito obrigada Reginaldo, Hebert, Italo e Eric.

Agradeço ao meu parceiro de vida, Matheus, que foi uma peça imprescindível, a peça que faltava para eu encerrar esse trabalho com chave de ouro, obrigada pelo companheirismo, por acreditar em mim e me forçar a ser sempre melhor.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Materiais e Estruturas da PUC-Campinas, Igor, Wellington e Fernando, pelo auxílio na realização dos ensaios.

Agradeço a todos os docentes e colegas do Programa de Pós-Graduação por todas as discussões, aprendizados, e contribuições ao trabalho. Em especial, muito obrigada Prof. David Bianchini por ter me transmitido paz, serenidade e entendimento não só da sua impecável disciplina, mas também sobre a vida.

Agradeço às empresas Holcim-Lafarge do Brasil, GCP Applied Technologies e a CST Isoladores Santa Terezinha, pela doação do cimento, do aditivo e do resíduo de porcelana.

“Senhor! Fazei de mim um instrumento da vossa paz
Onde houver ódio, que eu leve o amor
Onde houver ofensa, que eu leve o perdão
Onde houver discórdia, que eu leve a união
Onde houver dúvidas, que eu leve a fé
Onde houver erro, que eu leve a verdade
Onde houver desespero, que eu leve a esperança
Onde houver tristeza, que eu leve a alegria
Onde houver trevas, que eu leve a luz
Ó Mestre, fazei que eu procure mais
consolar, que ser consolado
compreender, que ser compreendido
amar, que ser amado
Pois é dando que se recebe
É perdoando que se é perdoado
E é morrendo que se vive para a vida eterna”.

Oração de São Francisco de Assis

RESUMO

CAVALIERE, Ivanny Soares Gomes. O Estudo comparativo do módulo de elasticidade de concretos convencionais e concretos com materiais alternativos. 2020. 155f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020.

Em virtude da preocupante situação ambiental e do impulsionamento do crescimento da economia, muito tem sido pesquisado sobre o uso de Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Os resíduos de RCD podem ser reciclados e reutilizados dentro da própria indústria da construção civil, como sub-base de pavimentos, e na produção de concretos não estruturais e estruturais. Muitos pesquisadores já verificaram a viabilidade de incorporar Agregados Reciclados (AR) em concretos estruturais, no entanto, muitos deles não investigaram a relação entre a tensão absorvida e a deformação destes concretos. A relação entre a tensão e a deformação do concreto é um parâmetro importante a ser conhecido no estado limite de serviço, incluindo o controle dos deslocamentos verticais e horizontais, bem como das aberturas das fissuras. Por isso, o objetivo desta pesquisa é avaliar o comportamento do módulo de elasticidade dos concretos convencionais e produzidos com materiais alternativos, sendo eles: agregados reciclados de concreto (ARC), e porcelana (ARP). Foram estudados dois concretos de resistência característica à compressão diferentes, mas ambos situados na classe I da NBR 8953(ABNT, 2015). Os resultados obtidos de módulo de elasticidade foram comparados com os valores estimados pela norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) e pelas normas estrangeiras *fib* Model Code 2010, Eurocode 2:2004 e ACI 318:2014. Por fim, ao contrário do ARC, a incorporação de porcelana não afetou significativamente a resistência à compressão do concreto, e a inserção de ambos agregados reciclados afetou substancialmente o módulo de elasticidade obtido por ensaios mecânicos. Os módulos obtidos dos concretos convencionais foram menores que os estimados pela NBR 6118:2014 e pelo *fib* Model Code, indicando falta de segurança de uso por parte dessas normas. As normas Eurocode 2:2004 e ACI 318:2014 indicaram segurança, visto que seus valores estimados foram menores que os módulos obtidos. Ao mudar a geometria do corpo de prova utilizado no ensaio da resistência à compressão, verificou-se que a resistência à compressão feita em corpos de prova cúbicos é superior a resistência de corpos de prova cilíndricos, sendo a influência mais acentuada nos concretos de 20MPa.

Palavras-chave: concreto estrutural; módulo de elasticidade; agregados reciclados; agregado reciclado de concreto; porcelana; sustentabilidade.

ABSTRACT

CAVALIERE, Ivanny Soares Gomes. The comparative study of the elastic modulus of conventional concretes and with alternative materials. 2020. 155p. Dissertation (Master's in Urban Infrastructure Systems) – Postgraduate Program in Urban Infrastructure Systems, Pontifical Catholic University of Campinas (PUC-Campinas), Campinas, 2020.

Due to the worrisome environmental situation and the boost in economic growth, a lot has been researched on the use of Construction and Demolition Waste (CDW). CDW waste can be recycled and reused within the construction industry itself, as pavement sub-base, and in the production of non-structural and structural concretes. Many researchers have already validated the feasibility of incorporating Recycled Aggregates (RA) into structural concretes; however, many of them have not investigated the relationship between the absorbed stress and the deformation of these concretes. The concrete stress-deformation relationship is an important parameter to be known in the service limit state, including the control of vertical and horizontal displacements, as well as the crack openings. Therefore, the aim of this research is to evaluate the elastic modulus of conventional concretes and produced with alternative materials, such as: recycled aggregates of concrete (RAC), and waste porcelain aggregates (WPA). Two different compressive strengths will be studied, but both belong to class I of NBR 8953 (ABNT, 2015). The results of experimental elastic modulus were compared with the values predicted by the Brazilian standard NBR 6118 (ABNT, 2014) and by foreign standards *fib* Model Code 2010, Eurocode 2: 2004 and ACI 318: 2014. Finally, unlike RCA, the incorporation of porcelain did not significantly affect the compressive strength of concrete, and the insertion of both recycled aggregates substantially affected the modulus of elasticity obtained by mechanical tests. The obtained modulus from conventional concrete were lower than those predicted by NBR 6118:2014 and *fib* Model Code, indicating lack of safety of serviceability by these standards. Eurocode 2:2004 and ACI 318:2014 standards indicated safety, since their predicted values were lower than obtained modulus. By changing the geometry of the specimen used in the compressive strength test, it was found that the compressive strength casted in cubic specimens is superior to the strength of cylindrical specimens, with the most pronounced influence on 20MPa concrete.

Key-words: structural concrete; elastic modulus; recycled aggregates; recycled aggregate of concrete; porcelain; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. O Panteão de Roma.	26
Figura 2. (a) representação esquemática da exsudação no concreto fresco recém-lançado; (b) falha de aderência por cisalhamento em um corpo de prova ensaiado à compressão uniaxial.	37
Figura 3. Modelo de uma pasta de cimento Portland bem hidratada.	37
Figura 4. Variações na porosidade capilar com diferentes relações água/cimento e grau de hidratação.	39
Figura 5. Representação esquemática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento no concreto.	40
Figura 6. Geração de resíduos no município de Campinas.	42
Figura 7. (a) Agregado Reciclado de Concreto (ARC); (b) Agregado Reciclado Misto (ARM).	44
Figura 8 - Resíduos de concreto gerados pela indústria de pré-moldados	44
Figura 9. Resultados de resistência à compressão por Ramadevi e Chitra (2017)	46
Figura 10. Resultados das propriedades mecânicas obtidas por Araujo et al. (2016)	47
Figura 11. (a) Armazenamento de isoladores de porcelana na Estação Avançada; (b) Detalhe do isolador.	48
Figura 12. (a) MEV porcelana graúda sem esmalte e (b) MEV porcelana graúda com esmalte.	49
Figura 13. Zona de transição do traço (a) sem esmalte e do traço (b) com esmalte.	50
Figura 14. Comportamento típico σ - ϵ da pasta de cimento, agregado e concreto	53
Figura 15. Representação do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial.	54

Figura 16. Diferentes tipos de módulos de elasticidade e o método para sua determinação.	56
Figura 17. Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A com tensão σ fixa.	58
Figura 18. Valores estimativos dos módulos E_{ci} e E_{cs} em função do f_{ck}	61
Figura 19. Método de velocidade de pulso ultrassônico (a) aparelho de ultrassom do tipo PUNDIT Lab; (b) medida longitudinal da velocidade da onda.	63
Figura 20. Tensão x deformação do (a) concreto sem ARC, rompido aos 63 dias com a/agl de 0,45; (B) concreto com ARC, rompido aos 28 dias com a/agl de 0,65.	66
Figura 21. Resultados de módulo estático e dinâmico de elasticidade apresentados por Estolano et al. (2018).	67
Figura 22. Nomenclatura das composições de concreto.	69
Figura 23 - Fluxograma de pesquisa.	70
Figura 24. Moldagem dos corpos de prova do concreto C20.	70
Figura 25. (a) areia média e (b) brita de origem basáltica.	72
Figura 26. Curva granulométrica da areia natural.	73
Figura 27. Curva granulométrica da brita natural.	73
Figura 28. (a) ARC; (b) ARP.	74
Figura 29. Processo de reciclagem dos resíduos de isoladores elétricos de porcelana.	75
Figura 30. Curva granulométrica do agregado reciclado de concreto (ARC) e porcelana (ARP) em comparação a curva da brita natural.	75
Figura 31. Materiais separados para a produção dos concretos.	78
Figura 32. Ensaio do abatimento do tronco de cone de Abrams do C40.	79
Figura 33. Ensaio de resistência à compressão em (a) corpos de prova cilíndrico e (b) corpos de prova cúbico.	80
Figura 34. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	81

Figura 35. Ensaio de módulo de elasticidade.....	81
Figura 36. Análise da resistência à compressão axial dos concretos.....	98
Figura 37. Análise comparativa da resistência à compressão axial cúbica e cilíndrica dos concretos.....	102
Figura 38. Análise do módulo de elasticidade obtido dos concretos.....	107
Figura 39. Comparação da resistência à tração obtida e estimada por normas dos concretos.....	112
Figura 40. Comparação do módulo obtida e estimado dos concretos convencionais e com agregados reciclados de concreto (ARC).....	114
Figura 41. Comparação do módulo obtido e estimado dos concretos convencionais e com agregados reciclados de porcelana (ARP).....	115
Figura 42. Comparação entre o módulo obtido e o módulo estimado com diferentes valores de α_E de concretos convencionais e com ARC.....	116
Figura 43. Comparação entre o módulo obtido e o módulo estimado com diferentes valores de α_E de concretos convencionais e com ARP.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Revisão bibliométrica	24
Tabela 2. Compostos principais do cimento.	28
Tabela 3. Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland	29
Tabela 4. Limites de composição do cimento Portland (porcentagem em massa)	30
Tabela 5. Porosidade de algumas rochas comuns	32
Tabela 6. Benefícios obtidos com o uso de aditivos redutores de água.	35
Tabela 7. Classificação dos resíduos de construção e demolição	43
Tabela 8. Índice da expressão de previsão do módulo de deformação do concreto devido à consistência do concreto	61
Tabela 9 – Comparação da equação estimativa do módulo de deformação da NBR 6118:2014 com as equações propostas por normas estrangeiras.	65
Tabela 10. Modelos propostos para estimativa do módulo de elasticidade de concretos com agregados reciclados.	68
Tabela 11 – Caracterização física dos agregados miúdos e graúdos naturais	72
Tabela 12. Caracterização física dos agregados graúdos reciclados.	74
Tabela 13. Dosagem dos concretos C20's	77
Tabela 14. Dosagem dos concretos C40's	77
Tabela 15 - Quantidade de corpos de prova por ensaio	79
Tabela 16. Equação de resistência característica segundo cada norma.	83
Tabela 17. Resistência média à compressão axial cilíndrica ($f_{cm,cilind}$) dos concretos.	90
Tabela 18. Resistência média à compressão axial cúbica ($f_{cm,cúb}$) dos concretos.	91
Tabela 19. Resistência média à tração por compressão diametral ($f_{ctm,sp}$) dos concretos.	92

Tabela 20. Módulo de elasticidade obtido dos concretos.	93
Tabela 21. Resistência característica à compressão (f_{ck}) dos concretos de 20MPa.	93
Tabela 22. Resistência característica à compressão (f_{ck}) dos concretos de 40MPa.	94
Tabela 23. Módulo de elasticidade estimado dos concretos de 20Mpa.	94
Tabela 24. Módulo de elasticidade estimado dos concretos de 40MPa	95
Tabela 25. Resistência à tração estimada pelas normas consultadas.....	95
Tabela 26. Análise ANOVA da resistência à compressão axial dos concretos de 20MPa (resultados sem CV).	96
Tabela 27. Análise ANOVA da resistência à compressão axial dos concretos de 20MPa (resultados com CV).	96
Tabela 28. Análise ANOVA da resistência à compressão axial dos concretos de 40MPa (resultados sem CV).	97
Tabela 29. Análise ANOVA da resistência à compressão axial dos concretos de 40MPa (resultados com CV).	97
Tabela 30. Análise ANOVA da resistência à compressão cilíndrica e cúbica dos concretos de 20MPa (resultados sem CV).	100
Tabela 31. Análise ANOVA da resistência à compressão cilíndrica e cúbica dos concretos de 20MPa (resultados com CV).	100
Tabela 32. Análise ANOVA da resistência à compressão cilíndrica e cúbica dos concretos de 40MPa (resultados sem CV).	101
Tabela 33. Análise ANOVA da resistência à compressão cilíndrica e cúbica dos concretos de 40MPa (resultados com CV).	101
Tabela 34. Relação da resistência à compressão cilíndrica e da resistência à compressão cúbica.	104
Tabela 35. Razão da resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) e à resistência à compressão axial (f_{cm}) dos concretos.	104

Tabela 36. Análise ANOVA do módulo médio de elasticidade dos concretos de 20MPa (resultados sem CV).	105
Tabela 37. Análise ANOVA do módulo médio de elasticidade dos concretos de 20MPa (resultados com CV)	106
Tabela 38. Análise ANOVA do módulo médio de elasticidade dos concretos de 40MPa (resultados sem CV).	106
Tabela 39. Análise ANOVA do módulo médio de elasticidade dos concretos de 40MPa (resultados com CV).	106
Tabela 40. Razão dos valores calculados de resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) e à resistência à compressão dos concretos	110
Tabela 41. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C20	134
Tabela 42. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C40.	135
Tabela 43. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C20-ARC30.....	135
Tabela 44. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C20-ARC50.....	136
Tabela 45. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C20-ARP30.....	136
Tabela 46. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C20-ARP50.....	137
Tabela 47. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C40-ARC30.....	137
Tabela 48. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C40-ARC50.....	138
Tabela 49. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C40-ARP30.....	138
Tabela 50. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C40-ARP50.....	139

Tabela 51. Valores individuais de resistência à compressão cúbica do concreto C20 e C40.....	140
Tabela 52. Valores individuais de resistência à compressão cúbica do concreto C20-ARC30 e C20-ARC50.....	141
Tabela 53. Valores individuais de resistência à compressão cúbica do concreto C20-ARP30 e C20-ARP50.	141
Tabela 54. Valores individuais de resistência à compressão cúbica do concreto C40-ARC30 e C40-ARC50.....	142
Tabela 55. Valores individuais de resistência à compressão cúbica do concreto C40-ARP30 e C40-ARP50.	142
Tabela 56. Valores individuais de resistência à tração por compressão diametral do concreto C20 e C40.	143
Tabela 57. Valores individuais de resistência à tração por compressão diametral do concreto C20-ARC30 e C20-ARC50.	144
Tabela 58. Valores individuais de resistência à tração por compressão diametral do concreto C20-ARP30 e C20-ARP50.....	144
Tabela 59. Valores individuais de resistência à tração por compressão diametral dos concretos C40-ARC30 e C40-ARC50.....	145
Tabela 60. Valores individuais de resistência à tração por compressão diametral dos concretos C40-ARP30 e C40-ARP50.	145
Tabela 61. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20 aos 7 dias.	146
Tabela 62. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20 aos 28 dias.	147
Tabela 63. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40 aos 7 dias.	147
Tabela 64. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40 aos 28 dias.	148
Tabela 65. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARC30 aos 7 dias.	148

Tabela 66. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARC30 aos 28 dias.	149
Tabela 67. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARC50 aos 7 dias.	149
Tabela 68. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARC50 aos 28 dias.	150
Tabela 69. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARP30 aos 7 dias.	150
Tabela 70. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARP30 aos 28 dias.	151
Tabela 71. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARP50 aos 7 dias.	151
Tabela 72. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARP50 aos 28 dias.	152
Tabela 73. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARC30 aos 7 dias.	152
Tabela 74. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARC30 aos 28 dias.	153
Tabela 75. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARC50 aos 7 dias.	153
Tabela 76. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARC50 aos 28 dias.	154
Tabela 77. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARP30 aos 7 dias.	154
Tabela 78. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARP30 aos 28 dias.	155
Tabela 79. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARP50 aos 7 dias.	155
Tabela 80. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARP50 aos 28 dias.	156

SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
1.1. Objetivo geral.....	24
1.2. Objetivos específicos.....	24
1.3. Estrutura do trabalho	25
2. O CONCRETO	26
2.1. GENERALIDADES.....	26
2.2. MATERIAIS CONSTITUINTES	28
2.2.1. Cimento.....	28
2.2.2. Água.....	30
2.2.3. Agregados.....	30
2.2.4. Adições minerais	33
2.2.5. Aditivos.....	34
2.3. MICROESTRUTURA DO CONCRETO	36
2.3.1. Fase agregado	36
2.3.2. Pasta de cimento hidratada	37
2.3.3. Zona de transição.....	39
3. MATERIAIS ALTERNATIVOS NO CONCRETO	41
3.1. GENERALIDADES.....	41
3.2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO – RCD	41
3.2.1. Agregado Reciclado de Concreto – ARC	44
3.2.2. Agregado Reciclado de Porcelana – ARP	47
4. O MÓDULO DE ELASTICIDADE	51
4.1. FATORES INTERVENIENTES.....	54
4.2. MÉTODOS DE ENSAIOS.....	56
4.2.1. Método estático	57
4.2.2. Método dinâmico	62
4.3. EQUAÇÕES PROPOSTAS POR NORMAS PARA ESTIMAR O MÓDULO	64
4.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO COM ARC	66
4.4.1. Módulo de elasticidade obtido de concretos reciclados	67

4.4.2. Módulo de elasticidade estimado de concretos reciclados	67
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	69
5.1. SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES	71
5.1.1. Cimento.....	71
5.1.2. Aditivo	71
5.1.3. Água de amassamento.....	71
5.1.4. Agregados graúdos e miúdos naturais	72
5.1.5. Agregados graúdos reciclados	73
5.2. DOSAGEM DOS CONCRETOS.....	76
5.2.1. Procedimento de mistura.....	77
5.3. ENSAIOS MECÂNICOS.....	78
5.3.1. Ensaio no estado fresco	79
5.3.2. Ensaio no estado endurecido	79
5.4. ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	82
5.5. CÁLCULOS ESTIMADOS.....	82
5.5.1. Cálculo estimado da resistência à tração	84
5.5.2. Cálculo estimado do módulo de elasticidade.....	86
6. RESULTADOS	90
6.1. RESULTADOS OBTIDOS.....	90
6.1.1. Resistência à compressão axial cilíndrica	90
6.1.2. Resistência à compressão axial cúbica	91
6.1.3. Resistência à tração por compressão diametral	91
6.1.4. Módulo de elasticidade.....	92
6.2. RESULTADOS DE CÁLCULO.....	93
6.2.1. Módulo de elasticidade estimado	94
6.2.2. Resistência à tração estimada.....	95
7. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	96
7.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	96
7.1.1. Análise da resistência à compressão axial obtida.....	96
7.1.2. Relação da resistência à compressão axial cilíndrica e cúbica obtidas	
99	
7.1.3. Relação entre resistência à compressão axial obtida e a resistência à tração obtida	104

7.1.4. Análise do módulo de elasticidade obtido.....	105
7.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE CÁLCULO.....	109
7.2.1. Análise da resistência à tração estimada	109
7.2.2. Análise do módulo de elasticidade estimado	110
7.3. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADO OBTIDO E ESTIMADO	111
7.3.1. Relação da resistência à tração obtida e estimada.....	111
7.3.2. Relação do módulo de elasticidade obtido e estimado	113
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	117
9. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	120
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
ANEXO A	134
ANEXO B	140
ANEXO C	143
ANEXO D	146

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conhecida como a maior causadora de impacto ambiental, a cadeia produtiva da construção civil está diretamente vinculada ao desenvolvimento econômico de um país. Segundo Stasiak-Betlejewska e PotKány (2015), o Produto Interno Bruto (PIB) da construção civil representa de 7% a 10% em países desenvolvidos e de 3% a 6% em países em desenvolvimento.

Como consequência do desenvolvimento econômico de um país em conjunto com o aumento exponencial da população, intensifica-se a necessidade de extrair mais recursos naturais, a fim de atender ao nível de exigência da sociedade, mediante construção de novos hospitais, obras de saneamento, construção de novas escolas, obras de infraestrutura de transportes e comunicações (ISAIA, 2017).

O consumo de minerais para construção representa 40% do total extraído de recursos naturais, e infelizmente o consumo está acima do que a natureza é capaz de fornecer e ocasiona o aumento da geração de resíduos e da poluição ambiental (ISAIA, 2017). O mesmo autor corrobora com a certeza de que todos os materiais comercializados também se tornarão resíduos, e o acúmulo dos mesmo com a já existente escassez localizada de recursos naturais, confere urgência de adoção de estratégias de desmaterialização¹ dos produtos da construção civil.

Os resíduos provenientes da indústria da construção civil são denominados Resíduos de Construção e Demolição (RCD), e são constantemente descartados ilegalmente e inadequadamente, comprometendo a paisagem urbana, provocando assoreamento de recursos hídricos, causando a contaminação do solo, contribuindo para o entupimento dos sistemas de drenagem urbana, acarretando enchentes, e causando grande risco à saúde pública através da proliferação de vetores (MOREIRA, 2010).

¹ desmaterialização – redução da quantidade de matéria e energia utilizada ao longo do ciclo de vida do produto (ISAIA, 2017).

Estima-se que, os municípios brasileiros coletaram no ano de 2017 cerca de 45 milhões de toneladas de RCD, representando 58% do volume total dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados anuais. Estes dados foram fornecidos pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2017).

Diante dessa grande geração de resíduos de RCD, uma opção viável é aproveitar esses resíduos dentro da própria indústria da construção civil como materiais alternativos aos materiais naturais. Alguns exemplos de materiais alternativos na produção de concretos são: borracha de pneus veiculares (DA SILVA et al., 2015), fibras de sisal e rami (BORGES et al., 2019), fibras de coco (LEMOS E FRENDEBERG, 2019), cinzas do bagaço da cana de açúcar (SAMPAIO et al., 2014), isoladores elétricos de porcelana (CAMPOS E PAULON, 2015), agregados reciclados de RCD (CAMPOS et al., 2018) e os resíduos de vidro (JUNIOR et al., 2019).

No Brasil, só é possível empregar os agregados reciclados em concretos sem função estrutural e em obras de pavimentação viária, seguindo as premissas da norma NBR 15116:2004 (ABNT, 2004). Em contrapartida, os países participantes da RILEM (*International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*) fazem uso da normativa TC 121-DRG (RILEM, 1994), a qual prescreve orientações para a produção de concretos estruturais com agregados reciclados, de acordo com a Eurocode 2:2004 (CEN, 2004).

As características inerentes aos agregados reciclados, tais como: alta porosidade, elevada heterogeneidade, baixa resistência e alta absorção de água, influenciam no desempenho do concreto em seu estado fresco e nas suas propriedades mecânicas (LOVATO et al., 2012). E mesmo apresentando tais características, o uso de agregados reciclados na produção de concretos é considerado fundamental para o fomento de práticas sustentáveis na construção civil (CAMPOS, 2017).

Para validar o uso de agregados reciclados em estruturas, se faz necessário estudar o módulo de elasticidade do concreto, pois o mesmo é considerado um dos parâmetros fundamentais para o dimensionamento estrutural, porque com ele é

possível estimar o comportamento em serviço da estrutura sob a ação de cargas e determinar as distribuições de deformações e deslocamentos (GUJEL, 2014).

O módulo de elasticidade do concreto é tipicamente estimado a partir de uma resistência à compressão ou à tração especificada (TIBBETTS et al., 2018). E assim como os demais parâmetros do dimensionamento estrutural, o módulo pode ser estimado por equações empíricas ou obtido por meio de ensaios laboratoriais. (ALMEIDA, 2012).

No Brasil, o módulo de elasticidade pode ser estimado através da equação proposta pela NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), que relaciona diretamente o módulo de elasticidade com a resistência à compressão do concreto e com a natureza do agregado graúdo utilizado. As normas estrangeiras *fib* Model Code 2010 (*fib*, 2010), Eurocode 2:2004 (CEN, 2004) e ACI 318:2014 (ACI, 2014) sugerem diferentes equações para calcular o módulo de elasticidade. E como cada norma considera um valor diferente de desvio-padrão no cálculo da resistência característica à compressão, os valores de módulo estimados pelas normas diferem entre si.

E como o módulo de elasticidade admite influência de outros fatores intervenientes em seu resultado final, os valores obtidos por ensaios mecânicos diferem dos valores estimados por normas (WU et al., 2001; ARAUJO et al., 2012; BEUSHAUSEN&DITTMER, 2015; SANTOS et al., 2017; TIBBETS et al., 2018), por mais que as equações propostas considerem gráficos constituídos de valores empíricos.

Dada a importância do estudo do módulo de elasticidade, esta e outras palavras-chave utilizadas neste trabalho foram incluídas em uma revisão bibliométrica. A revisão bibliométrica foi realizada nas fontes de pesquisa Google Scholar, Elsevier e Periódicos CAPES, por isso a Tabela 1 exhibe o número de assuntos encontrados relacionando as palavras-chave dos últimos 3 anos.

Tabela 1. Revisão bibliométrica

Palavras-chave	Fontes de pesquisa		
	Google Scholar	Elsevier	Capes Periódicos
módulo de elasticidade	9690	8	93
módulo de elasticidade do concreto	4500	2	10
módulo de elasticidade do concreto com resíduos	1520	0	1
agregados reciclados	15400	7	55
concreto com agregados reciclados	9840	0	17
materiais alternativos	13800	15	330
sustentabilidade	29700	110	3076

Fonte: a autora.

1.1. Objetivo geral

Avaliar o módulo de elasticidade de concretos produzidos com materiais alternativos e compará-lo com o módulo de elasticidade de concretos convencionais para verificar a semelhança entre eles e a viabilidade de uso destes concretos.

1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta dissertação estão relacionados abaixo:

- a) Estudar se o comportamento mecânico dos concretos com materiais alternativos possui similaridades entre eles quando os agregados reciclados são diferentes (ARC x ARP);
- b) Analisar se as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com agregados alternativos desta pesquisa apresentam valores semelhantes ao dos concretos convencionais;
- c) Verificar se os valores de módulo de elasticidade estimados pela NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) e pelas normas internacionais (Eurocode 2:2004 (CEN, 2004), ACI318:2014 (ACI, 2014) e *fib* Model Code 2010 (FIB, 2010)) são semelhantes entre si;
- d) Comparar se os valores estimados de módulo de elasticidade são semelhantes aos valores obtidos de todos os concretos desta pesquisa (os de agregados convencionais e aqueles com agregados reciclados).

- e) Comparar se a resistência média à compressão dos concretos obtida em corpos de prova cilíndricos (10cm x 20cm) é semelhante a resistência de corpos de prova cúbicos (10cm x 10cm x 10cm).

1.3. Estrutura do trabalho

O presente trabalho possui nove capítulos e está estruturado conforme exposto a seguir.

O Capítulo 1 consiste na contextualização dos assuntos abordados no decorrer do texto, apresenta a justificativa do estudo e os objetivos que se pretendem alcançar. No Capítulo 2 é apresentado o histórico do concreto convencional, as aplicações deste material, quantidade produzida anualmente, materiais constituintes e sua microestrutura.

O Capítulo 3 é dedicado ao estudo dos materiais alternativos utilizados neste trabalho (concreto e porcelana), origem e quantidade de geração desses resíduos, reciclagem e influência nas propriedades mecânicas do concreto. No Capítulo 4 é apresentado a definição do parâmetro módulo de elasticidade, métodos de obtenção e fatores intervenientes.

O Capítulo 5 consiste na apresentação do programa experimental, seleção dos materiais utilizados, o tipo de dosagem das composições, métodos de ensaios mecânicos realizados e descrição dos cálculos para estimar o módulo de elasticidade e resistência à tração dos concretos.

O Capítulo 6 reúne os resultados obtidos por ensaios mecânicos e de cálculo. No Capítulo 7 esses resultados são comparados, analisados estatisticamente e discutidos.

A conclusão deste trabalho é feita no Capítulo 8, e as sugestões para trabalhos futuros se encontra no Capítulo 9. Por fim, o Capítulo 10 compreende nas referências bibliográficas consultadas para a elaboração deste trabalho.

2. O CONCRETO

2.1. GENERALIDADES

Hoje considerado o material mais consumido pelo homem, o concreto moderno composto por cimento Portland, areia, brita e água muito se diferencia do primeiro concreto feito na história. Segundo Neville (2015), os gregos e romanos foram pioneiros na produção do concreto, pois utilizavam calcário calcinado¹ como aglomerante², e posteriormente misturaram cal e água, areia e pedra fragmentada, tijolos ou telhas em cacos. Helene e Andrade (2010) relatam que o uso mais espetacular do concreto foi na cúpula de maior vão livre da antiguidade, o Panteão de Roma (Figura 1), construído em 27 AC, com 44 metros. Este concreto foi obtido da mistura de cal hidratada³ com argila pozolânica⁴, que tornou o material concreto muito durável mas, ainda, com resistências baixas se comparadas às de hoje.

Figura 1. O Panteão de Roma.



Fonte: Fiederer, 2017.

¹ calcário calcinado – cal virgem (óxido de cálcio, CaO) obtida através de uma reação química de decomposição térmica liberando gás carbônico.

² aglomerante – material pulverulento com a finalidade de aglutinação de outros materiais, influenciando na resistência do material resultante.

³ cal hidratada – obtida ao se adicionar água na cal virgem, usualmente empregada na preparação de argamassas de assentamento e revestimento.

⁴ argila pozolânica – origina-se da alteração progressiva dos aluminossilicatos, minerais derivados do resfriamento rápido do magma após uma erupção vulcânica explosiva.

Com a queda do Império Romano e o início da idade média, houve um declínio na qualidade e uso do concreto, e somente no século XVIII (1701 a 1800) retomou o avanço da tecnologia do material. Por isso, somente em 1824, após a criação da patente do cimento Portland⁵, por John Aspdin na Inglaterra, deu-se início ao concreto conhecido de hoje. E com o avanço das pesquisas dos pesquisadores do quilate de Louis Vicat, Henry Le Châtelier e René Féret, trataram de tornar o concreto de cimento Portland, mais conhecido e mais confiável, resultando no interesse de seu uso generalizado em estruturas (HELENE, ANDRADE, 2010).

Nos dias de hoje, o índice de consumo do concreto é muito elevado. Mehta e Monteiro (2014) estimam que o consumo do concreto no mundo seja da ordem de 19 bilhões de toneladas métricas ao ano. Jacintho (2019) justifica este alto consumo por ser um excelente material para ser usado nas edificações, pela sua mobilidade nas formas, pela sua durabilidade e baixo custo de fabricação e manutenção. Mehta e Monteiro (2014) ainda enumeram outras razões, como:

- a) A capacidade do concreto enfrentar a ação da água sem grave deterioração;
- b) A facilidade de obter elementos estruturais de concreto com uma variedade de formas e tamanhos;
- c) O baixo custo e rápida disponibilidade do material para obra;
- d) E a resistência ao fogo e ao carregamento cíclico.

Por essas razões, o concreto tem vasta utilização na cadeia produtiva da construção civil, abrangendo desde a produção de elementos estruturais para construção de edificações (vigas, pilares, lajes), como para a produção de estruturas para armazenamento e transporte da água (reservatórios, cisternas, tubos) e produção de elementos estruturais mais complexos para uso na infraestrutura urbana (pontes, viadutos, pavimentos).

⁵ cimento Portland – pó fino produzido a partir da queima do calcário e argila, com posterior moagem e adição de uma pequena quantidade de gipsita (gesso), podendo receber também outras adições.

⁶ durabilidade – capacidade do material resistir à ação de intempéries, ataque químico, abrasão, e outras condições em serviço.

2.2. MATERIAIS CONSTITUINTES

O concreto é um material heterogêneo e altamente complexo, por isso é difícil estabelecer modelos exatos de sua estrutura. Contudo é possível compreendê-lo por meio das propriedades individuais de seus constituintes e através da relação entre eles (LEITE et al., 2018). Sendo assim, as características e propriedades do concreto dependerão da qualidade e proporções dos materiais constituintes que são: cimento, água, agregados, adições e aditivos.

2.2.1. Cimento

O cimento mais utilizado nas construções é o cimento Portland, e seu processo de fabricação consiste essencialmente em moer a matéria prima (calcário), misturar em proporções adequadas com a argila, queimar essa mistura em um grande forno rotativo (de temperatura variando entre 1450°C a 1550°C), e como resultado é obtido o clínquer. Nesta etapa de clínquerização, os nódulos de clínqueres (constituídos essencialmente por silicatos de cálcio⁷) são misturados com uma pequena quantidade de sulfato de cálcio (gipsita ou gesso), a fim de controlar as reações iniciais de pega⁸ e endurecimento⁹ do cimento (NEVILLE, 2015; MEHTA, MONTEIRO, 2014).

De acordo com ISAIA (2005), os principais compostos do clínquer são o C₃S (alita), C₂S (belita), C₃A (ferrita), os quais representam 90% em massa. NEVILLE (2015) também apresenta a Tabela 2 relacionando os quatro principais compostos do cimento.

Tabela 2. Compostos principais do cimento.

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviação
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂	C3S
Silicato dicálcico	2CaO.SiO ₂	C2S
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C3A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C4AF

Fonte: adaptada pela autora de Neville (2015).

⁷ silicato de cálcio – principal produto da hidratação do cimento Portland e é o principal responsável pela resistência do cimento.

⁸ pega – refere-se a mudança do estado fluido para um estado rígido da pasta de cimento. Não confundir com “pega de endurecimento”, que se refere ao aumento da resistência de uma pasta de cimento depois da pega.

⁹ endurecimento – também conhecido como “pega de endurecimento”, que se refere ao aumento da resistência de uma pasta de cimento depois da pega.

Além desses compostos, Neville (2015) relata outros compostos secundários presentes no cimento, como MgO, TiO₂, MnO₂, K₂O e Na₂O, sendo que dois destes compostos secundários possuem particular interesse: os óxidos de sódio (Na₂O) e os óxidos de potássio (K₂O) conhecidos como os álcalis¹⁰.

Salvo os compostos obtidos através da fabricação do cimento, também é usual incorporar adições minerais como substituição parcial do clínquer Portland. Senff et al. (2010) escrevem que a principal estratégia desta substituição é aprimorar a durabilidade dos materiais e para Mehta e Monteiro (2014) a razão original de se produzir os cimentos Portland compostos é de se obter economia no custo do material. No Brasil, a norma NBR 16697:2018 (ABNT, 2018) apresenta as designações normalizadas, siglas e classes do cimento Portland comum e composto na Tabela 3. A

Tabela 4 reúne os limites de composição.

Tabela 3. Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	sem adição	CP I	25, 32, ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b
	com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32, ou 40 ^c	
	Não estrutural	CPB	-	-

^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^c As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta norma para esse tipo de cimento.

Fonte: adaptada pela autora da NBR 16697:2018.

¹⁰ álcalis – Os álcalis reagem com os agregados e provocam a desintegração do concreto, além de influenciarem na velocidade de hidratação.

Tabela 4. Limites de composição do cimento Portland (porcentagem em massa)

Designação normalizada	Siglas	Clínquer+Sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	95 - 100	0 - 5		
	CP I-S	90 - 94	0	0	6 - 10
Cimento Portland composto	CP II-E	51 - 94	06 - 34	0	0 - 15
	CP II-F	71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
	CP II-Z	75 - 89	0	0	11 - 25
Cimento Portland de alto forno	CP III	25 - 65	35 - 75	0	0 - 10
Cimento Portland pozolânico	CP IV	45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V ^a	90 - 100	0	0	0 - 10
Cimento Portland branco	CPB	75 - 100	-	-	0 - 25
	CPB	50 - 74	-	-	26 - 50

^a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Fonte: adaptada pela autora da NBR16697:2018.

2.2.2. Água

Segundo Neville (2015), a qualidade da água tem um papel importante no comportamento do concreto, isto porque impurezas contidas na água podem influenciar negativamente a resistência do concreto ou causar manchas da sua superfície, ou resultar corrosão na armadura.

2.2.3. Agregados

Os agregados são materiais granulares que podem ser encontrados de forma natural ou artificial. Em geral, os agregados encontrados na natureza, denominados agregados minerais naturais, são os seixos, cascalhos, a pedra britada (proveniente das jazidas naturais) e a areia (obtida em depósitos de leitos de rios). Os agregados artificiais compreendem a argila e o folhelho expandido (materiais termicamente processados), a escória de alto forno e as cinzas volantes (produzidos a partir de rejeitos industriais) (NEVILLE, 2015).

A classificação dos agregados é comumente feita conforme a dimensão das partículas (granulometria), a massa específica e origem (como descrito

acima). No que diz respeito a granulometria dos agregados, a NBR 7211:2009 (ABNT, 2009) os divide em duas categorias: agregado graúdo e miúdo. O agregado graúdo consiste em grãos maiores do que 4,75 mm (retidos na peneira nº 4,75mm), e o agregado miúdo grãos menores que 4,75 mm (passam na peneira nº 4,75mm). Com referência a densidade dos agregados, Mehta e Monteiro (2014) escrevem que a maioria dos agregados mineiras naturais possuem massa específica em torno de 1520 a 1680 kg/m³, sendo a massa específica dos agregados leves menor que 1120 kg/m³, e a massa específica dos agregados pesados superior a 2080 g/m³.

Os agregados, diferente do cimento, são geralmente considerados inertes por não possuírem propriedades ligantes (RIBEIRO JUNIOR, 2015). Entretanto, esse conceito antigo de que o agregado seja um material inerte vem sendo seriamente questionado, visto que muitas de suas características são relevantes para a composição final do concreto. Mehta e Monteiro (2014) dividem o estudo dessas características em três categorias:

- a) Características dependentes da porosidade: massa específica, absorção de água, resistência, dureza, módulo de elasticidade e sanidade¹¹;
- b) Características dependentes das condições prévias de exposição e fatores relacionados ao processo de fabricação: tamanho, forma e textura das partículas;
- c) Características dependentes da composição química e mineralógica: resistência, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias¹² presentes.

Para fins de dosagem do concreto, se faz necessário conhecer o arranjo das partículas do agregado dentro do concreto, e isto é possível através da determinação da massa específica e a massa unitária.

¹¹ sanidade – capacidade do agregado resistir as variações excessivas de volume devidas as variações das condições físicas (congelamento e degelo).

¹² substâncias deletérias – componentes minoritários que podem afetar adversamente a trabalhabilidade, a pega, o endurecimento e as características de durabilidade do concreto.

Além de conhecer o empacotamento das partículas de agregado, é importante definir as proporções de água na mistura do concreto, e para isto ser viável é comum obter dados relativos à capacidade de absorção¹³, absorção efetiva¹⁴ e umidade superficial¹⁵ do agregado. Quanto aos valores de resistência à compressão, dureza e módulo de elasticidade dos agregados, esses são muito influenciados pela porosidade (Tabela 5). A porosidade pode ser determinada facilmente a partir da capacidade de absorção do agregado (MEHTA, MONTEIRO, 2014).

Tabela 5. Porosidade de algumas rochas comuns

Grupo de rochas	Porosidade %
Arenito	0,0 – 48,0
Quartzito	1,9 – 15,1
Calcário	0,0 – 37,6
Granito	0,4 – 3,8

Fonte: adaptada pela autora de Neville, (2015).

A especificação do tamanho, forma e textura dos agregados é importante devido a sua influência na trabalhabilidade do concreto e o custo, tendo em vista que as partículas de textura áspera, angulosas e alongadas necessitam de mais pasta de cimento para se obter uma boa trabalhabilidade, isto quando comparadas as partículas lisas e arredondadas (MEHTA, MONTEIRO, 2014). Quanto as características de dimensão máxima e composição mineralógica, a influência é mais ressaltada nas propriedades mecânicas e na durabilidade do concreto. Bilesky et al. (2018) ao estudarem o módulo de elasticidade em concretos produzidos com agregados graúdos de diferentes naturezas petrográficas (calcário, granito e diabásio), foram capazes de concluir experimentalmente que para uma mesma relação água/cimento, o módulo de elasticidade é influenciado pela natureza mineralógica do agregado graúdo.

¹³ capacidade de absorção – definida como a quantidade total de água necessária para levar um agregado da condição seca em estufa a condição SSS (saturada superfície seca).

¹⁴ absorção efetiva – definida como a quantidade de água necessária para levar um agregado da condição seca ao ar a condição SSS (saturada superfície seca).

¹⁵ umidade superficial – quantidade de água que vai além da necessária para condição SSS (saturada superfície seca).

2.2.4. Adições minerais

Segundo Mehta e Monteiro (2014) as adições minerais são geralmente materiais silicosos finamente divididos que podem ser obtidas a partir de fontes naturais ou de alguns subprodutos industriais. Sua aplicação é feita na produção de concreto ou argamassa, podendo ser adicionada à massa imediatamente antes ou durante a mistura. As adições provenientes de fontes naturais são difíceis de serem classificadas devido aos diversos constituintes reativos que contêm nelas, no entanto, com base no constituinte principal pode-se classificar como vidros vulcânicos¹⁶, tufos vulcânicos¹⁷, argilas ou folhelhos calcinados¹⁸ e terras diatomáceas¹⁹. E as adições que são subprodutos industriais são a cinza volante (da combustão de carvão em usinas termoelétricas), escória de alto-forno (da produção do ferro fundido), sílica ativa (da indução de fornos industriais) e cinza de casca de arroz (das carapaças produzidas durante o beneficiamento do arroz colhido).

As adições minerais possuem diversas funções, porém elas não modificam apenas uma característica do concreto, mas sim várias que podem ser benéficas ou não. E dentre os prováveis benefícios podem ser relacionados: o aumento na resistência à compressão, modificações na trabalhabilidade, redução nos custos de produção de concretos e argamassas e até mesmo destinação adequada dos resíduos industriais (RAISDORFER, 2015). Mehta e Monteiro (2014) também relatam outros benefícios, como melhor resistência à fissuração térmica devido ao baixo calor de hidratação, aumento de impermeabilidade, fortalecimento da zona de transição na interface e durabilidade muito maior ao ataque por sulfato e à expansão pela relação álcali-agregado.

¹⁶ vidros vulcânicos – possui reatividade com a cal em função da presença de aluminossilicatos vítreo inalterado.

¹⁷ tufos vulcânicos – são produtos da alteração hidrotérmica do vidro vulcânico, portanto desenvolve características cimentantes semelhantes aos vidros vulcânicos.

¹⁸ argilas ou folhelhos calcinados – produtos que não apresentam reatividade considerável com a cal, apenas se as estruturas cristalinas dos materiais argilosos são destruídas por tratamento térmico.

¹⁹ terras diatomáceas – compostas de carapaças de esqueletos de algas aquáticas, as diatomitas são extremamente reativas a cal, mas por apresentar microestrutura porosa é responsável por uma demanda elevada de água.

2.2.5. Aditivos

Definido por Neville (2015), o aditivo é um produto químico adicionado à mistura de concreto em teores não maiores que 5% em relação à massa de cimento. Podem ser utilizados no estado sólido ou líquido, sendo o último mais comum devido a facilidade de ser disperso e uniforme na mistura. Neville (2015) também escreve que os aditivos não somente devem ser cuidadosamente quantificados, mas também devem ser descarregados na parte correta do ciclo da mistura e na vazão correta, como descarregados na parte final da descarga da água de amassamento.

Os aditivos são adicionados na intenção de modificar e melhorar uma ou mais características do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido (PETRUCCI, 2005). Essas características são obtidas com o uso de dois tipos de aditivos químicos: os tensoativos e os modificadores de pega. Os aditivos tensoativos (surfactantes) são usados para incorporação de ar ou redução de água das misturas de concreto, e são eles (MEHTA e MONTEIRO, 2014):

- a) **Aditivos incorporadores de ar:** geralmente compostos de sais de resinas de madeira, materiais proteicos, ácidos de petróleo e alguns detergentes sintéticos. Possui a finalidade principal de incorporar ar à mistura, principalmente para melhorar a trabalhabilidade de concretos que contem menos cimento e água, de agregados de textura áspera ou agregados leves, e são também usados para resistir aos ciclos de gele e degelo.

- b) **Aditivos redutores de água:** são compostos por sais, modificações e derivados de ácidos lignossulfônicos, ácidos carboxílicos hidroxilados e polissacarídeos. Sua finalidade é reduzir o consumo de água para produzir um concreto com determinada consistência. Mas como pode ser visto na Tabela 6, também é possível aumentar a consistência, aumentar a resistência e até economizar no cimento com a incorporação de aditivo redutor de água.

Tabela 6. Benefícios obtidos com o uso de aditivos redutores de água.

Série de ensaio	Consumo de cimento (kg/m ³)	Relação água/cimento	Abatimento (mm)	Resistência à compressão (MPa)	
				7 dias	28 dias
A – concreto referência (s/ aditivo)	300	0,62	50	25	37
B – aumentar a consistência	300	0,62	100	26	38
C – Aumentar a resistência	300	0,56	50	34	46
D – Economizar cimento	270	0,62	50	25,5	37,5

Fonte: adaptada pela autora de Mehta e Monteiro (2014).

- c) **Aditivos superplastificante:** compostos de sais sulfonados de melamina ou condensado de naftaleno formaldeído, e os mais populares à base de éter policarboxilato. Os aditivos superplastificante também são chamados de aditivos redutores de água de alta eficiência, pois reduzem a água da mistura do concreto em três ou quatro vezes mais que os aditivos redutores de água normais.

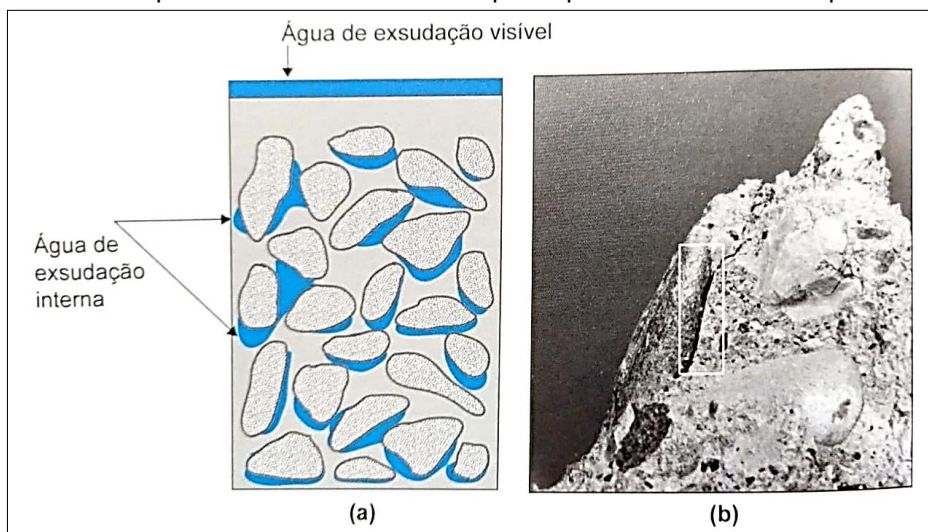
2.3. MICROESTRUTURA DO CONCRETO

A microestrutura do concreto possui três constituintes: a pasta de cimento hidratada, o agregado e a zona de transição na interface entre a pasta de cimento e o agregado. E para conhecer e controlar as propriedades do concreto se faz necessário conhecer tanto a microestrutura do concreto e as propriedades individuais de seus constituintes, quanto a relação entre eles (MEHTA, MONTEIRO, 2014). Os elementos microscópicos do concreto são invisíveis a olho nu, e por isso são utilizadas ferramentas modernas como a microscopia eletrônica de varredura (MEV), conhecida como técnica influente na caracterização do tamanho, forma e estrutura de nanopartículas (LOPES, 2016).

2.3.1. Fase agregado

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a fase agregado é responsável pela massa unitária e pelo módulo de elasticidade do concreto. Segundo os autores, possivelmente as características físicas dos agregados são mais importantes que a composição química ou mineralógica. Isto porque a dimensão e a forma do agregado afetam a resistência de forma indireta conforme ilustra a Figura 2, pois quanto maior o tamanho e a proporção de partículas alongadas e achatadas, maior o acúmulo de filme de água em torno da superfície do agregado, enfraquecendo a zona de transição na interface pasta-agregado.

Figura 2. (a) representação esquemática da exsudação no concreto fresco recém-lançado; (b) falha de aderência por cisalhamento em um corpo de prova ensaiado à compressão uniaxial.

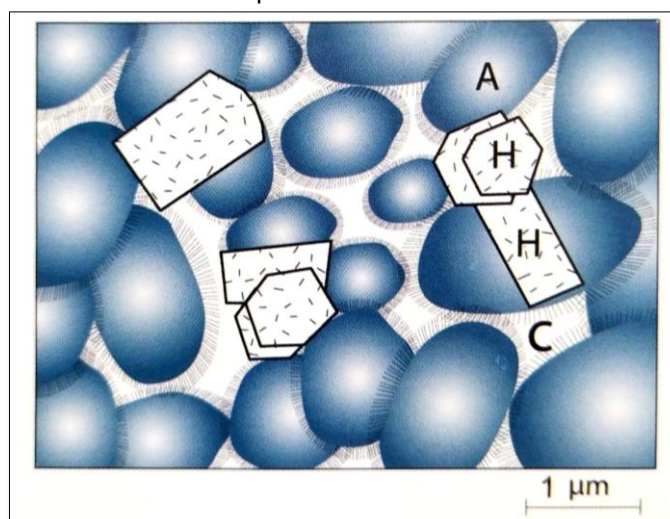


Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

2.3.2. Pasta de cimento hidratada

A pasta de cimento consiste na mistura do pó anidro de cimento e a água, e as reações químicas resultantes desta interação entende-se como hidratação do cimento. Na Figura 3 é ilustrado um modelo da microestrutura da pasta de cimento bem hidratada, e como pode ser visto não há uniformidade no tamanho e morfologia dos sólidos.

Figura 3. Modelo de uma pasta de cimento Portland bem hidratada.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

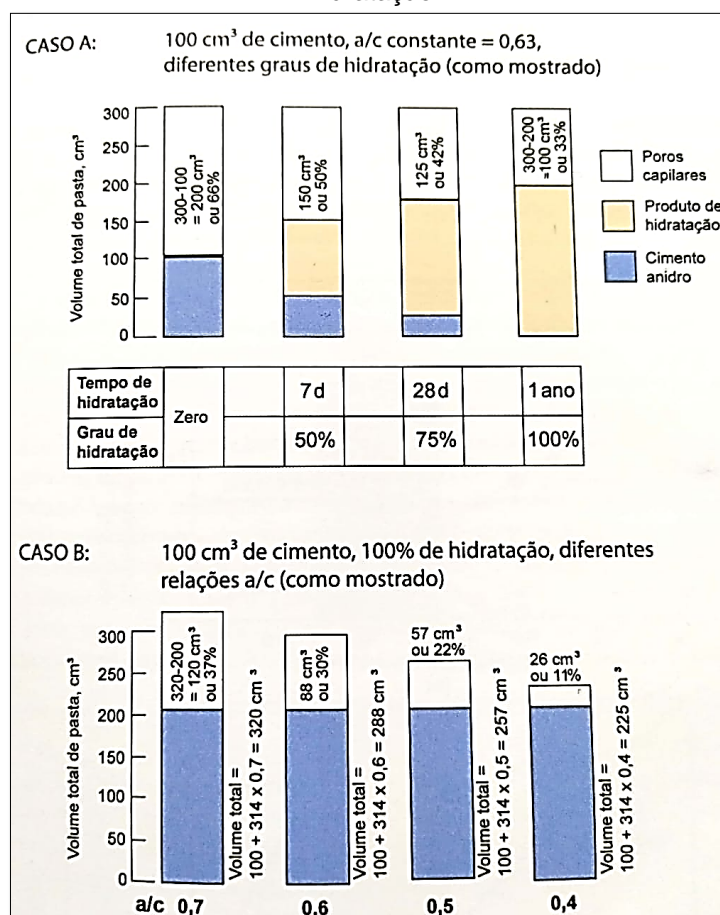
Na Figura 3, os sólidos representados por "A" são as partículas C-S-H (silicatos de cálcio hidratado) com dimensão coloidal de 1 a 100nm, compõe de 50% a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento completamente

hidratada, e por isso a maior parte da resistência e durabilidade é fornecido por eles. Os sólidos “H” representam os produtos cristalinos hexagonais como $\text{CH}=\text{C}_4\text{AH}_{19}=\text{C}_4\text{ASH}_{18}$ com largura de $1\mu\text{m}$. Os cristais de hidróxidos de cálcio compõem 20% a 25% do volume de sólidos, e sua morfologia tende a variar dependendo da disponibilidade de espaço, temperatura de hidratação e impurezas presentes no sistema. Os cristais de sulfoaluminato de cálcio ocupam de 15% a 20% do volume sólido da pasta, e possuem apenas um papel secundário nas relações microestrutura-propriedade (MEHTA, MONTEIRO, 2014).

Os espaços vazios representados por “C” são os vazios capilares que não são preenchidos com os produtos da hidratação do cimento, mas sim por água. Kanellopoulos et al. (2012) escrevem que é muito importante conhecer a natureza e as características do sistema de poros no interior da massa da pasta de cimento endurecida, pois os poros de materiais compósitos à base de cimento são dinâmicos e muda continuamente, devido a hidratação das partículas do cimento.

Mehta e Monteiro (2014) escrevem que os grandes vazios capilares são prejudiciais à resistência do concreto, porque quando ocorre aplicação de carga no concreto formam uma grande concentração de tensão nos grandes vazios capilares e microfissuras presentes. E os pequenos vazios e o espaço interlamelar do C-S-H sob influência das forças de van der Waals não afetam a resistência. Pode ser observado na Figura 4 que o volume de vazios capilares na pasta de cimento hidratada diminui com a redução da relação água/cimento ou com o aumento da idade de hidratação (grau).

Figura 4. Variações na porosidade capilar com diferentes relações água/cimento e grau de hidratação.

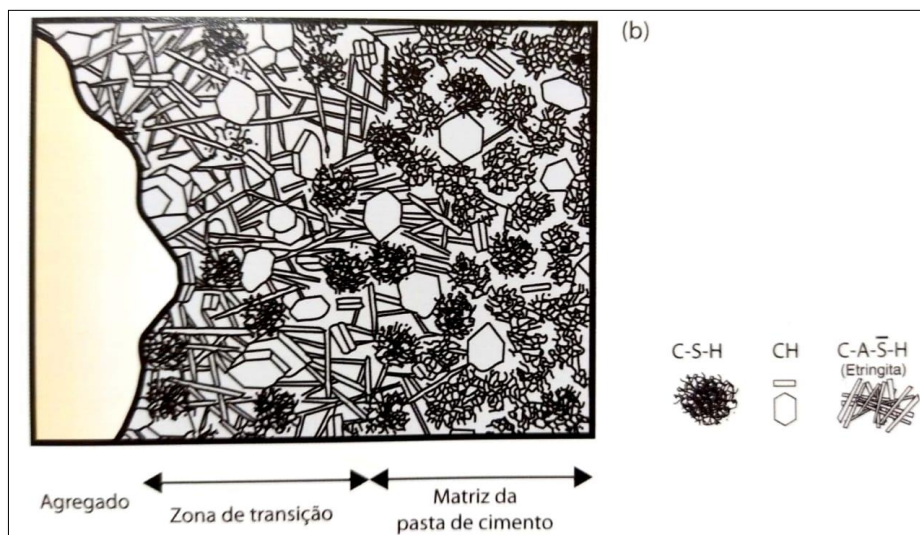


Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

2.3.3. Zona de transição

É essencial que a zona de transição na interface entre a pasta de cimento e o agregado seja estudada, pois as matérias primas apresentam distinções de natureza química e das superfícies dos agregados influenciando nas ligações cristalinas entre a pasta e o agregado (PAULON, KIRCHHEIM, 2011). Mehta e Monteiro (2014) explicam que o acúmulo de filme de água em torno das grandes partículas de agregado contribui para uma maior relação água/cimento na região próxima ao agregado ao invés de longe dele (região chamada de Zona de transição, como mostra a Figura 5). E devido à elevada relação água/cimento entre agregado-pasta, os produtos cristalinos etringita e hidróxido de cálcio são maiores nessa região do que no resto da pasta de cimento, por isso o volume e tamanho dos vazios são maiores na zona de transição, tornando-a assim mais porosa que a matriz da argamassa.

Figura 5. Representação esquemática da zona de transição e da matriz da pasta de cimento no concreto.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Mehta e Monteiro (2014) ainda explicam que com o desenvolvimento da hidratação, uma segunda geração de cristais menores de etringita e hidróxido de cálcio preenchem os espaços vazios na zona de transição, e ajuda a melhorar a densidade e a resistência da zona de transição na interface.

Segundo Ferreira Júnior e Camarini (2003), uma das características da zona de transição é a formação de microfissuras. Qualquer que seja a sua origem (mecânica, física ou química), a degradação dos materiais a base de cimento frequentemente resulta do início e da propagação de microfissuras. Mehta e Monteiro (2014) afirma que a zona de transição serve como uma ponte entre a pasta de cimento e as partículas de agregado graúdo, e mesmo que os componentes individuais possuam rigidez, a rigidez do compósito será reduzida por razão das zonas fragilizadas (vazios e microfissuras), e assim não permitem transferência de tensão. Por isso, o volume de vazios e microfissuras presentes exercem grande influência na rigidez ou no módulo de elasticidade do concreto.

3. MATERIAIS ALTERNATIVOS NO CONCRETO

3.1. GENERALIDADES

O uso de materiais alternativos dentro da indústria da construção civil tem sido uma alternativa viável para uma adequada destinação dos resíduos de construção e demolição (RCD) e para diminuição do consumo de recursos naturais (DA SILVA et al., 2017).

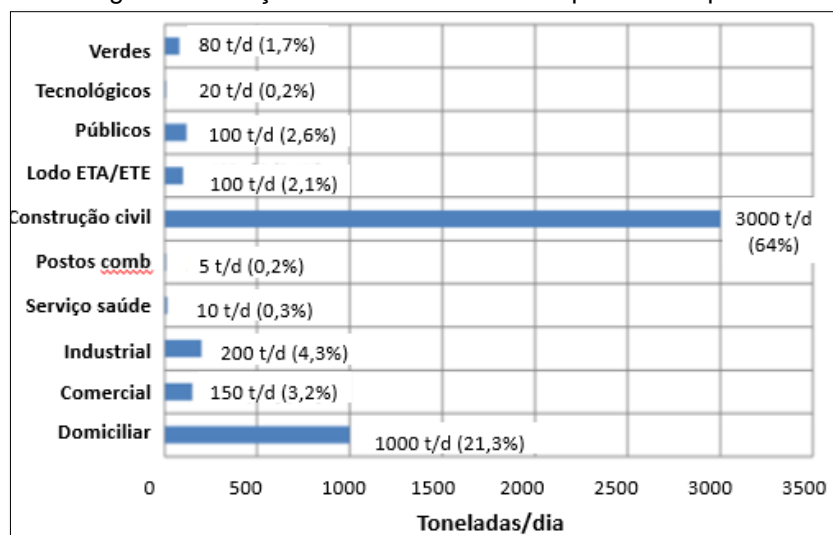
Alguns exemplos de materiais alternativos que podem ser utilizados são: a borracha de pneus veiculares na produção do concreto, a escória de alto forno na fabricação do cimento, os resíduos de vidro na produção do concreto, as garrafas PETs na fabricação de vedações para alvenaria e os agregados reciclados oriundos dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) na produção de concretos e pavimentos.

3.2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO – RCD

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são gerados em larga escala nacional e mundial pela indústria da construção civil. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2017), os municípios brasileiros coletaram no ano de 2016 cerca de 45 milhões de toneladas de RCD, o que representa 58% do volume total dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados no mesmo ano.

Já o município de Campinas, estima-se que produza 4.685 toneladas de RSU por dia, sendo 64% desses resíduos provenientes da construção civil, conforme pode ser visto na Figura 6.

Figura 6. Geração de resíduos no município de Campinas.



Fonte: adaptada pela autora de Fernandes Júnior et al. (2012).

Em virtude da existência deste montante de resíduos dispostos nos centros urbanos, acarretou na criação da Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002, pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), com diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. De modo semelhante foi aprovada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010) com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. E por mais que o mercado atual de resíduos de construção seja pequeno, o setor já começa se organizar com a criação da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (ABRECON).

Sendo assim, a Resolução do CONAMA Nº 307 denomina os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e resultantes da preparação e da escavação de terrenos. Logo, a Tabela 7 classifica os RCD's em conformidade com a Resolução do CONAMA.

Tabela 7. Classificação dos resíduos de construção e demolição

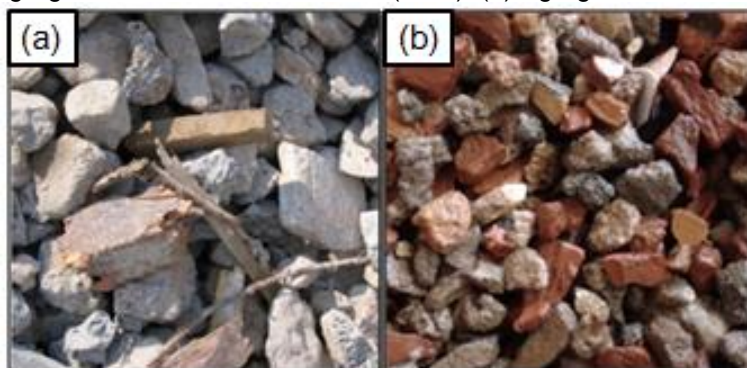
Classe	Definição	Resíduos
Classe A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados;	a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
Classe B	Resíduos recicláveis para outras destinações	Plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso.
Classe C	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação.	
Classe D	são resíduos perigosos oriundos do processo de construção	Tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Fonte: adaptada pela autora da resolução nº307 do CONAMA (BRASIL, 2002).

No que diz respeito ao Agregado Reciclado (AR), a norma brasileira NBR 15116:2004 (ABNT, 2004) o define como material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis. E ainda recomenda o uso de AR's provenientes da Classe A exclusivamente, em obras de pavimentação ou no preparo de concreto sem fins estruturais.

A norma NBR 15116:2004 (ABNT, 2004) classifica os AR's como: Agregado Reciclado de Concreto (ARC) e Agregado Reciclado Misto (ARM). Sendo o primeiro composto, de no máximo 10% em massa de fragmentos cerâmicos, e o segundo composto por mais de 10% em massa de resíduos cerâmicos (Figura 7).

Figura 7. (a) Agregado Reciclado de Concreto (ARC); (b) Agregado Reciclado Misto (ARM).



Fonte: Ângulo e Figueiredo (2011).

3.2.1. Agregado Reciclado de Concreto – ARC

Os ARC's são amplamente gerados por fábricas de pré-moldados, usinas de concreto pré-misturado, e até mesmo por laboratórios de grandes universidades brasileiras. Silva (2014) diz que, em especial a indústria de pré-moldados, tem se preocupado com o correto destino dos resíduos gerados, mas devido a falta de incentivo acaba deslocando todos os resíduos para aterros, deixando assim de originar novos produtos através da reciclagem. A Figura 8 ilustra esses resíduos desperdiçados pela indústria de pré-moldados.

Figura 8 - Resíduos de concreto gerados pela indústria de pré-moldados



Fonte: CTR, 2018.

A reciclagem desses resíduos de concreto, segundo Ângulo (2005), passa por um processo de quatro etapas necessárias: cominuição, separação por tamanho, concentração e auxiliares. Na etapa da cominuição, os resíduos sofrem redução de tamanho através do processo de britagem ou moagem, o que depende da granulometria do material. Normalmente, essa etapa possui um

custo elevado devido ao grande consumo de energia dos equipamentos, os quais são: britador de mandíbula, britador de impacto, britador de cones, britador de rolos e moinho de martelo (ÂNGULO, 2005).

Na etapa de separação por tamanho, pode ser realizado por peneiramento a seco ou a úmido. O processo úmido é realizado para se obter uma separação mais eficiente da fração graúda e da miúda. Já na etapa de concentração, ocorre a remoção de contaminantes dos agregados através de catação, separação magnética dos metais presentes no RCD, separação por meio denso e flotação. E por último, as operações auxiliares de transporte, secagem e homogeneização (ÂNGULO, 2005).

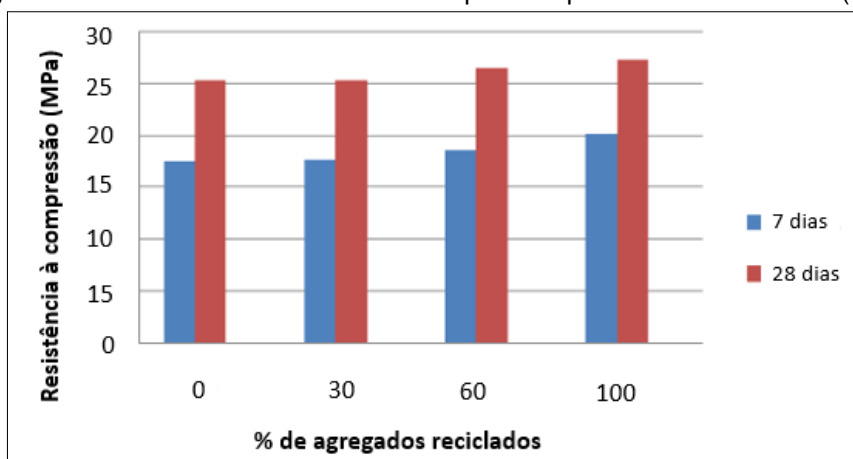
No Brasil, após a etapa de reciclagem dos resíduos de ARC, o beneficiamento acontece mediante incorporação destes AR's em obras de pavimentação e em concretos sem função estrutural. Outros países já fazem uso de normatizações sobre o uso de ARC na produção do concreto estrutural, como é o caso das normativas: WBTC N 12:2002, em Hong Kong; JIS A 5021:2005, JIS A 5022:2006 e JIS A 5023:2007, no Japão; BS 8500:2019, no Reino Unido; OT 70085:2006, na Suíça; PTV 406:2018, na Bélgica; DIN 4226:2004, na Alemanha; LNEC E 471:2009, em Portugal; e TC121-DRG:1994, nos países participantes da RILEM.

De acordo com Soares et al. (2014) ainda existe uma dúvida na literatura se a incorporação do ARC reduz o desempenho mecânico do concreto, em virtude de seus valores baixos de massa específica, altos índices de absorção de água e material pulverulento (BRITO et al., 2014; PEREZ-BENEDICTO et al., 2012). Shi et al. (2016) corroboram dizendo que a presença da pasta de cimento aderida a superfície dos agregados reciclados favorecem o aumento da porosidade e diminuição da resistência do ARC.

No entanto, muitos pesquisadores obtiveram resultados de resistência à compressão do concreto com ARC superiores aos concretos sem ARC. Ramadevi e Chitra (2017), por exemplo, investigaram concretos de 25 MPa com teores de substituição de 0%, 30%, 60% e 100% do agregado natural pelo ARC, e concluíram que não houve muita variação na resistência do concreto referência comparado ao concreto com substituição de 30%. No entanto, ao aumentarem

a substituição para 60% e 100% conferiram incremento na resistência de tais concretos, conforme pode ser visto na Figura 9.

Figura 9. Resultados de resistência à compressão por Ramadevi e Chitra (2017)



Fonte: adaptada pela autora de Ramadevi e Chitra (2017).

Por outro lado, Rizzo (2018) ao estudar a incorporação do agregado reciclado de concreto (ARCO) em um concreto com classe de resistência C30, constatou que o aumento do teor de substituição de 20% a 30% não ocasionou perda significativa no comportamento mecânico e de durabilidade do mesmo.

Rizzo (2018) também inclui em suas considerações finais que no início, a preocupação sobre a utilização do agregado reciclado no concreto era acerca de sua resistência à compressão axial do concreto. No entanto, com o aprofundamento nas investigações de outras características essenciais para garantir um concreto estrutural de qualidade, verificou-se a necessidade de estudar o módulo de elasticidade e a capacidade de absorção de água. Araújo et al. (2016) se atentaram em adequar a massa específica dos agregados reciclados de sua pesquisa antecedente a produção dos concretos com teores de substituição de 0%, 19%, 43%, 75% e 100%. Os autores concluíram a possibilidade de utilizar 100% de agregados reciclados sem acarretar prejuízo nas propriedades mecânicas do concreto, conforme visto na Figura 10. No entanto, recomendam o uso de AR's com baixo teor de resíduos cerâmicos e com massa específica maior que $2,5 \text{ kg/cm}^3$

Figura 10. Resultados das propriedades mecânicas obtidas por Araujo et al. (2016)

TABELA 5: Propriedades do concreto no estado endurecido.					
	Substituição (%)	$f_{cm,j=7}$ (MPa)	$f_{cm,j=28}$ (MPa)	$f_{ctm,sp,j=28}$ (MPa)	$E_{c,j=28}$ (GPa)
C-0	0	26,95 ± 4,02	36,39 ± 1,56	3,88 ± 0,12	29,86 ± 1,00
C-19	19	33,97 ± 1,39	41,23 ± 0,59	3,95 ± 0,02	28,04 ± 0,06
C-43	43	32,79 ± 3,55	39,60 ± 1,98	3,63 ± 0,41	28,04 ± 0,56
C-75	75	29,34 ± 1,52	35,79 ± 0,48	3,66 ± 0,09	26,34 ± 0,91
C-100	100	28,77 ± 1,38	38,30 ± 1,07	3,60 ± 0,18	28,15 ± 0,88
CT-26	26	32,75 ± 1,70	37,82 ± 1,39	3,79 ± 0,05	27,83 ± 0,48

Fonte: ARAUJO et al. (2016)

3.2.2. Agregado Reciclado de Porcelana – ARP

O Agregado Reciclado de Porcelana (ARP) é proveniente da reciclagem dos isoladores elétricos de porcelana utilizados nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Campos e Paulon (2015) dizem que, por possuírem similaridades físicas aos agregados naturais, se torna viável a utilização desses isoladores elétricos como agregados reciclados e até como adição pozolânica.

Os isoladores elétricos de porcelana, por sua vez, são dispositivos utilizados para garantir o isolamento de fios ou cabos energizados, com seus pontos de sustentação adjacentes. Portanto, é exigido que os isoladores possuam grande capacidade de se opor à passagem de corrente elétrica, além de elevada resistência mecânica para suportarem também os distúrbios meteorológicos (SOUZA et al., 2004). Campos e Paulon (2015) estimam uma geração anual de 25.000 toneladas desse tipo de cerâmica com descarte inadequado e sem utilização. De mesmo modo, Shiroma (2016) aponta que, em Campinas, o grupo CPFL gera um volume total de 388 toneladas/mês de isoladores de porcelana, acarretando sérios problemas quanto à logística de transporte e de sua destinação final. As Figura 11 (a) e (b) ilustram como são armazenados os isoladores de porcelana pelo grupo CPFL.

Figura 11. (a) Armazenamento de isoladores de porcelana na Estação Avançada; (b) Detalhe do isolador.



Fonte: SHIROMA, 2016

O processo de britagem dos isoladores elétricos de porcelana é uma simples moagem destes resíduos, visto que o controle da distribuição granulométrica é realizado durante o próprio processo de moagem com o peneiramento da cerâmica moída (CAMPOS e PAULON, 2015).

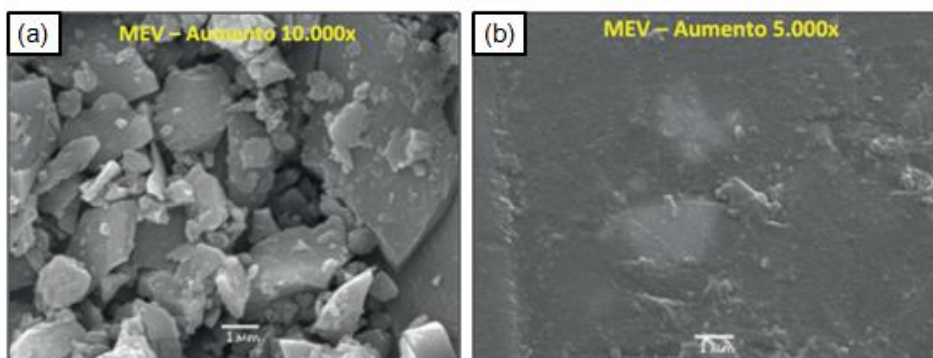
De acordo com Deutsch (2016), a cerâmica utilizada para fabricação dos isoladores elétricos são materiais rígidos e resistentes, podendo ser comparáveis às propriedades dos metais, bem como também são extremamente frágeis sendo altamente suscetíveis à fratura. O comportamento mecânico da porcelana se justifica pela sua composição de argila, feldspato, quartzo ou alumina. Normalmente, o quartzo é substituído pela alumina, pois a mesma possui alta resistência mecânica e elétrica (Ferreira et al. 2018). Em virtude desta composição, muitos pesquisadores obtiveram resultados muito satisfatórios ao incorporarem o ARP no concreto.

Nos estudos de Milhomem et al. (2017), eles avaliaram os efeitos da substituição de 25% e 50% do agregado miúdo natural por agregado de porcelana na produção de concreto, e concluíram que a adição de agregados de porcelana conferiu uma melhoria considerável na resistência à compressão. E também no ensaio de absorção de água ficou comprovado que o isolador, mesmo tendo maior absorção do que a areia natural (0,56% e 0,34%, respectivamente) não interferiu no valor do abatimento do concreto.

Já Campos e Paulon (2015) substituíram ambos agregados graúdos e miúdos nas proporções de 25%, 50%, 75% e 100%, e semelhantemente concluíram que conforme aumenta-se o teor de substituição, aumenta-se a resistência mecânica dos concretos produzidos com agregados de porcelana.

Os mesmos autores também demonstraram mediante avaliações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) que a porcelana graúda sem esmalte, resultante do processo de moagem possui uma superfície rugosa semelhante à brita natural, conforme ilustra a Figura 12 (a). No entanto, quando a porcelana graúda é observada pela camada de esmalte, a Figura 12 (b) mostra uma superfície polida (sem saliências).

Figura 12. (a) MEV porcelana graúda sem esmalte e (b) MEV porcelana graúda com esmalte.

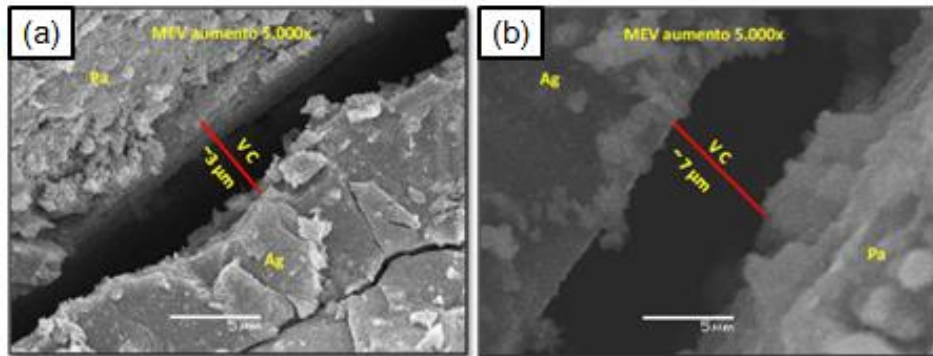


Fonte: Campos e Paulon (2015).

De Argollo Ferrão et al. (2016) verificaram a influência da camada de esmalte nas propriedades mecânicas e de durabilidade de uma argamassa, e concluíram que os agregados cerâmicos esmaltados podem ser utilizados em argamassas e concretos. Embora tenham apresentado em seus resultados que quando utilizados agregados graúdos de dimensões superiores a 19 mm, é possível ocorrer interferência na resistência devido à grande área superficial esmaltada.

De modo semelhante, De Argollo Ferrão et al. (2016) também analisaram com o MEV a zona de transição agregado-pasta, e observaram que para a argamassa com porcelana esmaltada (Figura 13.b) a distância média entre agregado e a pasta foi de $7\mu\text{m}$, maior do que a distância de $3\mu\text{m}$ entre agregado-pasta da argamassa com porcelana sem esmalte (Figura 13.a). E isso se sucede devido à rugosidade presente na porcelana sem esmalte, permitindo que a pasta possa aderir com facilidade em sua superfície.

Figura 13. Zona de transição do traço (a) sem esmalte e do traço (b) com esmalte.



Fonte: De Argollo Ferrão et al. (2016)

4. O MÓDULO DE ELASTICIDADE

Partindo da teoria de Robert Hooke (1635-1703) de 1660, todos os materiais apresentam elasticidade ou possuem alguma região elástica quando submetidos à solicitação de uma força, seja ela de compressão ou tração. Na hipótese desta força ser diretamente proporcional a deformação do material, ou que o mesmo retorne a sua posição original a partir do momento que o material é descarregado, pode-se considerar que este material possui um comportamento elástico e obedece a Lei de Hooke (ARANHA et al., 2016). A Equação 1 define matematicamente esta força elástica (F_l).

$$F_l = -k \cdot \Delta_x \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

F_l = a força aplicada sobre um material elástico, expressa em Newton (N);

k = a constante elástica ou constante de rigidez, expressa em Newton por metro (N/m);

Δ_x = a deformação sofrida pelo material ou diferença no comprimento inicial à medida que é aplicada a força elástica, expressa em metros (m).

No entanto, nos estudos de materiais é de maior importância a propriedade mecânica chamada tensão de engenharia (σ). Esta propriedade foi definida por Cauchy, somente em 1802, através da Equação 2, dizendo que tensão é a divisão da força aplicada sobre a área original de um corpo sólido (ARANHA et al., 2016).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

σ = a tensão expressa em Newton por metro quadrado (N/m²) igual a Pascal (Pa);

F = a força aplicada sobre o corpo sólido, expressa em Newton (N);

A = a área original do corpo sólido, expressa em metro quadrado (m²).

Após a definição de σ , Thomas Young se aprofundou nos estudos de Hooke, e estabeleceu o conceito de módulo de elasticidade como sendo a razão da σ e a deformação específica do material (ε) (Equação 3).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

E = o módulo de elasticidade ou módulo de Young, expresso em GPa;

ε = a deformação específica do corpo sólido, adimensional;

A deformação específica (ε) é definida como a relação da variação de alongamento com o comprimento inicial do corpo, conforme mostra a Equação 4.

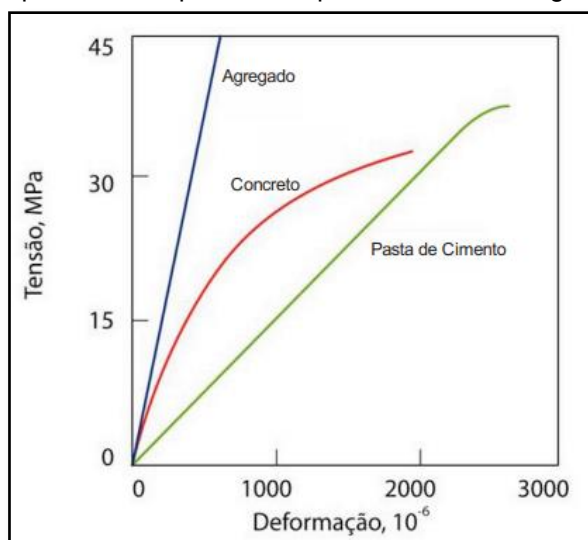
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{(l-l_0)}{l_0} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

Δl = a diferença do comprimento instantâneo (l) e do comprimento inicial (l_0), expressa em metros (m).

O concreto, por sua vez, quando submetido a tensões de compressão ou de tração não se comporta como um material ideal conforme a lei de Robert Hooke, ou seja, o concreto é um material com comportamento não linear no diagrama de tensão-deformação (σ - ε) (Figura 14), e isso se deve a sua natureza visco elástica, conforme afirmado por PACHECO et al. (2014).

Figura 14. Comportamento típico σ - ϵ da pasta de cimento, agregado e concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

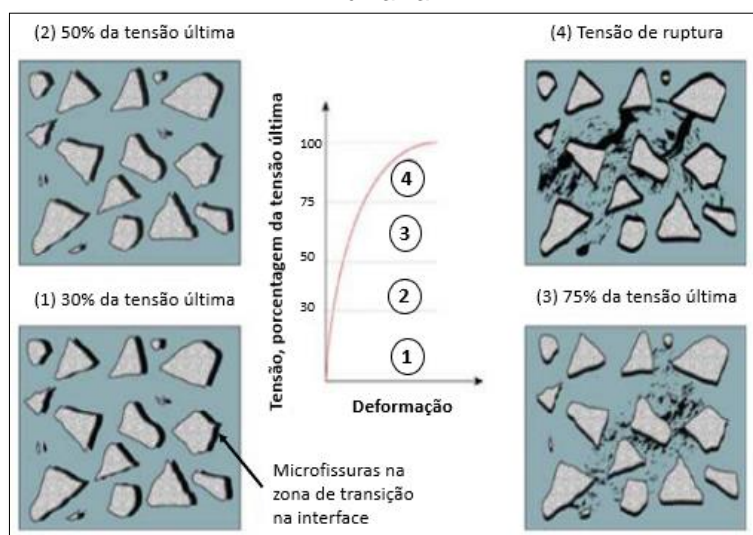
A Figura 14 ilustra que quando o agregado e a pasta de cimento são submetidos separadamente ao carregamento, apresentam uma curva σ - ϵ ligeiramente linear. De maneira oposta, o concreto apresenta uma curva não-linear, em razão do surgimento de microfissuras progressivas na interface entre o agregado e a pasta de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

NEVILLE (2015) explica que com o aparecimento das microfissuras, passa a existir tensões localizadas, em razão dos diferentes ângulos feitos pelas fissuras sob a aplicação de carga. Como consequência da evolução destas fissuras, ocorre redução da área efetiva que resiste à carga aplicada, de modo que a tensão localizada passa a ser maior do que a tensão nominal. Essas mudanças traduzem um aumento das deformações mais acelerado do que o aumento da tensão nominal aplicada, justificando a não linearidade da curva do concreto.

Em virtude deste aumento acelerado de deformações, VASCONCELOS e GIAMMUSSO (2009) dizem que, para o concreto, é preferível denominar o módulo de elasticidade como módulo de deformação (E_c). Embora dito por GUJEL (2014), que tal denominação só pode ser considerada, a partir de um nível de tensões acima de 40% ou 50% da tensão de ruptura, conhecido como ponto de partida que o comportamento do concreto deixa de ser linear.

De modo diferente, MEHTA e MONTEIRO (2014) divide o comportamento do concreto em quatro estágios, conforme ilustra Figura 15: O primeiro estágio, abaixo de 30% da carga última e com estabilidade das fissuras existentes sob condições de exposição atmosférica (submetido apenas aos efeitos de retração por secagem ou térmica); o segundo estágio, entre 30% e 50% da carga última, com aumento da abertura e da quantidade de fissuras, e assim a curva σ - ϵ começa a se desviar sensivelmente de uma linha reta; o terceiro estágio, entre 50% e 75% da carga última, a curva σ - ϵ se inclina consideravelmente para a horizontal, em razão da instabilidade e formação de novas fissuras na matriz; o quarto e último estágio, acima de 75% da carga última, alcança o nível crítico de crescimento de fissuras, ocasionando o rompimento do material.

Figura 15. Representação do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial.



Fonte: adaptada pela autora de Mehta e Monteiro (2014).

4.1. FATORES INTERVENIENTES

Para o caso do concreto, MEHTA e MONTEIRO (2014) afirmam que a resistência à compressão característica do concreto é diretamente relacionada ao módulo de deformação, isto porque ambos são afetados pela porosidade das partes constituintes do concreto: o agregado, a matriz cimentícia e a zona de transição na interface.

Além da porosidade, o módulo de deformação da matriz cimentícia é determinado pela relação água/cimento, teor de ar incorporado, adições minerais

e grau de hidratação do cimento, e geralmente os valores de módulo da pasta de cimento estão entre 7 GPa e 28 GPa (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A zona de transição na interface possui um papel importante na determinação da relação tensão-deformação do concreto, pois é mais comum existir nessa região: vazios capilares, microfissuras e cristais orientados de hidróxido de cálcio. Com isso, os fatores que controlam a porosidade da zona de transição na interface são: relação a/c , adições minerais, características do agregado (granulometria, dimensão máxima e geometria), grau de hidratação do cimento e a interação química entre agregado e pasta de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Semelhantemente a matriz cimentícia e a zona de transição na interface, a porosidade do agregado também afeta a rigidez do agregado e do concreto. Desta forma, o módulo de deformação de agregados de baixa porosidade (granito e basalto) estão na faixa de 70 GPa a 140 GPa, à medida que, o módulo de agregados de alta porosidade (calcário e arenito) estão na faixa de 21 GPa a 49 GPa (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Neto et al. (2018) ao estudarem a influência do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência, verificaram que o diâmetro máximo característico e o teor de agregados apresentam pouca influência no módulo. Ao contrário da influência da natureza do tipo de agregado, a qual interfere significativamente nos valores de módulo.

Santos et al. (2017) relacionam outras influências no valor final do módulo de deformação, tais como os parâmetros de corpo de prova e os parâmetros de ensaio. Eles dizem que os ensaios de módulo devem ser realizados cautelosamente de acordo com a norma vigente, pois tanto a geometria e a condição úmida dos corpos de prova, como o tipo de tensão, a velocidade e o tempo de carregamento influenciam no valor final do módulo.

Santos et al. (2017) dizem que a velocidade de aplicação de carga deve ser uniforme, pois quanto maior a velocidade de aplicação, menor a capacidade de propagação das fissuras e da acomodação microestrutural das deformações. MEHTA e MONTEIRO (2014) afirmam que, em uma faixa de tempo de 2 a 5 minutos, tempo necessário para testar corpos de prova, a deformação aumenta

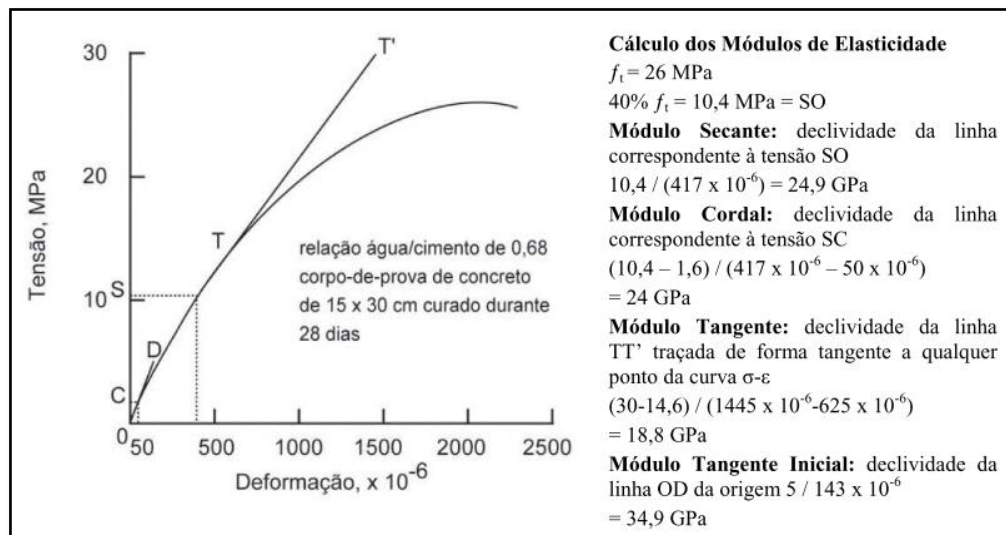
de 15 a 20%, enquanto o módulo de deformação diminui nesta mesma proporção.

4.2. MÉTODOS DE ENSAIOS

Tendo conhecimento de que a curva tensão-deformação do concreto não é linear, podem ser obtidos três tipos de módulo de elasticidade: o módulo tangente, o módulo secante e o módulo cordal, definidos respectivamente e ilustrados na Figura 16 (MEHTA e MONTEIRO, 2014):

- Declividade de uma linha traçada tangente à curva σ - ϵ em qualquer ponto da curva;
- Declividade de uma linha traçada da origem até ao ponto correspondente a tensão de 40% da carga de ruptura;
- Declividade de uma linha traçada de um ponto representando deformação longitudinal de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ até o ponto correspondente a 40% da carga última;

Figura 16. Diferentes tipos de módulos de elasticidade e o método para sua determinação.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Os três tipos de módulos acima descritos, ainda podem ser obtidos por meio de dois métodos: método estático ou método dinâmico. Com exceção do módulo secante, que só pode ser obtido pelo método estático (GUJEL 2014).

4.2.1. Método estático

O método estático compreende em determinar o módulo estático de deformação, considerado como um método destrutivo, consistindo na aplicação crescente de carga a uma velocidade controlada no corpo de prova, com monitoração simultânea da deformação resultante (GUJEL 2014).

O módulo estático pode ser determinado através de ensaios mecânicos ou por meio de equações empíricas. No que diz respeito aos ensaios mecânicos, a NBR 8522:2017 (ABNT, 2017) prescreve orientações de como o ensaio deve ser conduzido, e ainda define o módulo de deformação secante (E_{cs}) e tangente inicial (E_{ci}), respectivamente, como:

- a) O coeficiente angular da reta secante a curva tensão-deformação, saindo da origem das coordenadas e passando pelos pontos da tensão básica (σ_a) e da tensão considerada no ensaio (σ_b);
- b) Equivalente ao módulo de deformação secante ou cordal, não saindo da origem das coordenadas, mas passando entre os pontos de σ_a e σ_b .

A σ_b considerada no ensaio do módulo estático corresponde a 30% da tensão de ruptura do concreto (f_c). Já a σ_a varia em função da metodologia utilizada durante o ensaio, sendo que a NBR 8522:2017 (ABNT, 2017) apresenta duas metodologias: metodologia A com a σ_a fixa, e a metodologia B com deformação específica sob tensão básica (ϵ_a) fixa. Nesta pesquisa, os ensaios mecânicos foram conduzidos mediante a metodologia A, que consiste em um processo de carregamento e descarregamento representado esquematicamente na Figura 17.

de prova, da variabilidade das máquinas de ensaios e do processo de acomodação dos pratos da prensa de ensaio, pois estes fatores podem gerar uma perturbação inicial no traçado das curvas tensão-deformação (ARAUJO, et al., 2012).

A NBR 8522:2017 (ABNT, 2017) ainda orienta que a dispersão máxima entre um resultado individual de módulo não pode ser superior a 5% quando comparado a média dos módulos. Nesse caso, exclui-se o resultado individual discrepante, e calcula-se uma nova média.

Agora fazendo menção a obtenção do módulo estático através de equações estimativas, cita-se a norma brasileira de estruturas de concreto NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), utilizada para quando não seja possível obter resultados obtidos de módulo na fase de concepção do projeto.

A NBR 6118:2014 relaciona diretamente o valor do módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}) e secante (E_{cs}) com a resistência característica do concreto aos 28 dias (f_{ck}), existindo assim duas equações distintas (Equação 6 e 7) para a classe de resistência do grupo I (C20 à C50) e do grupo II (C55 à C90).

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad \therefore \text{para o grupo I}; \quad \text{Equação 6}$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1/3} \quad \therefore \text{para o grupo II}; \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

E_{ci} = módulo de deformação tangente inicial (MPa);

f_{ck} = resistência à compressão característica do concreto aos 28 dias (MPa);

α_E = parâmetro em função da natureza do agregado.

Para os concretos de menor resistência (grupo I), a curva tensão-deformação é a raiz quadrada da resistência característica do concreto. Para os concretos de maior resistência (grupo II), a melhor correlação foi obtida com a raiz cúbica da resistência, seguindo a proposta da *fib* no Model Code 2010 e também da Eurocode 2 (KIMURA e BUENO, 2015).

Além disso, a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) correlaciona o módulo de deformação com a resistência característica à compressão (f_{ck}), ao contrário da

NBR 8522:2017 (ABNT, 2017) que correlaciona com a resistência à compressão média (f_{cm}), obtida no ensaio mecânico preconizado pela NBR 5739:2018 (ABNT, 2018). A resistência característica à compressão, por sua vez, deve ser especificada pelo profissional responsável pelo projeto estrutural, conforme Equação 8 apresentada pela NBR 12655:2015 (ABNT, 2015).

$$f_{ck} = f_{cmj} - 1,65.S_d \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

f_{cmj} = a resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias (MPa);

f_{ck} = a resistência característica do concreto à compressão, aos j dias (MPa);

S_d = desvio-padrão da dosagem (MPa).

A NBR 6118:2014 também relaciona o módulo de deformação em função da natureza do agregado, mediante inclusão do parâmetro α_E nas Equações 6 e 7. Ou seja, caso o agregado seja basalto e diabásio, o valor de módulo aumenta em 20%, se for granito e gnaiss, o valor se mantém constante, mas na hipótese do agregado ser calcário, o módulo de deformação deve reduzir em 10%, e em 30% se for utilizado agregado de arenito.

O Instituto IBRACON, na tentativa de expressar uma equação de módulo próxima da realidade, apresentou uma proposta de relação do módulo de deformação com a consistência do concreto (Equação 9), sugerindo a inclusão de mais um coeficiente denominado α_C . No entanto, tal sugestão não foi levada em consideração pela NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) (SANTOS et al., 2017).

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot \alpha_C \cdot 5600 f_{ck}^{1/2} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

α_E = índice de correção em função da natureza do agregado (1,1 ou 1,2 para basalto denso e calcário sedimentar denso, 1,0 para granito e gnaiss, 0,9 para calcário metamórfico e metassedimento, e 0,7 para arenito);

α_C = determinado em função da consistência do concreto, com valores variando conforme Tabela 8.

Tabela 8. Índice da expressão de previsão do módulo de deformação do concreto devido à consistência do concreto

Consistência do concreto fresco	α_c
Fluída	0,9
Plástica	1,0
Seca	1,1

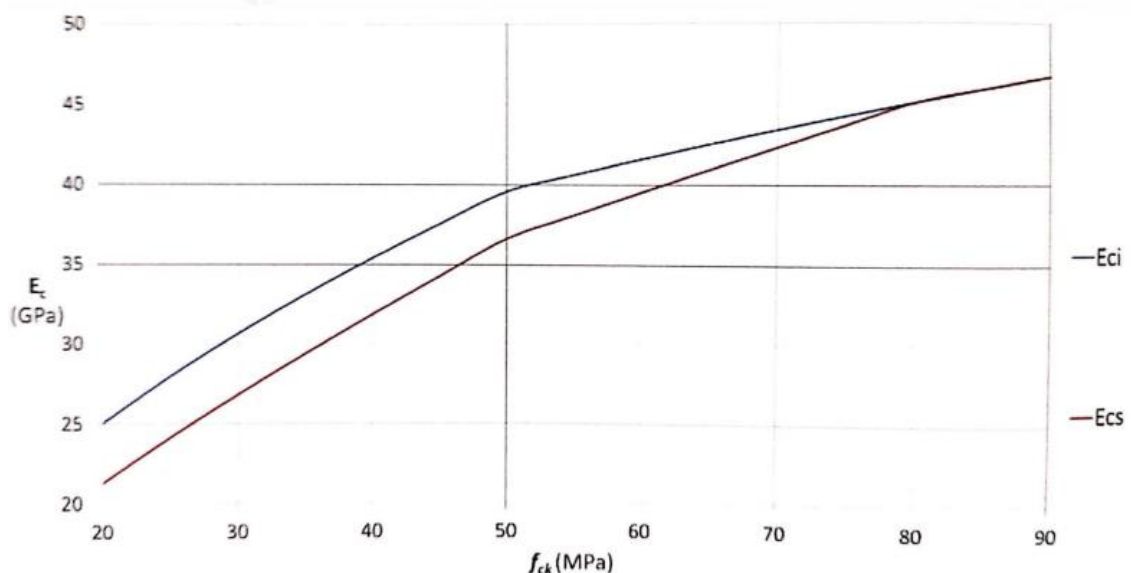
Fonte: adaptada pela autora de Helene e Andrade (2017).

O módulo de deformação secante (E_{cs}) pode ser estimado através da Equação 10.

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} = \left(0,80 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \right) \cdot E_{ci} \quad \text{Equação 10}$$

Na NBR 6118:2014 também é apresentada, em formato de tabela, uma relação estimativa do módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}) e secante (E_{cs}) em função da resistência característica (f_{ck}), considerando α_E igual a 1,0. No entanto, KIMURA e BUENO (2015) ilustram de forma mais clara essa relação em forma de um gráfico, conforme pode ser visto na Figura 18.

Figura 18. Valores estimativos dos módulos E_{ci} e E_{cs} em função do f_{ck} .



Fonte: Kimura e Bueno (2015).

KIMURA e BUENO (2015) afirmam que a redução do módulo de deformação tangente inicial para secante deve ser conhecida em razão da existência de tensões localizadas da ordem de 40% a 50% de f_{ck} , e até mais, reduzindo o valor efetivo de módulo secante. Com isso, os mesmos autores dizem ser permitido adotar o módulo secante na avaliação do comportamento global da estrutura, devido as principais razões:

- a) Para a estrutura analisada como um todo é adequado avaliar a rigidez a partir do f_{cm} ;
- b) Existem significativas regiões da estrutura onde as tensões são baixas, menores que 30% de f_{ck} ;
- c) Nessas análises, uma parte das ações é usualmente dinâmica de curta duração, como o vento, para as quais o concreto tem uma resposta mais rígida.

Na necessidade de calcular o módulo de elasticidade em uma idade inferior a 28 dias e acima de 7 dias ($E_{ci(t)}$), o mesmo pode ser calculado a partir das Equações 11 e 12.

$$E_{ci(t)} = \left[\frac{f_{ckj}}{f_{ck}} \right]^{0,5} \cdot E_{ci} \quad \therefore \text{para } f_{ck} \text{ de 20MPa a 50 MPa}; \quad \text{Equação 11}$$

$$E_{ci(t)} = \left[\frac{f_{ckj}}{f_{ck}} \right]^{0,3} \cdot E_{ci} \quad \therefore \text{para } f_{ck} \text{ de 55MPa a 90 MPa}; \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

$E_{ci(t)}$ = estimativa do módulo de elasticidade do concreto em uma idade entre 7 dias e 28 dias (MPa);

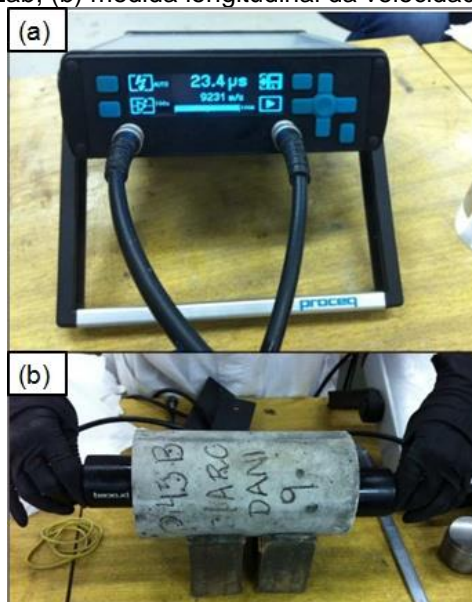
F_{ckj} = resistência característica à compressão do concreto na idade pretendida de estimativa (MPa).

4.2.2. Método dinâmico

O método dinâmico consiste em determinar o módulo dinâmico de deformação, que ao contrário do módulo estático, é considerado um método não destrutivo, ou seja, não ocasiona danos na estrutura a ser testada (GUJEL 2014).

O módulo dinâmico pode ser obtido através de vários métodos não destrutíveis, tais como: o método esclerométrico, o método da propagação da velocidade de pulso ultrassônico e o método de excitação por impulso e o método de análise modal (JUROWSKI e GRZESZCZYK, 2018). Hassan e Jones (2012), no entanto, dizem que os métodos de velocidade por pulso ultrassônico (Figura 19) e frequência ressonante têm sido mais utilizados para medir propriedades elásticas do concreto convencional nas últimas décadas.

Figura 19. Método de velocidade de pulso ultrassônico (a) aparelho de ultrassom do tipo PUNDIT Lab; (b) medida longitudinal da velocidade da onda.



Fonte: Gujel (2014).

Com o valor da velocidade ultrassônica (V), o fib Model Code 1990 apresenta a Equação 13 para se determinar o módulo de deformação.

$$E_c = \frac{V^2 \cdot \delta \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \cdot 10^{-3} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

E_c = módulo de deformação do concreto (MPa);

V = velocidade ultrassônica (m/s);

δ = densidade do concreto (kg/dm^3);

ν = coeficiente de Poisson.

Faz-se necessário ter conhecimento do valor do coeficiente de Poisson, para isso, MEHTA e MONTEIRO (2014) sugerem valores entre 0,15 e 0,22, e para tensões de compressão menores que $0,5 f_c$ e tensões menores que f_{ct} , a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) permite adotar um coeficiente de Poisson igual a 0,2.

MEHTA e MONTEIRO (2014) ainda afirmam que o módulo dinâmico do concreto corresponde a uma deformação instantânea muito pequena, e é correspondente ao módulo tangente inicial (E_{ci}). Por isso, os mesmos autores sugerem que é mais apropriado utilizar o módulo dinâmico, quando se há

intenção de analisar a tensão de estruturas submetidas a terremotos ou carga de impacto. O módulo dinâmico, por sua vez, é geralmente mais alto que o módulo estático, geralmente o supera em 20%, 30% e 40% para concretos de alta, média e baixa resistência, respectivamente (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

No Brasil, há inexistência de normas orientando a obtenção do módulo de deformação através de ensaio dinâmico. Contudo, a NBR 8802:2019 (ABNT, 2019) apresenta orientações sobre como determinar a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas através de um corpo de prova de concreto, com a intenção de verificar a homogeneidade do concreto, detectar eventuais falhas de concretagem, investigar a profundidade das fissuras, e monitorar as variações no concreto ao longo do tempo em virtude da agressividade do meio.

De modo semelhante, as normas estrangeiras C597 (ASTM, 2009) e NDT1 (RILEM, 1972) orientam procedimentos em como determinar a velocidade de propagação das ondas de ultrassom no concreto. Dentre os fatores que influenciam na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é relacionado o tipo e quantidade de agregado graúdo e cimento utilizados, o teor de umidade e temperatura do concreto, e as condições da superfície do material (BENETTI, 2012).

Com isso, Naik et al. (2004) corrobora dizendo que a umidade presente no concreto ocasiona aumento na velocidade do pulso ultrassônico, justificado pela facilidade da onda de ultrassom propagar na água ao invés de no ar seco. Mas o autor afirma que não se trata apenas da quantidade de água presente no corpo de prova de concreto, mas sim de como esta água está distribuída entre seus poros. Dessa maneira, a C597 (ASTM, 2009) quantifica uma diferença de até 5% de velocidade superior de onda ultrassônica no concreto úmido comparado ao concreto seco.

4.3. EQUAÇÕES PROPOSTAS POR NORMAS PARA ESTIMAR O MÓDULO

O módulo de deformação do concreto também pode ser obtido através de formulações matemáticas sugeridas por normativas. Em geral, as normativas consideram o valor da resistência característica à compressão, a natureza do

agregado graúdo e a massa específica do concreto, salvo exceções. No Brasil a norma que instrui em como calcular o módulo de deformação é a NBR 6118 (ABNT, 2014), e em outros países existem outras normas estrangeiras, tais como o ACI 318:2014 (ACI, 2014), o Eurocode 2:2004 (CEN, 2004) e o *fib* Model Code 2010 (*fib*, 2010). A Tabela 9 sintetiza todas essas formulações de estimativa do módulo de deformação com a intenção de ser comparadas.

Tabela 9 – Comparação da equação estimativa do módulo de deformação da NBR 6118:2014 com as equações propostas por normas estrangeiras.

Norma	Módulo Tangente	Módulo Secante
NBR 6118:2014	$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	$E_{cs} = 0,8 + 0,2 \left(\frac{f_{ck}}{80} \right) \cdot E_{ci}$
<i>fib</i> MODEL CODE 2010	$E_{ci} = 21500 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3}$	$E_c = 0,8 + 0,2 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{88} \right) \cdot E_{ci}$
ACI 318:2014	$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)}$	-
EUROCODE 2:2004	$E_c = 1,05 \cdot E_{cm}$	$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$

Fonte: a autora.

A última versão da NBR 6118:2007 (ABNT, 2007) não incluía a influência da natureza do agregado no valor do módulo de deformação, e não havia diferença de formulações de acordo com a classe de resistência do concreto. Hoje, após revisionada e considerando formulações propostas por normas estrangeiras, a NBR 6118 (ABNT, 2014) conta com mais especificidades a serem levadas em consideração, como: a inclusão do parâmetro α_E , equações distintas para resistências altas e moderadas, e um coeficiente de conversão do módulo tangente inicial ao secante também relacionado a resistência característica do concreto.

De acordo com KIMURA E BUENO (2015), a intenção de estabelecer o parâmetro α_E na equação de estimativa do módulo de elasticidade, é de informar e alertar os projetistas estruturais sobre a importância de se considerar a disponibilidade dos agregados nos locais de implantação, por isso, todas as normas estrangeiras e a norma brasileira consideram tal parâmetro.

No trabalho de SANTOS et al (2017), os autores chegaram à conclusão de que as formulações da *fib* Model Code (2010) e da NBR 6118 (2014)

apresentaram valores mais próximos aos resultados obtidos no estudo deles. E ainda salientaram que se deve ter cautela na utilização de normas internacionais, pois a utilização de uma norma fora do contexto do país pode levar a conclusões equivocadas.

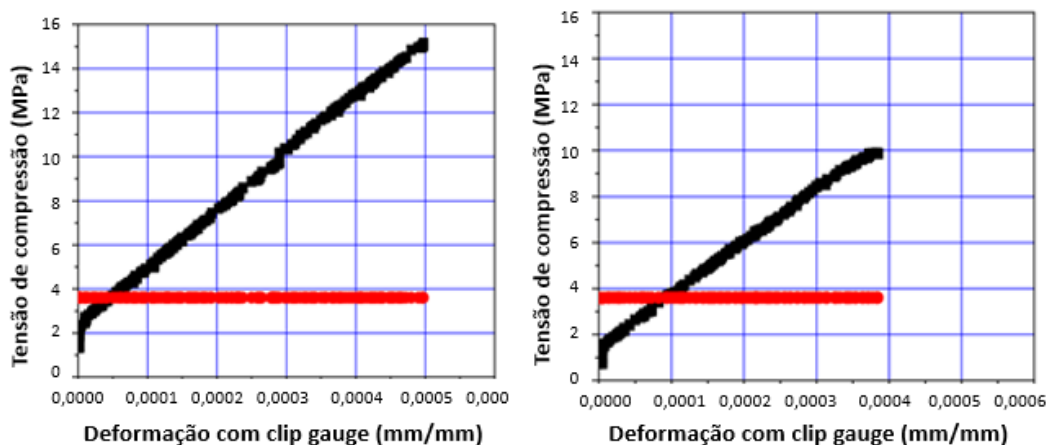
Os mesmos autores ainda afirmam que o uso de coeficientes nas equações nem sempre são compatíveis aos reais, pois diferentes jazidas podem produzir diferentes materiais, por isso eles sugerem iniciar os estudos verificando esses coeficientes em função da massa específica do agregado.

4.4. MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO COM ARC

O módulo de elasticidade do concreto é diretamente relacionado ao módulo de elasticidade do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Fonseca et al. (2011) vão além dizendo que o módulo não só depende da rigidez do agregado, mas também da rigidez da pasta de cimento e da zona de transição.

Benetti (2012) também diz que o módulo de elasticidade dos concretos é dependente do teor de agregado graúdo e teor da argamassa. E tendo conhecimento que os agregados reciclados contam com valores menores de massa específica e alta porosidade, espera-se que quanto maior o teor de agregado reciclado maior será a porosidade do concreto, e conseqüentemente menor módulo de elasticidade (Figura 20).

Figura 20. Tensão x deformação do (a) concreto sem ARC, rompido aos 63 dias com a/agl de 0,45; (B) concreto com ARC, rompido aos 28 dias com a/agl de 0,65.



Fonte: Gujel (2014).

4.4.1. Módulo de elasticidade obtido de concretos reciclados

Para Benetti (2012) e Ângulo (2005) a relação da resistência à compressão axial com o módulo de deformação do concreto ocorre de maneira linear, ou seja, conforme aumenta o teor de agregado reciclado ambas tendem a diminuir constantemente.

Outras pesquisas já demonstraram que tal relação linear não pode existir, haja vista que enquanto o módulo tende a diminuir com a incorporação do ARC, a resistência à compressão não é afetada significativamente (BRITO e ROBLES, 2010; SILVA et al., 2015, SOARES et al., 2014)

Como exemplo, Soares et al (2014) encontraram valores de 48 MPa e 36,2 MPa de resistência à compressão e módulo de elasticidade para o concreto com agregado natural, e para concretos com 100% de ARC obtiveram de 50,3 MPa e 32,1 GPa, de resistência à compressão e módulo de elasticidade, respectivamente.

Já Estolano et al. (2018) avaliaram tanto o módulo dinâmico como o módulo estático de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado, e observaram que ambos módulos apresentaram diminuição à medida que se incorporava agregado reciclado, conforme ilustra Figura 21.

Figura 21. Resultados de módulo estático e dinâmico de elasticidade apresentados por Estolano et al. (2018).

Concreto	MEE (GPa)	MED (GPa)	Diferença (MEE – MED)	Razão (MEE/MED)
C1-ref	42,03	40,29	1,74	1,04
C1-30	40,74	39,44	1,30	1,03
C1-50	38,95	39,13	-0,18	0,99
C2-ref	43,5	42,23	1,27	1,03
C2-100	28,11	32,67	-4,56	0,86

Fonte: Estolano et al. (2018).

4.4.2. Módulo de elasticidade estimado de concretos reciclados

A estimativa do módulo de elasticidade é possível ser feita na fase de concepção de projeto, sendo que a norma brasileira NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) sugere uma equação estimativa com influência direta do valor da resistência à compressão do concreto (f_{ck}) e a natureza do agregado utilizado

(α_E). Porém, a NBR 6118:2014 somente apresenta valores de α_E para agregados naturais, sem contar que tais equações não foram formuladas para se estimar o módulo de elasticidade de concretos com agregados reciclados.

Dada à importância de se conhecer uma adequada e precisa equação de estimativa do módulo de concretos reciclados, muitos pesquisadores se esforçaram para quantificar o efeito do agregado reciclado no módulo de elasticidade e sugeriram modelos estimativos sintetizados na Tabela 10.

Tabela 10. Modelos propostos para estimativa do módulo de elasticidade de concretos com agregados reciclados.

Modelos Estimativos	Autores
$E_c = 4,63f_{cy}^{0,5}$	Ravindrarajah e Tam (1985)
$E_c = 0,37f_c + 13,1$	Dhir et al. (1999)
$E_c = 0,63443f_{cu} + 3,0576$	Dillmann (1998)
$E_c = 0,378f_c + 8,242$	Mellmann (1999)
$E_c = 190 \left(\frac{\rho}{2300}\right)^{1,5} \sqrt{\left(\frac{f_{cu}}{2000}\right)}$	Kakizaki et al. (1988)
$E_c = 9,1(f_{cu} + 8)^{1/3} * \left(\frac{\rho}{2400}\right)^2$	Zilch e Roos (2001)
$E_c = 18,8 \left(\frac{0,83f_{cu}}{10}\right)^{1/3}$	Corinaldesi (2010)
$E_c = \frac{100}{\left(2,8 + \frac{40,1}{f_{cu}}\right)}$	Xiao et al. (2007)

Fonte: a autora.

No entanto, graças à natureza variável dos agregados reciclados e levando em consideração as limitações associadas de cada caso experimental, os presentes modelos precisam ser mais expandidos e melhores investigados. Para isso, também podem ser encontrados na literatura alguns modelos de predições de módulo de elasticidade que se beneficiaram de tecnologias como *deep learning*, *soft computing*, *artificial neural network (ANN)*, *fuzzy logic model* e *support vector machine* (BEHNOOD et al., 2015; DENG et al., 2018; NADERPOUR et al., 2018).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram produzidos concretos convencionais e com materiais alternativos, ambos classificados no grupo I de resistência característica à compressão segundo a NBR 8953:2015 (ABNT, 2015).

A dosagem dos concretos que serviram de referência por serem concretos considerados convencionais (com agregado graúdo de basalto e areia de quartzo), foi realizada na tentativa de se alcançar resistências à compressão de 20MPa e de 40MPa, por serem resistências mais usadas em obras comuns de concreto armado.

Os materiais alternativos selecionados foram provenientes da reciclagem dos resíduos de concreto e isoladores elétricos de porcelana. E os Agregados Reciclados (AR) resultantes desta reciclagem foram incorporados em teores de 30% e 50% de substituição do Agregado Natural (AN). A Figura 22 mostra como as composições de concreto desta pesquisa foram nomeadas, sendo ARC (Agregado Reciclado de Concreto) e ARP (Agregado Reciclado de Porcelana).

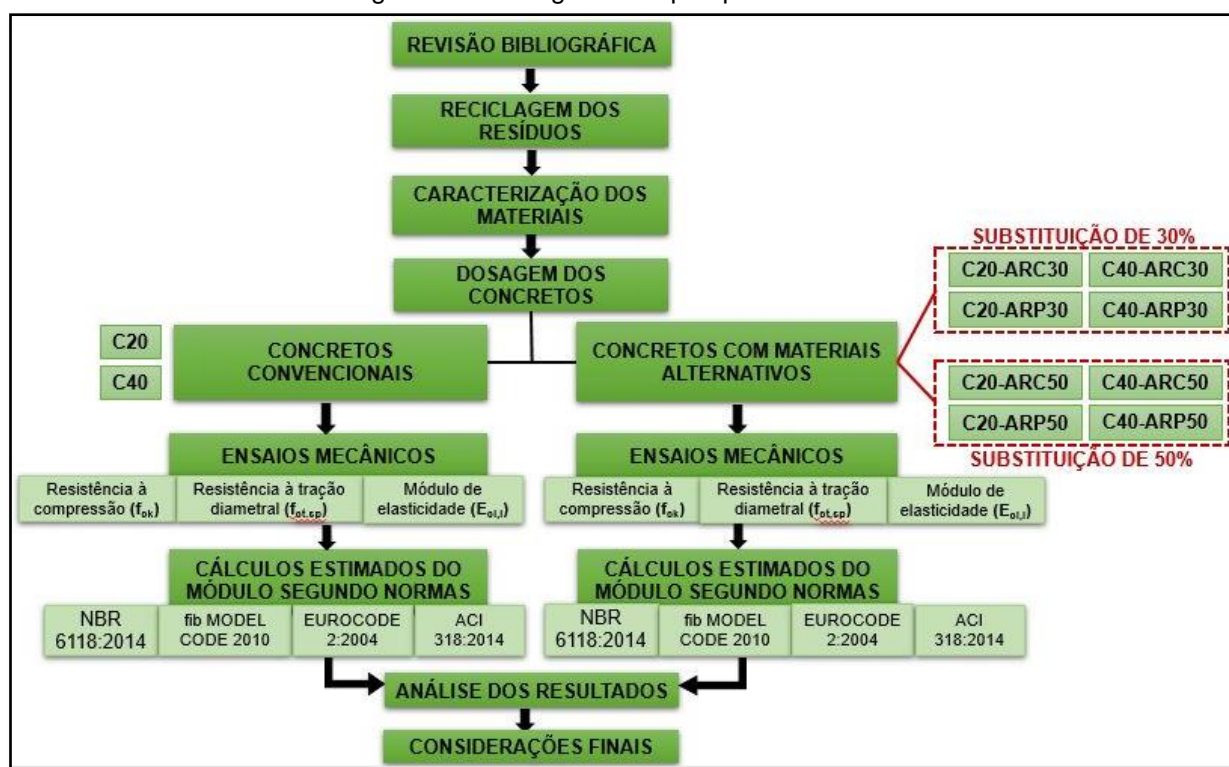
Figura 22. Nomenclatura das composições de concreto.



Fonte: a autora.

E para avaliar experimentalmente e analiticamente o módulo de elasticidade dos concretos, o presente trabalho cumpriu com os procedimentos sintetizados no fluxograma ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Fluxograma de pesquisa.



Fonte: a autora.

Todas as moldagens (Figura 24) e respectivos ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, em Campinas, no Estado de São Paulo.

Figura 24. Moldagem dos corpos de prova do concreto C20.



Fonte: a autora.

5.1. SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES

Os materiais constituintes das composições de concretos já mencionados foram caracterizados conforme resoluções normativas brasileiras. Neste subcapítulo são apresentados a caracterização física e curvas granulométricas dos materiais utilizados no presente programa experimental.

5.1.1. Cimento

O cimento definido para esta pesquisa foi o CP V ARI, e sua massa específica igual a $3,13 \text{ g/cm}^3$ foi ensaiada conforme normativa brasileira – NBR NM23:2001 (ABNT, 2001). Dados como início e fim de pega, composição química e resistência foram fornecidos pelo fabricante.

5.1.2. Aditivo

Para os concretos de resistência igual a 20 MPa foi utilizado o aditivo plastificante poli funcional redutor de água MIRA SET 31. O mesmo apresenta um aspecto líquido e de aparência marrom escuro, a dosagem recomendada pelo fabricante é entre 0,6% e 1,0% em cima do consumo do cimento. O MIRA SET 31 possui massa específica variando entre $1,15$ a $1,21 \text{ g/cm}^3$, com teor de sólidos na faixa de 38% e 42%.

Já para os concretos de resistência de 40 MPa o aditivo usado foi o ADVACAST 525, um superplastificante de última geração à base de policarboxilato, que tem como objetivo proporcionar trabalhabilidade ao concreto sem causar segregação. A dosagem recomendada pelo fabricante varia de 0,15% a 0,80% sobre a massa do cimento. O ADVACAST 525 possui massa específica igual a $1,06 \text{ g/cm}^3$, de aspecto líquido e de cor amarelo claro.

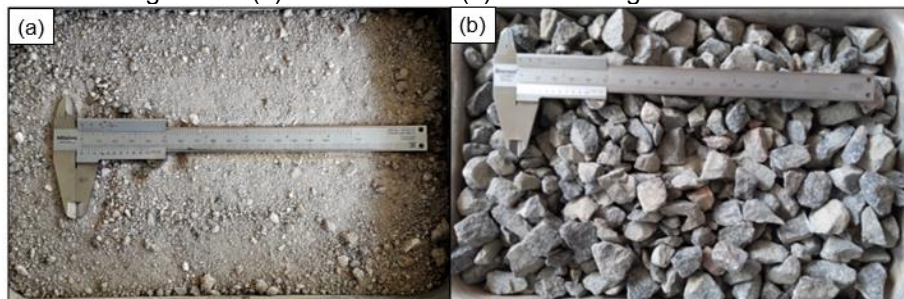
5.1.3. Água de amassamento

Para a água de amassamento foi utilizada a água distribuída pela rede pública de abastecimento de água potável do município de Campinas. E a utilização da mesma no concreto foi de acordo com as recomendações da norma NBR 15900:2009 (ABNT, 2009).

5.1.4. Agregados graúdos e miúdos naturais

Os agregados graúdos e miúdos naturais utilizados foram a areia média e a brita de origem basáltica, ilustrados na Figura 25.

Figura 25. (a) areia média e (b) brita de origem basáltica.



Fonte: a autora.

As determinações de caracterização física da areia média e brita natural se encontram reunidas na Tabela 11, bem como as respectivas normativas brasileiras que regulamentam seus ensaios.

Tabela 11 – Caracterização física dos agregados miúdos e graúdos naturais

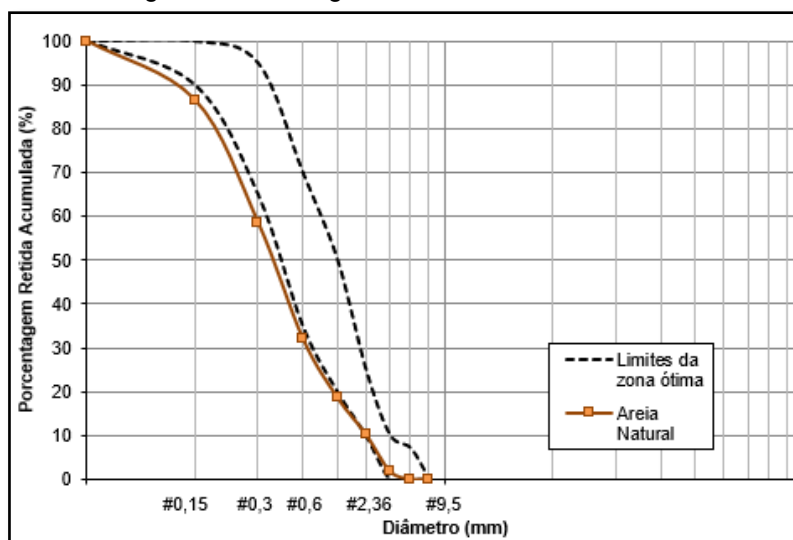
Determinação		Areia natural		Brita natural	
Diâmetro máximo (mm)		4,75	NM 248:2003	25,00	NM 248:2003
Módulo de finura		2,43	NM 248:2003	6,97	NM 248:2003
Massa específica (g/cm ³)		2,53	NM 52:2009	2,74	NM 53:2009
Massa unitária (g/cm ³)	solta	1,50	NM 45:2006	1,46	NM 45:2006
	saturada superfície seca	ND		ND	
	compactada	1,64		1,50	
Índice de vazios (%)		ND	NM 45:2006	99,95	NM 45:2006
Absorção de água (%)		ND	NM 30:2001	0,68	NM 53:2009
Teor de pulverulentos (%)		77,69	NM 46:2003	99,50	NM 46:2003

Obs.: ND (não definido).

Fonte: a autora.

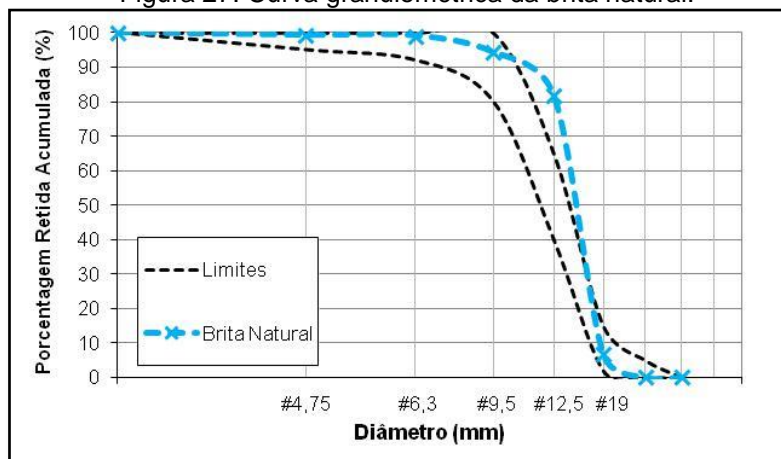
As curvas granulométricas da areia e brita natural com seus respectivos limites dados pela NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003) são ilustradas na Figura 26 e Figura 27.

Figura 26. Curva granulométrica da areia natural.



Fonte: a autora.

Figura 27. Curva granulométrica da brita natural.



Fonte: a autora.

5.1.5. Agregados graúdos reciclados

Os dois tipos de agregado reciclado utilizado para a produção dos concretos deste trabalho foram: agregado reciclado de concreto (ARC) e agregado reciclado de porcelana (ARP, e ambos agregados reciclados foram caracterizados de maneira semelhante (utilizando as normas brasileiras vigentes) aos agregados naturais. A Figura 28 ilustra os agregados reciclados de concreto (ARC) e porcelana (ARPA). E as determinações de caracterização física dos agregados reciclados de concreto e porcelana encontram-se reunidas na Tabela 12, bem como a relação de normativas brasileiras que auxiliaram nos ensaios de caracterização.

Figura 28. (a) ARC; (b) ARP.



Fonte: a autora.

Tabela 12. Caracterização física dos agregados graúdos reciclados.

Determinação		Brita ARC		Brita ARP	
Diâmetro máximo (mm)		25,00	NM 248:2003	25,00	NM 248:2003
Módulo de finura		6,63	NM 248:2003	1,87	NM 248:2003
Massa específica (g/cm ³)	seca	2,68	NM 53:2009	2,35	NM 53:2009
	saturada superfície seca	2,39		2,34	
	aparente	2,22		2,33	
Massa unitária solta (g/cm ³)	solta	1,22	NM 45:2006	1,21	NM 45:2006
	saturada superfície seca	1,30		1,21	
	compactada	1,30		1,29	
Índice de vazios (%)		99,95	NM 45:2006	99,95	NM 45:2006
Absorção de água (%)		6,81	NM 53:2009	0,39	NM 53:2009
Teor de pulverulentos (%)		97,02	NM 46:2003	99,92	NM 46:2003

Obs.: ND (não definido).

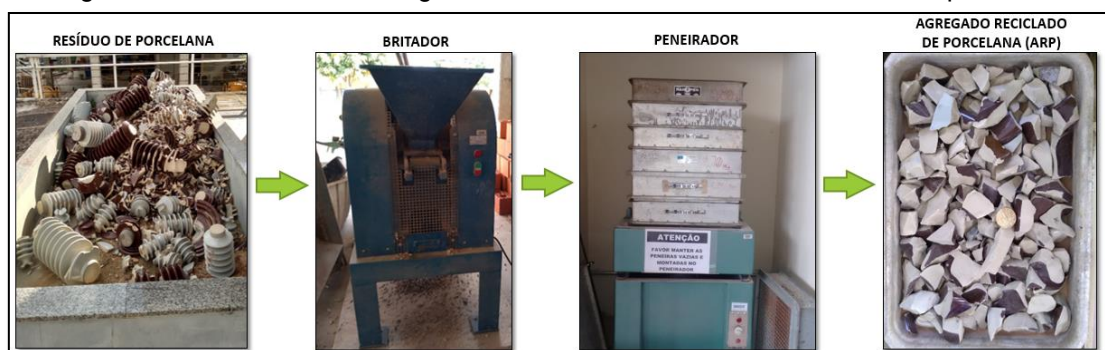
Fonte: a autora.

a) Reciclagem dos resíduos de RCD

Os resíduos de concreto são oriundos da trituração de corpos de prova do Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Já os resíduos de porcelana foram doados por um fabricante de isoladores elétricos de porcelana do município de Pedreira.

O processo de reciclagem dos dois tipos de resíduos de RCD se sucedeu através da determinação do tamanho de abertura da mandíbula do britador, ilustrado na Figura 29. Foram britadas quatro amostras de 5 kg de cada resíduo, e todas as amostras foram submetidas ao ensaio de granulometria no peneirador, conforme orienta a NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003), para assim ser possível comparar suas respectivas curvas granulométricas com a curva da brita natural.

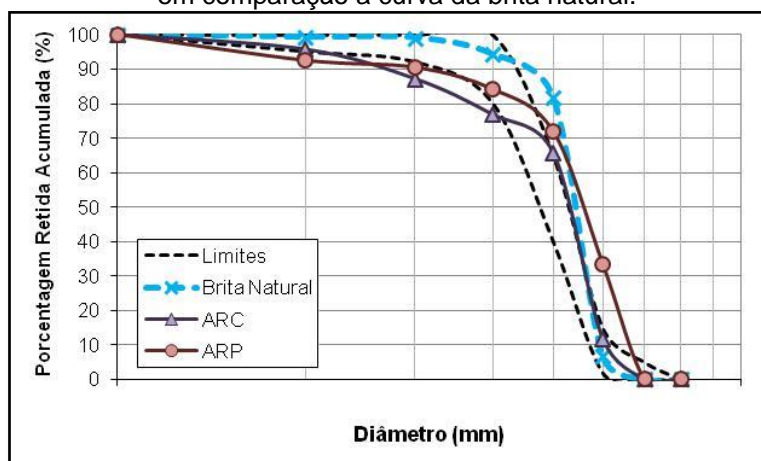
Figura 29. Processo de reciclagem dos resíduos de isoladores elétricos de porcelana.



Fonte: a autora.

A abertura foi idealizada de tal forma que a granulometria dos agregados reciclados ficasse próxima do agregado natural que foi usado no concreto convencional. Portanto foi definida abertura da mandíbula do britador de duas e três voltas para fabricar o ARC e o ARP, respectivamente. E as curvas granulométricas do ARC, ARP e da brita natural são ilustradas na Figura 30.

Figura 30. Curva granulométrica do agregado reciclado de concreto (ARC) e porcelana (ARP) em comparação a curva da brita natural.



Fonte: a autora.

Durante o processo de britagem do resíduo de concreto, verificaram-se que algumas britas se desprenderam da argamassa do resíduo de concreto, assim, algumas britas retomaram sua originalidade de agregado natural, mas ainda envolvidas por uma fina pasta de cimento. Já na britagem do resíduo de porcelana, foi necessária muita cautela durante seu manuseio, em razão do estilhaço causado pela quebra dela.

5.2. DOSAGEM DOS CONCRETOS

A dosagem dos concretos convencionais e dos concretos produzidos com materiais alternativos teve como base principal o método do IPT modificado¹ (HELENE e TERZIAN, 1992). Para isso, foi necessário calcular a resistência de dosagem (f_{cmj}) mediante equação sugerida pela NBR 12655:2015 (ABNT, 2015), e com o auxílio da curva de Abrams foram encontrados valores da relação água/cimento relacionando a resistência à compressão do concreto (f_{ck}) com a resistência do cimento CP V ARI (38 MPa).

A dosagem dos concretos produzidos com materiais alternativos também se baseou no método do IPT modificado. No entanto, a fim de amenizar a diminuição da resistência à compressão ocasionada pela presença dos agregados reciclados, optou-se por reduzir a relação água/cimento dos concretos com resíduos.

Como é conhecido, a massa específica do agregado reciclado se difere da massa específica do agregado natural, e por consequência favorece o aumento do volume do concreto. Para conter essa discrepância, ajustou-se no traço dos concretos com resíduos a quantidade do agregado reciclado a partir da relação da massa específica do agregado gráudo reciclado pela massa específica do agregado gráudo natural.

Outra necessidade prevista pela norma NBR 15116:2004 (ABNT, 2004) é a inclusão da água de pré-molhagem nos concretos com agregado reciclado de concreto (ARC), pois minimiza a absorção de água deles. Portanto, para os concretos compostos por ARC foi inserido água de pré-molhagem de 60% da capacidade de absorção de água do agregado reciclado. Para os concretos com agregado reciclado de porcelana (ARP) não foi incluso a água de pré-molhagem.

¹ Método IPT Modificado – método teórico-experimental que consiste em fixar o abatimento e, através de experimentos pretende-se encontrar a quantidade mínima de água para obter a trabalhabilidade especificada. Dessa forma, a proporção entre agregados miúdos e gráudos é otimizada, e a interferência do cimento, agregados, adições e de outros materiais utilizados é implicitamente incluída.

As proporções obtidas neste estudo de dosagem são apresentadas na Tabela 13 e na Tabela 14.

Tabela 13. Dosagem dos concretos C20's

Determinações		C20	C20-ARC30	C20-ARC50	C20-ARP30	C20-ARP50
Traço	Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Areia	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42
	Brita	2,58	1,81	1,29	1,81	1,29
	ARC	-	0,76	1,26	-	-
	ARP	-	-	-	0,67	1,11
	Relação a/c	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50
	Aditivo (%)	0,760%	0,368%	1,000%	0,563%	0,750%
Consumo cimento (kg/m ³)		354,91	367,97	367,97	367,97	367,97
Teor de argamassa (%)		57%	57%	57%	58%	59%

Fonte: a autora.

Tabela 14. Dosagem dos concretos C40's

Determinações		C40	C40-ARC30	C40-ARC50	C40-ARP30	C40-ARP50
Traço	Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Areia	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10
	Brita	2,90	2,03	1,45	2,03	1,45
	ARC	-	0,85	1,42	-	-
	ARP	-	-	-	0,75	1,25
	Relação a/c	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
	Aditivo (%)	0,75%	0,75%	0,75%	0,75%	0,75%
Consumo cimento (kg/m ³)		388,88	388,88	388,88	388,88	388,88
Teor de argamassa (%)		52%	52%	52%	53%	53%

Fonte: a autora.

Foram utilizados dois tipos de aditivo: o MIRA SET 31 e o ADVACAST 575. Nos primeiros concretos produzidos (concretos de 20MPa), o aditivo poli funcional MIRA SET 31 atendeu adequadamente as composições e viabilizou o molde dos concretos. Entretanto, na produção dos concretos de 40MPa, o aditivo MIRA SET impossibilitou o molde de corpos de prova de concreto, por isso se fez necessário incorporar o aditivo superplastificante ADVACAST 575.

5.2.1. Procedimento de mistura

O procedimento para a produção da mistura de todas as composições desta pesquisa tomou como base a seguinte sequência:

- a) Umedecer a betoneira, e se atentar para escorrer toda a água dela;

- b) Dividir a quantidade de água em duas porções, na primeira porção incorporar duas partes de aditivo, e na segunda porção de água incorporar uma parte de aditivo;
- c) Adicionar o agregado graúdo e a primeira porção da água, misturar;
- d) Adicionar o cimento e misturar;
- e) Adicionar o agregado miúdo e segunda porção de água, misturar por 5 minutos;
- f) Realizar o teste *slump*, dar leves golpes ao lado do corpo da mistura, verificando se o teor de argamassa está adequado;
- g) Na hipótese da trabalhabilidade da mistura não estiver adequada, incorporar cuidadosamente novas partes de aditivo. Atentando-se ao limite de dosagem especificada pelo fabricante do aditivo.

A Figura 31 ilustra como os materiais foram separados para a produção dos concretos deste trabalho, indicando dois baldes azuis referentes a água de amassamento dividida em duas partes, e o balde vermelho representado a água de pré-molhagem dos agregados reciclados de concreto (ARC).

Figura 31. Materiais separados para a produção dos concretos.



Fonte: a autora.

5.3. ENSAIOS MECÂNICOS

O desempenho das composições de todos os concretos produzidos foi avaliado mediante seu desempenho no estado fresco e endurecido, perante os ensaios apresentados abaixo:

5.3.1. Ensaios no estado fresco

O ensaio de abatimento do tronco de cone de Abrams (*test slump*) foi realizado com a intenção de analisar a eventualidade de segregação da mistura ou a existência de vazios no corpo da mistura. O procedimento de ensaio seguiu as orientações da NBR NM 67:1998 (ABNT, 1998) e é ilustrado na Figura 32 o ensaio realizado para o concreto convencional C40.

Figura 32. Ensaio do abatimento do tronco de cone de Abrams do C40.



Fonte: a autora.

5.3.2. Ensaios no estado endurecido

Para avaliar o desempenho de cada concreto no estado endurecido, foram moldados corpos de prova cilíndricos (10cm x 20cm) e cúbicos (10cm x 10cm x 10cm), com quantidade por ensaio mecânico relacionada na Tabela 15.

Tabela 15 - Quantidade de corpos de prova por ensaio

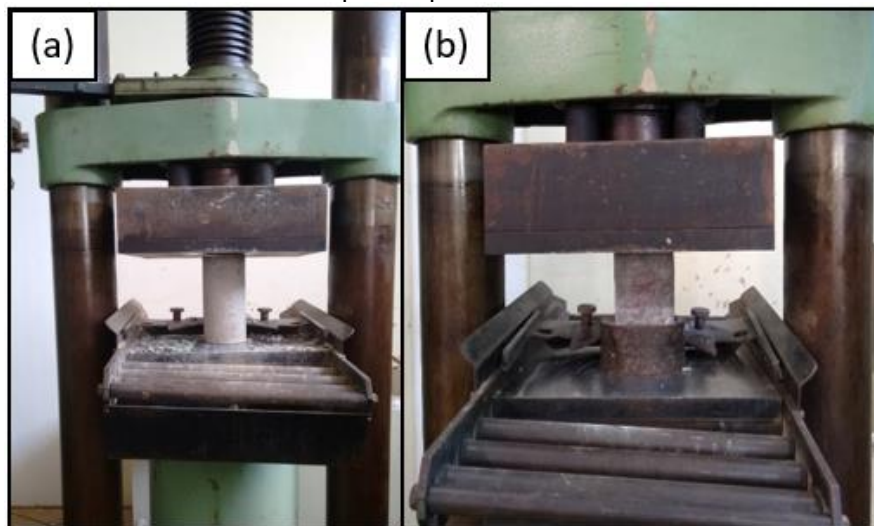
Ensaio	Tipo de CP	Idades	
		7D	28D
Resistência à compressão axial (f_c)	Cilíndrico 10x20	6	6
	Cúbico 10x10x10	-	6
Módulo de elasticidade ($E_{ci,i}$)	Cilíndrico 10x20	6	6
Resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$)	Cilíndrico 10x20	-	6

Fonte: a autora.

As propriedades mecânicas de todos os concretos foram avaliadas mediante a realização dos ensaios de:

- a) Resistência à compressão axial com corpos de prova cilíndricos, conforme NBR 5739:2018 (ABNT, 2018) e ilustrado na Figura 33(a);
- b) Resistência à compressão axial com corpos de prova cúbicos, conforme BS EN 12390-03:2009 (CEN, 2009) e ilustrado na Figura 33(b);

Figura 33. Ensaio de resistência à compressão em (a) corpos de prova cilíndrico e (b) corpos de prova cúbico.



Fonte: a autora.

Os valores de resistência média à compressão axial dos corpos de prova cilíndricos (10cm x 20cm) e cúbicos (10cm x 10cm x 10cm) foram comparados com o intuito de investigar diferenças entre os valores de resistência à medida que se muda a forma geométrica do corpo de prova. Esta investigação foi feita com intuito secundário nesta pesquisa.

- c) Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral, conforme NBR 7222:2011 (ABNT, 2011) e ilustrado na Figura 34(a);

Figura 34. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



Fonte: a autora.

- d) Ensaio de módulo de elasticidade, conforme NBR 8522:2017 (ABNT, 2017) e ilustrado na Figura 35.

Figura 35. Ensaio de módulo de elasticidade.



Fonte: a autora.

O módulo de elasticidade obtido no ensaio da NBR 8522:2017 (ABNT, 2017) faz referência ao módulo de elasticidade tangente inicial, portanto, o mesmo deve ser relacionado ao módulo tangente inicial estimado.

Os ensaios resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral foram realizados na Máquina Universal de Ensaio (INSTRON, modelo BPS NS8490, Patr.19127). E os ensaios de módulo de

elasticidade foi utilizada a Máquina Universal de Ensaios (INSTRON, modelo DL30000; NO6526; Marca Emic, Patr. 124915/119940).

5.4. ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

Para validação dos resultados obtidos neste trabalho foi utilizada a ferramenta de análise de variância (ANOVA *single factor*) mediante uso do software Excel. O ANOVA *single factor*, desenvolvido por R. A. Fisher (1890-1962), consiste em testar a igualdade de duas ou mais médias das amostras, baseado na análise de variância (DEVORE, 2012). Em outras palavras, o ANOVA *single factor* busca detectar possíveis diferenças de médias dentre vários níveis de um fator, ou entre diferentes grupos. Portanto, Devore (2012) define fator como a característica que diferencia um tratamento do outro, e os níveis de um fator são os diferentes tratamentos praticados. Neste estudo, buscou-se analisar a influência dos três níveis (0%, 30% e 50%) do fator (teor de substituição) na resistência à compressão axial e no módulo de elasticidade dos concretos.

Para identificar uma diferença significativa entre médias, o ANOVA *single factor* se baseou no teste de duas hipóteses: a primeira, hipótese nula (H_0) que consiste na igualdade das médias de todas as amostras; e a segunda, hipótese não-nula (H_a) que consiste em pelo menos uma média diferente das demais. Quando hipótese verdadeira ou aceita, considerou-se a inexistência de diferença significativa, ou seja, as médias foram razoavelmente próximas umas das outras, os valores de F foram menores que os valores de $f_{\text{crítico}}$, e os valores-p foram maiores ou iguais ao erro tolerável (ou nível de significância). De modo contrário, quando hipótese falsa ou rejeitada se considerou a existência de diferença significativa, as médias distantes umas das outras, os valores F maiores que os valores de $f_{\text{crítico}}$, e os valores-p menores ao nível de significância adotado igual a 0,05 (5% de incerteza sobre a resistência/módulo do concreto).

5.5. CÁLCULOS ESTIMADOS

As formulações matemáticas utilizadas para estimar o valor do módulo de elasticidade e da resistência à tração foram consultadas na norma brasileira NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) e nas normas estrangeiras *fib* Model Code 2010 (*fib*,

2010), Eurocode 2: 2004 (CEN, 2004) e ACI 318:2014 (ACI, 2014). O objetivo foi comparar os valores estimados por cada norma, comparar os valores estimados com os obtidos e avaliar se há discordância entre eles.

Inicialmente foi determinada a resistência característica à compressão (f_{ck}) a partir dos valores de resistência média à compressão (f_{cm}) dos concretos estudados. Para cada norma (NBR 6118:2014, fib Model Code 2010, Eurocode 2:2004 e ACI 318:2014) foi calculado um valor de resistência característica, visto que cada uma atribui um valor diferente de desvio-padrão. O desvio-padrão refere-se as condições de preparo do concreto, ou seja, assume as condições do laboratório no momento da moldagem bem como os materiais foram separados. A Tabela 16 exibe o valor do desvio-padrão considerado em cada equação de resistência característica segundo cada norma consultada para o desenvolvimento desta pesquisa.

Tabela 16. Equação de resistência característica segundo cada norma.

Norma	Determinações	Equação de resistência característica (f_{ck})	Desvio-padrão
Eurocode 2:2004	f_{cm} (MPa)	$f_{ck} = f_{cm} - 8,00$	8,00
NBR 12655:2015	f_{ck} (MPa)	$f_{ck} = f_{cm} - 4,00$	6,60
fib Model Code 2010	f_{ck} (MPa)	$f_{ck} = f_{cm} - 8,00$	8,00
ACI 301:2010	f'_c (MPa)	$f'_c = f_{cm} - 8,274$	8,274

Obs.: f_{cm} - resistência média à compressão do concreto (MPa); f_{ck} e f'_c - resistência característica à compressão do concreto (MPa).

Fonte: a autora.

No cálculo estimado pela norma brasileira NBR 6118:2014, a resistência característica foi calculada conforme a equação sugerida pela NBR 12655:2015 (ABNT, 2015) com desvio-padrão igual a 6,60MPa. No cálculo estimado pela norma americana ACI 318:2014, a resistência característica foi obtida seguindo as premissas da norma ACI 301:2010 (ACI, 2010). O ACI 301:2010 recomenda desvio-padrão igual a 8,274Mpa para concretos de resistência à compressão entre 20MPa e 35MPa, e para concretos de resistência superior a 35MPa, a norma recomenda a Equação 14.

$$f'_c = \frac{f_{cm}^{-4,826}}{1,10}$$

Equação 14

No cálculo estimado pelo Eurocode 2:2004 e pelo fib Model Code 2010, o desvio-padrão tem valor fixo de 8MPa. O Eurocode 2:2004 recomenda o desvio de 8MPa para concretos de resistência variando entre 12MPa e 90MPa. E o *fib* Model Code 2010 recomenda para concretos de resistência entre 12MPa e 120MPa.

5.5.1. Cálculo estimado da resistência à tração

A resistência à tração direta foi calculada sob as orientações da norma brasileira NBR 6118:2014, e das normas estrangeiras *fib* Model Code 2010, Eurocode 2:2004 e ACI318:2014. Em seguida será esclarecido como foi calculada a resistência estimada à tração dos concretos.

- **NBR 6118:2014**

A resistência à tração direta (f_{ct}), segundo Mehta e Monteiro (2014), é um ensaio raramente utilizado no controle tecnológico do concreto devido a sua complexidade de realização. Portanto a resistência à tração de forma indireta é comumente realizada mediante os ensaios por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) e na flexão com carregamentos nos terços de vão ($f_{ct,f}$).

Na ausência de ensaios para obtenção do $f_{ct,sp}$ e $f_{ct,f}$ é recomendado pela NBR 6118:2014 calcular a resistência à tração direta (f_{ct}) por meio da Equação 15 e 16, sendo a primeira atribuída para concretos de classes de resistência até 50MPa, e a segunda para concretos de classes de resistência superior a 50 MPa.

$$f_{ct,m} = 0,3f_{ck}^{2/3} \quad \text{Equação 15}$$

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln(1 + 0,11f_{ck}) \quad \text{Equação 16}$$

Como os concretos deste trabalho compreendem resistências à compressão de até 50 MPa, utilizou-se da Equação 15 para calcular a resistência à tração direta (f_{ct}). Por último, calculou-se a resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) através da Equação 17, orientando que a resistência à tração indireta ou por compressão diametral é 0,90 de f_{ct} .

$$f_{ct,sp} = \frac{f_{ctm}}{0,90} \quad \text{Equação 17}$$

- **fib Model Code 2010**

Os cálculos da norma brasileira são bem semelhantes aos cálculos do *fib* Model Code 2010, a começar que a resistência à tração direta (f_{ctm}) é calculado de igual maneira conforme demonstra a Equação 18 para concretos de resistência igual ou menor a 50MPa, e a Equação 19 para concretos de resistência superior a 50MPa

$$f_{ct,m} = 0,3f_{ck}^{2/3} - (C \leq 50\text{MPa}) \quad \text{Equação 18}$$

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln(1 + 0,11f_{ck}) - (C > 50\text{MPa}) \quad \text{Equação 19}$$

Nesse ponto, a resistência à tração direta (f_{ctm}) calculada pelo *fib* Model Code 2010 difere da calculada pela NBR6118:2014, devido a diferença entre o valor de resistência característica à compressão (f_{ck}) do concreto adotada por cada norma, pois como é conhecido, o desvio-padrão definido pelo código *fib* se difere do desvio-padrão adotado pela norma brasileira.

O cálculo da resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) foi realizado com o auxílio da Equação 20.

$$f_{ct,sp} = \frac{f_{ctm}}{\alpha_{sp}} = \frac{f_{ctm}}{1,00} \quad \text{Equação 20}$$

Conforme visto o *fib* Model Code 2010 utiliza um fator conversão (α_{sp}) diferente da norma brasileira NBR 6118:2014, enquanto a primeira norma determina $\alpha_{sp}=1,0$, a segunda determina $\alpha_{sp}=0,9$ para resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$). A adoção do $\alpha_{sp}=1,0$ feita pelo código *fib* faz concordância com o trabalho de Malárics e Müller (2010) que estudaram o ensaio da resistência à tração do concreto no campo de estudo da mecânica das fraturas.

- **Eurocode 2:2004**

A norma Eurocode 2:2004 também estima a resistência à tração (f_{ctm}) do concreto a partir da resistência característica à compressão (f_{ck}) com o auxílio da Equação 21.

$$f_{ctm} = 0,3(f_{ck})^{2/3} \quad \text{Equação 21}$$

E considera que a resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) seja 0,90 da resistência média à tração direta (Equação 22), semelhantemente a norma brasileira .

$$f_{ct,sp} = \frac{f_{ctm}}{0,90} \quad \text{Equação 22}$$

Além disso a Eurocode 2:2004 também recomenda a Equação 23 e 24 para estimar o valor da resistência à tração ao longo de seu desenvolvimento, pois leva em conta a influência das condições de cura e secagem assim como as dimensões dos elementos estruturais.

$$f_{ctm(t)} = (\beta_{cc(t)})^\alpha f_{ctm} \quad \text{Equação 23}$$

$$\beta_{cc(t)} = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

$f_{ctm(t)}$ – resistência média à tração por compressão diametral do concreto na idade de t dias

f_{ct} – resistência média à tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias

$\beta_{cc(t)}$ – coeficiente que depende da idade t do concreto

t – idade do concreto em dias

s – coeficiente que dependo do tipo de cimento

- **ACI 318:2014**

A norma americana ACI 318:2014 orienta utilizar apenas a Equação 25 para estimar a resistência à tração indireta (ou por compressão diametral) a partir da resistência média à compressão (f_{cm}).

$$f_{ct} = 0,56\sqrt{f_{cm}} \quad \text{Equação 25}$$

5.5.2. Cálculo estimado do módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi estimado pelas normas NBR6118:2014, *fib* Model Code 2010, Eurocode 2:2004 e ACI318:2014, e adiante será descrito como se sucederam os cálculos.

- **NBR 6118:2014**

A normativa brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) recomenda duas equações para a estimativa do valor do módulo de elasticidade tangente inicial aos 28 dias: a Equação 26 para a classe de resistência do grupo I (20 MPa à 50 MPa); e a Equação 27 para a classe de resistência do grupo II (55 MPa à 90 MPa):

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Equação 26}$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \quad \text{Equação 27}$$

Onde:

α_E – parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade;

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto (MPa);

E_{ci} – módulo de elasticidade ou deformação tangente inicial do concreto (GPa).

Como os concretos deste trabalho são concretos pertencentes ao grupo I da classe de resistência, o módulo de elasticidade tangente inicial foi estimado mediante a Equação 26.

O parâmetro α_E é em função da natureza do agregado gráudo, caso o agregado seja basalto ou diabásio, o valor de E_{ci} aumenta em 20%; se for granito ou gnaisse, o valor se mantém constante; mas se o agregado for de origem calcária, o módulo deve reduzir em 10%, e em 30% se utilizado o arenito. Como foi utilizado brita basáltica para a confecção dos concretos deste trabalho, o valor de α_E será igual a 1,20.

A NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) também recomenda duas equações (Equação 28 e 29) para o módulo de deformação secante, tendo em vista que o módulo obtido através de ensaios mecânicos é secante.

$$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} \quad \text{Equação 28}$$

$$\alpha_i = 0,80 + 0,20 \frac{f_{ck}}{80} \quad \text{Equação 29}$$

Onde:

E_{cs} – módulo de deformação secante do concreto (GPa).

- **fib Model Code 2010**

Ao contrário da NBR 6118:2014 (ABNT, 2014), o *fib Model Code 2010* (*fib*, 2010) recomenda uma equação para estimar o módulo de elasticidade tangente inicial de acordo com a classificação da massa específica do concreto, e não conforme a classificação da resistência característica à compressão (f_{ck}). Logo, o *fib Model Code 2010* (*fib*, 2010) recomenda a Equação 30 para estimar o módulo de concretos com massa específica normal.

$$E_{ci} = 21500\alpha_E \left(\frac{f_{ck}+8}{10} \right)^{1/3} \quad \text{Equação 30}$$

Onde:

E_{ci} – módulo de elasticidade tangente do concreto na σ_i (GPa);

α_E – é 1,0 para agregados de quartzito. Para agregados de tipos diferentes, consultar Tabela 5.1-6 da respectiva norma;

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto (MPa);

Seguindo o mesmo procedimento da norma brasileira, o *fib Model Code 2010* (*fib*, 2010) também apresenta uma formulação para o módulo secante (Equação 31):

$$E_c = \alpha_i E_{ci} = \left(0,80 + 0,22 \left(\frac{f_{cm}}{88} \right) \right) E_{ci} \quad \text{Equação 31}$$

Onde:

E_c – módulo de elasticidade reduzido do concreto (GPa);

f_{cm} – resistência média à compressão do concreto (MPa).

- **Eurocode 2: EN 1992-1-1:2014**

O Eurocode 2: EN 1992-1-1 (CEN, 2004) recomenda duas equações diferentes para o cálculo estimativo do módulo de elasticidade, a Equação 32 é para estimar o módulo secante, a Equação 33 é para estimar o módulo tangente:

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \quad \text{Equação 32}$$

$$E_c = 1,05 E_{cm} \quad \text{Equação 33}$$

Onde:

E_{cm} – módulo de elasticidade secante do concreto (GPa);

E_c – módulo de elasticidade tangente do concreto (GPa);

f_{cm} – resistência média à compressão cilíndrica do concreto (MPa).

- **ACI 318-M:2014**

O ACI 318:2014 (ACI, 2014), por sua vez, preconiza duas equações para estimativa do módulo de elasticidade secante, e não do tangente inicial. Logo, a Equação 34 é para o cálculo estimativo do módulo secante de concretos com massa específica variando entre 1440 kg/m³ à 2560 kg/m³, e a Equação 35 é para estimar concretos normais.

$$E_c = \omega_c^{1,5} 0,043 \sqrt{f'_c} \quad \text{Equação 34}$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad \text{Equação 35}$$

Onde:

E_c – módulo de elasticidade do concreto (GPa);

f'_c – resistência especificada à compressão do concreto (MPa);

w_c – densidade do concreto (kg/m³)

6. RESULTADOS

São aqui apresentados os resultados mecânicos dos concretos estudados neste programa experimental.

6.1. RESULTADOS OBTIDOS

O desempenho mecânico dos concretos foi avaliado mediante os seguintes ensaios mecânicos: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Em seguida serão apresentados os resultados obtidos por ensaios mecânicos dos concretos produzidos para esta pesquisa.

6.1.1. Resistência à compressão axial cilíndrica

Para o ensaio da resistência à compressão axial dos concretos foram rompidos 6 corpos de prova cilíndricos (10cm x 20cm) nas idades de 7 e 28 dias, e este ensaio seguiu as premissas da norma NBR 5739:2018 (ABNT, 2018), portanto a média das resistências de cada concreto é relacionada na Tabela 17, sendo que alguns valores individuais foram descartados para que o coeficiente de variação abaixo de 6% fosse respeitado. Os valores individuais encontram-se no ANEXO A.

Tabela 17. Resistência média à compressão axial cilíndrica ($f_{cm,cilínd}$) dos concretos.

Concretos	7 dias			28 dias		
	f_{cm}	DP	CV	f_{cm}	DP	CV
	(MPa)			(%)		
C20	29,61	1,75	5,91	36,05*	0,81	2,24
C20-ARC30	21,58	0,43	1,98	31,99	1,44	4,51
C20-ARC50	18,49	0,66	3,57	23,01	0,90	3,90
C20-ARP30	30,21	0,98	3,25	35,50	0,22	0,61
C20-ARP50	30,20	0,89	2,95	35,57	2,04	5,73
C40	44,34	2,11	4,75	49,71	1,69	3,40
C40-ARC30	37,05	1,86	5,02	47,48	2,71	5,72
C40-ARC50	35,26	0,26	0,74	38,65	5,98	15,47
C40-ARP30	34,96	1,41	4,04	41,39	4,32	10,44
C40-ARP50	41,49	2,56	6,17	56,25	4,11	7,30

*Feito aos 35 dias. Obs.: $f_{cm,cilínd}$: resistência média à compressão axial cilíndrica;
DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Um comentário a ser feito é de que os concretos C40-ARC50 e C40-ARP30 tiveram resultados de resistência à compressão axial individuais aos 28 dias, com maior variação que as outras séries de concreto, por isso o coeficiente de variação

de ambos ficaram maiores do que das outras séries. O mesmo não aconteceu para os outros resultados de resistência do concreto e nem para o módulo, por isso os resultados foram validados nesta pesquisa.

6.1.2. Resistência à compressão axial cúbica

Na idade de 28 dias, foram ensaiados 6 corpos de provas cúbicos (10cm x 10cm x 10cm) para obter a resistência à compressão axial cúbica dos concretos, o procedimento de ensaio seguiu as recomendações da norma estrangeira BS EN 12390-03:2009 (CEN, 2009). E a Tabela 18 apresenta a resistência média à compressão cúbica dos concretos deste trabalho, e da mesma maneira, alguns valores individuais foram descartados para que o coeficiente de variação de 6% fosse respeitado, os valores individuais são listados no ANEXO B.

Tabela 18. Resistência média à compressão axial cúbica ($f_{cm,cub}$) dos concretos.

Concretos	28 dias		
	$f_{cm,cub}$	DP	CV
	(MPa)		
C20	42,09*	2,31	5,48
C20-ARC30	36,53	1,88	5,14
C20-ARC50	31,68	2,17	6,86
C20-ARP30	54,32	2,51	4,62
C20-ARP50	39,70	2,24	5,63
C40	54,16	2,62	4,85
C40-ARC30	48,41	0,59	1,23
C40-ARC50	41,91	0,43	1,02
C40-ARP30	43,78	0,88	2,01
C40-ARP50	58,78	3,55	6,04

*Feito aos 35 dias. Obs.: $f_{cm,cub}$: resistência média à compressão axial cúbica;
DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

6.1.3. Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração dos concretos estudados neste trabalho foi obtida de forma indireta com a realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$). O ensaio seguiu as orientações da norma NBR 7222:2011 (ABNT, 2011), portanto 6 corpos de prova (20cm x 10cm) foram rompidos na idade de 28 dias, e os seguintes valores de resistência à tração diametral média são sintetizados na Tabela 19.

Tabela 19. Resistência média à tração por compressão diametral ($f_{ctm,sp}$) dos concretos.

Concretos	28 dias		
	$f_{ctm,sp}$	DP	CV
	(MPa)		
C20	3,99*	0,32	7,99
C20-ARC30	3,10	0,16	5,02
C20-ARC50	2,64	0,15	5,64
C20-ARP30	3,57	0,14	3,82
C20-ARP50	3,31	0,07	1,97
C40	5,14	0,26	4,98
C40-ARC30	4,29	0,25	5,86
C40-ARC50	4,63	0,10	2,19
C40-ARP30	4,34	0,20	4,72
C40-ARP50	4,50	0,03	0,57

*Feito aos 35 dias. Obs.: $f_{ct,sp}$: resistência média à tração compressão diametral;
 DV: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Valores individuais foram descartados se favoreceram o aumento do coeficiente de variação acima de 6%, no ANEXO C encontra-se os valores individuais de resistência à tração.

6.1.4. Módulo de elasticidade

No ensaio mecânico do módulo de elasticidade foram ensaiados 6 corpos de prova cilíndricos (10cm x 20cm) nas idades de 7 e 28 dias. O ensaio obedeceu às orientações da norma NBR 8522:2017 (ABNT, 2017), por isso foi necessário descartar alguns valores individuais para determinar a média de cada concreto, isto porque a NBR 8522:2017 diz que se a resistência efetiva ($f_{c,ef}$) diferir da resistência de ruptura (f_c) do concreto em $\pm 20\%$ os valores não são confiáveis, e também foi considerado 6% de coeficiente de variação. Essas verificações sugeridas pela norma foram realizadas e são apresentadas no Anexo D.

Portanto, os valores médios do módulo de elasticidade dos concretos desta pesquisa são sintetizados na Tabela 20.

Tabela 20. Módulo de elasticidade obtido dos concretos.

Concretos	7 dias			28 dias		
	E_{cm}	DP	CV	E_{cm}	DP	CV
	(GPa)			(GPa)		
C20	34,81	1,17	3,36	36,16*	1,90	5,25
C20-ARC30	38,57	1,79	4,63	40,82	1,47	3,59
C20-ARC50	31,41	1,76	5,61	32,01	1,53	4,79
C20-ARP30	42,73	0,68	1,58	41,59	1,65	3,97
C20-ARP50	40,24	1,94	4,81	43,07	2,50	5,80
C40	43,36	1,99	4,58	38,11	0,82	2,15
C40-ARC30	41,85	2,25	5,37	43,89	2,41	5,50
C40-ARC50	35,45	1,76	4,95	36,03	1,63	4,53
C40-ARP30	35,99	1,68	4,66	46,85	2,41	5,14
C40-ARP50	45,93	1,53	3,34	44,03	0,38	0,86

*Feito aos 35 dias. Obs.: E_c : módulo de elasticidade secante;
 DV: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

6.2. RESULTADOS DE CÁLCULO

Os valores de resistência característica à compressão (f_{ck}) calculados para os concretos de 20MPa são apresentados na Tabela 21. E os valores de resistência característica calculados para os concretos de 40MPa são apresentados na Tabela 22.

Tabela 21. Resistência característica à compressão (f_{ck}) dos concretos de 20MPa.

Determinações	C20	C20-ARC30	C20-ARC50	C20-ARP30	C20-ARP50	Normas de estimativa
f_{cm} (MPa)	36,05	31,99	23,01	35,50	35,57	-
f_{ck} (MPa)	29,45	25,39	16,41	28,90	28,97	NBR6118:2014
f_{ck} (MPa)	28,05	23,99	15,01	27,50	27,57	fib Model Code 2010
f_{ck} (MPa)	28,05	23,99	15,01	27,50	27,57	Eurocode 2:2004
f'_c (MPa)	27,77	23,72	14,74	27,23	27,30	ACI 318:2014

Obs.: f_{cm} - resistência média à compressão do concreto (MPa); f_{ck} e f'_c - resistência característica à compressão do concreto (MPa).

Fonte: a autora.

Tabela 22. Resistência característica à compressão (f_{ck}) dos concretos de 40MPa.

Determinações	C40	C40- ARC30	C40- ARC50	C40- ARP30	C40- ARP50	Normas de estimativa
f_{cm} (MPa)	49,71	47,48	38,65	41,39	56,25	-
f_{ck} (MPa)	43,11	40,88	32,05	34,79	49,65	NBR6118:2014
f_{ck} (MPa)	41,71	39,48	30,65	33,39	48,25	<i>fib</i> Model Code 2010
f_{ck} (MPa)	41,71	39,48	30,65	33,39	48,25	Eurocode 2:2004
f'_c (MPa)	40,80	38,78	30,75	33,24	46,75	ACI 318:2014

Obs.: f_{cm} - resistência média à compressão do concreto (MPa); f_{ck} e f'_c - resistência característica à compressão do concreto (MPa).

Fonte: a autora.

O Eurocode 2:2004 considera um desvio padrão igual a 8MPa, porém o cálculo do módulo de elasticidade e da resistência à tração é realizado a partir da resistência média à compressão (f_{cm}) dos concretos. Enquanto as demais normas calculam a partir da resistência característica à compressão (f_{ck}).

6.2.1. Módulo de elasticidade estimado

A partir da resistência característica foi estimado o módulo de elasticidade seguindo as equações recomendadas pela norma brasileira e pelas normas estrangeiras. A Tabela 23 reúne os valores de módulo estimado dos concretos de 20MPa e a Tabela 24 reúne os módulos estimados dos concretos de 40MPa.

Tabela 23. Módulo de elasticidade estimado dos concretos de 20Mpa.

Determinações	C20	C20- ARC30	C20- ARC50	C20- ARP30	C20- ARP50
E_c (GPa) - NBR 6118:2014	36,46	33,86	27,22	36,13	36,17
E_c (GPa) - <i>fib</i> Model Code 2010	39,56	38,02	34,06	39,36	39,38
E_c (GPa) - ACI 318:2014	24,77	22,89	18,04	24,52	24,56
E_c (GPa) - Eurocode 2:2004	33,94	32,74	29,66	33,78	33,80

Fonte: a autora.

Tabela 24. Módulo de elasticidade estimado dos concretos de 40MPa

Determinações	C40	C40-ARC30	C40-ARC50	C40-ARP30	C40-ARP50
E_c (GPa) - NBR 6118:2014	44,12	42,97	38,04	39,64	47,35
E_c (GPa) - fib Model Code 2010	44,03	43,36	40,49	41,42	45,88
E_c (GPa) - ACI 318:2014	30,02	29,27	26,06	27,10	32,14
E_c (GPa) - Eurocode 2:2004	37,37	36,86	34,65	35,37	38,78

Fonte: a autora.

6.2.2. Resistência à tração estimada

Com os valores de resistência característica à compressão determinados também se calculou a resistência à tração. A Tabela 25 sintetiza os valores de resistência à tração direta (f_{ctm}) e de resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) calculados pelas normas NBR6118:2014, fib Model Code 2010, Eurocode 2:2004 e ACI318:2014, respectivamente.

Tabela 25. Resistência à tração estimada pelas normas consultadas

Concretos	NBR 6118:2014		fib Model Code 2010		Eurocode 2:2004		ACI 318:2014	
	f_{ct} (GPa)	$f_{ct,sp}$ (GPa)	f_{ct} (GPa)	$f_{ct,sp}$ (GPa)	f_{ct} (GPa)	$f_{ct,sp}$ (GPa)	f_{ct} (GPa)	$f_{ct,sp}$ (GPa)
C20	2.86	3.18	2.77	3.08	2.77	2.77	ND	3.36
C20-ARC30	2.59	2.88	2.50	2.77	2.50	2.50	ND	3.17
C20-ARC50	1.94	2.15	1.83	2.03	1.83	1.83	ND	2.69
C20-ARP30	2.83	3.14	2.73	3.04	2.73	2.73	ND	3.34
C20-ARP50	2.83	3.14	2.74	3.04	2.74	2.74	ND	3.34
C40	3.69	4.10	3.61	4.01	3.61	3.61	ND	3.95
C40-ARC30	3.56	3.96	3.48	3.86	3.48	3.48	ND	3.86
C40-ARC50	3.03	3.36	2.94	3.26	2.94	2.94	ND	3.48
C40-ARP30	3.20	3.55	3.11	3.46	3.11	3.11	ND	3.60
C40-ARP50	4.05	4.50	3.98	4.42	3.98	3,98	ND	4.20

7. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

7.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

7.1.1. Análise da resistência à compressão axial obtida

Para compreender a influência dos agregados reciclados na resistência à compressão dos concretos estudados, utilizou-se a ferramenta ANOVA *single factor* a fim de verificar quais composições com agregados reciclados diferem significativamente do concreto referência (concreto convencional). As comparações dos concretos foram feitas em pares de amostras de concreto e para cada par foram realizadas duas análises, a primeira contendo resultados onde a resistência média foi calculada considerando apenas os resultados que forneceram um coeficiente de variação menor do que 6% (resultados com CV); e a segunda contendo resultados onde a resistência média foi obtida sem qualquer tipo de tratamento estatístico (resultados sem CV). A Tabela 26 e a Tabela 27 sintetizam a análise ANOVA da resistência à compressão de concretos de 20MPa feita com resultados sem CV (ou seja, sem tratamento estatístico) e com resultados tratados estatisticamente anteriormente (resultados com CV).

Tabela 26. Análise ANOVA da resistência à compressão axial dos concretos de 20MPa (resultados sem CV).

Concretos		Média 1 (MPa)	Média 2 (MPa)	F	valor-P	f _{crítico}	diferença de média
C20	C20-ARC30	33,28	30,22	3,21	0,10	4,96	3,06
C20	C20-ARC50	33,28	21,53	54,12	0,000024	4,96	11,75
C20	C20-ARP30	33,28	35,00	0,65	0,44	4,96	1,72
C20	C20-ARP50	33,28	33,01	0,02	0,90	4,96	0,27

Fonte: a autora.

Tabela 27. Análise ANOVA da resistência à compressão axial dos concretos de 20MPa (resultados com CV).

Concretos		Média 1 (MPa)	Média 2 (MPa)	F	valor-P	f _{crítico}	diferença de média
C20	C20-ARC30	36,05	31,99	12,68	0,02	7,71	4,06
C20	C20-ARC50	36,05	23,02	293,75	0,000068	7,71	13,03
C20	C20-ARP30	36,05	35,50	1,43	0,32	10,13	0,55
C20	C20-ARP50	36,05	35,57	0,09	0,78	7,71	0,47

Fonte: a autora.

Para os concretos de 40 MPa, a Tabela 28 e a Tabela 29 mostram as duas análises ANOVA da resistência à compressão com e sem consideração do coeficiente de variação.

Tabela 28. Análise ANOVA da resistência à compressão axial dos concretos de 40MPa (resultados sem CV).

Concretos		Média 1 (MPa)	Média 2 (MPa)	F	valor-P	F crítico	diferença de média
C40	C40-ARC30	49,71	47,48	1,10	0,34	6,61	2,23
C40	C40-ARC50	49,71	38,65	5,92	0,09	10,13	11,06
C40	C40-ARP30	49,71	41,39	6,18	0,09	10,13	8,31
C40	C40-ARP50	49,71	56,26	4,35	0,17	18,51	6,55

Fonte: a autora.

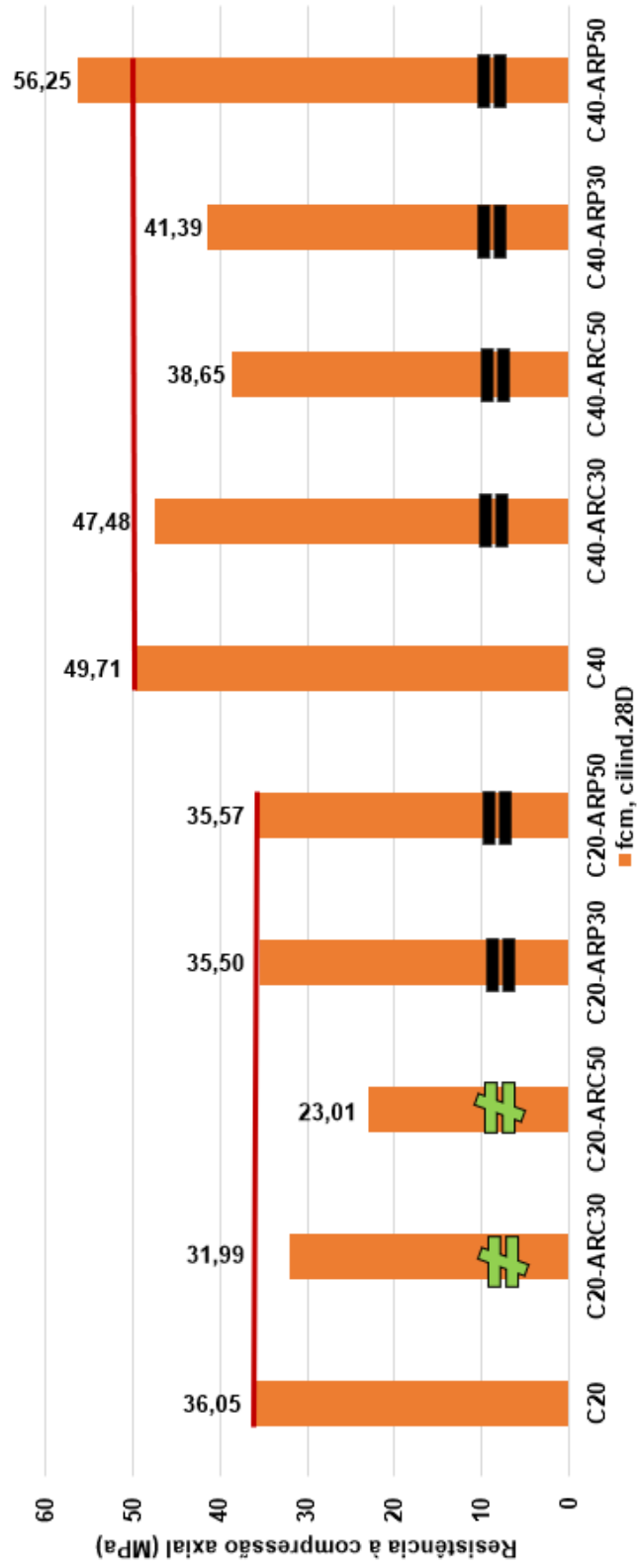
Tabela 29. Análise ANOVA da resistência à compressão axial dos concretos de 40MPa (resultados com CV).

Concretos		Média 1 (MPa)	Média 2 (MPa)	F	valor-P	F crítico	diferença de média
C40	C40-ARC30	41,21	46,37	1,61	0,23	4,96	5,16
C40	C40-ARC50	41,21	34,41	2,26	0,16	4,96	6,80
C40	C40-ARP30	41,21	35,45	1,33	0,28	4,96	5,76
C40	C40-ARP50	41,21	49,75	1,46	0,27	5,59	8,54

Fonte: a autora.

Na Figura 36 ilustra-se a influência da incorporação dos agregados reciclados na resistência à compressão do concreto. Por isso, uma linha vermelha foi traçada a partir do resultado de 28 dias do concreto referência de 20MPa e 40MPa para comparar com o resultado de resistência à compressão dos concretos com ARC e ARP. O sinal de diferença e igualdade presente na Figura 36 representa o resultado da análise do ANOVA, o sinal de diferença indica diferença significativa da composição em questão ao concreto referência, e o sinal de igualdade significa que a composição é igual ao concreto referência.

Figura 36. Análise da resistência à compressão axial dos concretos.



Fonte: a autora.

Analisando primeiramente os concretos de 20MPa e mediante validação dos resultados pelo ANOVA, viu-se que a resistência à compressão dos concretos com ARC são significativamente diferentes da resistência do concreto referência, ao passo que a resistência dos concretos com ARP são iguais. Logo, para esta pesquisa ficou indicado que a incorporação do resíduo de concreto (ARC) afeta negativamente a resistência do concreto de 20MPa, enquanto o resíduo de porcelana (ARP) se apresenta como viável de ser utilizado como agregado nesta pesquisa.

A redução na resistência à compressão é mais elevada quando se aumenta o teor de substituição do agregado natural pelo ARC, isto porque ao aumentar o teor de substituição aumenta-se a quantidade de material reciclado e as características que diminuem a resistência mecânica do concreto, como heterogeneidade, porosidade, alta absorção e baixa resistência (PEREZ-BENEDICTO et al., 2012). Na idade de 28 dias, a resistência à compressão do concreto C20-ARC30 diminuiu 11,25% enquanto a resistência do concreto C20-ARC50 diminuiu 36,17%.

A resistência média à compressão dos concretos com porcelana foi igual a resistência média do concreto convencional, em razão dos resíduos de porcelana possuírem similaridades químicas aos agregados naturais (CAMPOS E PAULON, 2015). Ferreira et al. (2018) também afirmam que as porcelanas apresentam alta resistência mecânica devido a presença da argila, feldspato e quartzo, e por isso os resultados mecânicos de concretos com porcelana são muito satisfatórios.

Na análise dos concretos de 40MPa, nenhum dos agregados reciclados utilizados neste trabalho (ARC e ARP) afetaram substancialmente a resistência a compressão do concreto de 40MPa, conforme indicado pela análise ANOVA.

7.1.2. Relação da resistência à compressão axial cilíndrica e cúbica obtidas

Entende-se que o tamanho e a forma dos corpos de prova variam de acordo com a norma vigente do país e dos materiais utilizados no ensaio. Em países europeus é mais comum utilizarem corpos de prova cúbicos, enquanto no Brasil, EUA e outros países se utilizam corpos de prova cilíndricos com relação altura/diâmetro igual a 2. Há países que utilizam tanto formas cúbicas como cilíndricas (HAMASSAKI e SANTOS, 2013).

Os parâmetros de corpo de prova, tais como tamanho, geometria e condições de estado de umidade em geral afetam os resultados obtidos por ensaios mecânicos (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Mas apesar dessa grande influência, sabe-se que não é muito estudado o efeito do tamanho e forma de corpos de prova de concreto na determinação da resistência à compressão, quando comparado aos ensaios de resistência à tração (MUCIACCIA et al., 2017).

Diante disso, nesse estudo buscou-se avaliar o comportamento da resistência à compressão dos concretos moldados em corpos de provas cilíndricos e em corpos de prova cúbicos. E para validar a diferença entre essas duas resistências, utilizou-se a ferramenta ANOVA para analisar dois grupos de resultados: resultados sem tratamento estatístico (sem CV) e resultados com tratamento estatístico (com CV). Para os concretos de 20 MPa, a Tabela 30 e a Tabela 31 apresentam a análise ANOVA da resistência cilíndrica e cúbica de resultados sem e com tratamento estatístico, respectivamente.

Tabela 30. Análise ANOVA da resistência à compressão cilíndrica e cúbica dos concretos de 20MPa (resultados sem CV).

Concretos	$f_{c,cilind}$ (MPa)	$f_{c,cubic}$ (MPa)	F	valor-P	$f_{critico}$	diferença de média
C20	33,28	40,15	13,35	0,004434	4,96	6,87
C20-ARC30	30,22	37,56	11,89	0,006239	4,96	7,34
C20-ARC50	21,53	31,68	54,72	0,000023	4,96	10,15
C20-ARP30	35,00	54,32	64,22	0,000043	5,32	19,31
C20-ARP50	33,01	43,89	16,02	0,002510	4,96	10,87

Fonte: a autora.

Tabela 31. Análise ANOVA da resistência à compressão cilíndrica e cúbica dos concretos de 20MPa (resultados com CV).

Concretos	$f_{c,cilind}$ (MPa)	$f_{c,cubic}$ (MPa)	F	valor-P	$f_{critico}$	diferença de média
C20	36,05	42,09	11,74	0,026635	7,71	6,05
C20-ARC30	31,99	36,53	13,26	0,014876	6,61	4,54
C20-ARC50	23,02	31,68	55,36	0,000073	5,32	8,67
C20-ARP30	35,50	54,32	159,84	0,000055	6,61	18,82
C20-ARP50	35,57	39,71	6,53	0,050943	6,61	4,13

Fonte: a autora.

A Tabela 32 e a Tabela 33 sintetizam a análise ANOVA realizada da resistência a compressão cilíndrica e cúbica dos concretos de 40MPa, sendo a primeira não considerando tratamento estatístico e a segunda com tratamento.

Tabela 32. Análise ANOVA da resistência à compressão cilíndrica e cúbica dos concretos de 40MPa (resultados sem CV).

Concretos	$f_{c,cilind}$ (MPa)	$f_{c,cubic}$ (MPa)	F	valor-P	$f_{crítico}$	diferença de média
C40	41,21	49,06	1,96	0,19	4,96	7,84
C40-ARC30	46,37	48,32	0,35	0,57	4,96	1,94
C40-ARC50	33,73	38,75	3,29	0,10	4,84	5,01
C40-ARP30	35,45	48,09	7,40	0,0215	4,96	12,64
C40-ARP50	49,75	51,73	0,08	0,79	5,59	1,98

Fonte: a autora.

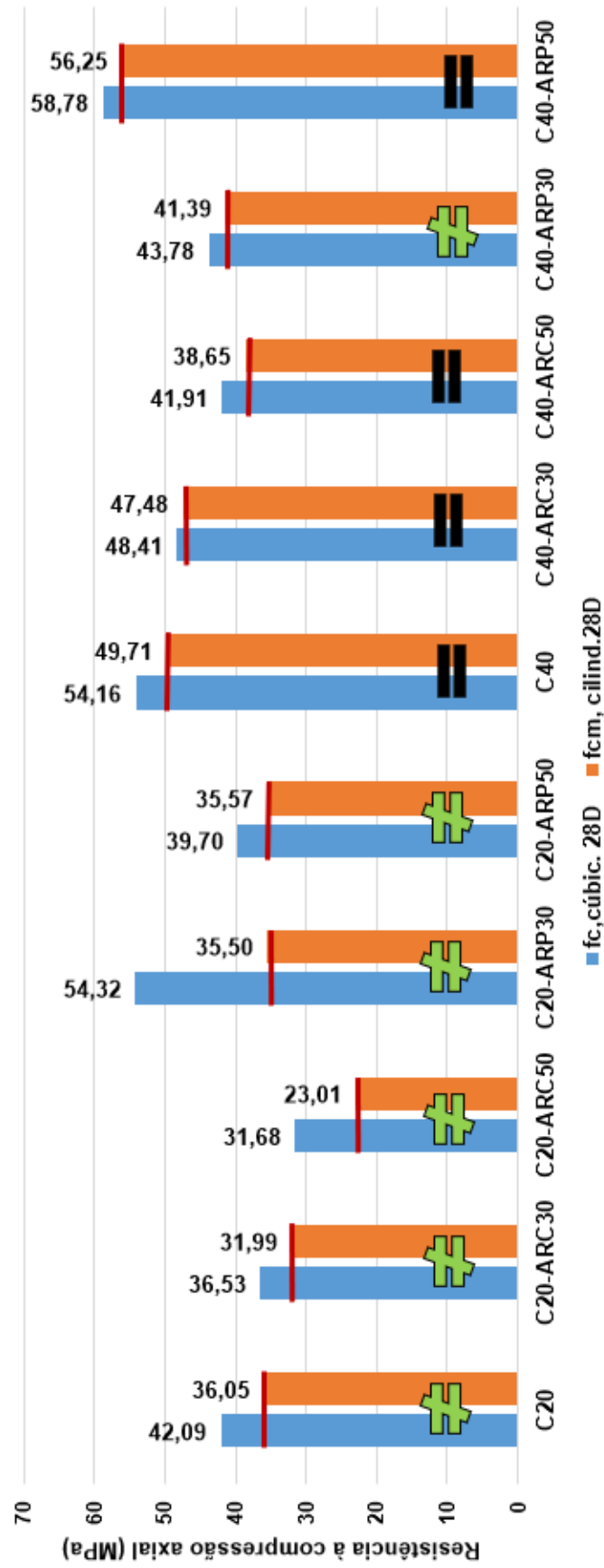
Tabela 33. Análise ANOVA da resistência à compressão cilíndrica e cúbica dos concretos de 40MPa (resultados com CV).

Concretos	$f_{c,cilind}$ (MPa)	$f_{c,cubic}$ (MPa)	F	valor-P	$f_{crítico}$	diferença de média
C40	49,71	54,16	4,51	0,10	7,71	4,45
C40-ARC30	47,48	48,41	0,32	0,59	5,99	0,93
C40-ARC50	38,65	41,91	0,53	0,52	10,13	3,26
C40-ARP30	41,39	43,78	1,23	0,32	6,61	2,39
C40-ARP50	56,26	58,78	0,55	0,51	10,13	2,53

Fonte: a autora.

Na Figura 37 ilustra-se a diferença entre a resistência à compressão cilíndrica e a resistência à compressão cúbica. Por meio dos sinais de diferença é possível ver quais comparações obtiveram diferença significativa perante a análise ANOVA e os sinais de igualdade indicam quais resistências foram semelhantes entre si.

Figura 37. Análise comparativa da resistência à compressão axial cúbica e cilíndrica dos concretos.



Fonte: a autora.

Percebe-se analisando a Figura 37 que existe diferença entre resistências de cubos e de cilindros moldados com um mesmo concreto. Mehta e Monteiro (2014) explica que a razão altura/diâmetro é a responsável por essa diferença, pois quanto maior a razão altura/diâmetro menor a resistência. A razão altura/diâmetro dos corpos de prova cúbicos (10cm x 10cm x 10cm) deste trabalho é igual a 1, enquanto a razão altura/diâmetro dos corpos de prova cilíndricos (10cm x 20cm) é igual a 2.

Para os concretos de 20MPa, as resistências cúbicas foram superiores as resistências cilíndricas (com percentuais de aumento variando entre 11,61% a 53,02%), e esses resultados foram validados pelo ANOVA mostrando que o tipo de corpo de prova utilizado influencia significativamente no resultado de resistência.

Kaish et al. (2015) dizem que normalmente corpos de prova de menor relação altura/diâmetro levam a maiores resistências, e Sinae et al. (2015) indicam que quando ocorre diminuição da relação altura/diâmetro normalmente as tensões e deformações de pico reduzem, acarretando a maiores resistências. Neville (2015) explica que uma possível causa seria o efeito da contenção dos pratos da prensa que se estende por toda altura dos cubos, mas nos cilindros acaba não atingindo uma parte da altura.

Diferente dos concretos de 20MPa, os concretos de 40MPa não tiveram diferença significativa entre a resistência cilíndrica e cúbica, por isso para os concretos de 40MPa estudados o tipo de geometria não afeta substancialmente seus resultados de resistência, exceto o concreto C40-ARP30 que indica diferença significativa. Segundo Neville (2015) a relação entre as resistências do cilindro e do cubo aumenta muito com o aumento da resistência, e Gyurkó e Nemes (2020) também encontraram em seu trabalho que o efeito da geometria do corpo de prova é mais significativo em concretos de baixa classe de resistência (C20/25).

Na Tabela 34 apresenta-se a relação da resistência cilíndrica e da resistência cúbica dos concretos, e é possível observar que a relação resistência cilíndrica/cúbica dos concretos de 40MPa é maior que a relação dos concretos de 20MPa.

Tabela 34. Relação da resistência à compressão cilíndrica e da resistência à compressão cúbica.

Concretos	Relação entre $f_{c,cubic}$ e $f_{c,cilind}$
C20	0,86
C20-ARC30	0,88
C20-ARC50	0,73
C20-ARP30	0,65
C20-ARP50	0,90
C40	0,92
C40-ARC30	0,98
C40-ARC50	0,92
C40-ARP30	0,95
C40-ARP50	0,96

Fonte: a autora.

7.1.3. Relação entre resistência à compressão axial obtida e a resistência à tração obtida

A resistência à compressão axial é a principal propriedade mecânica do concreto utilizada por muitos engenheiros para o dimensionamento e/ou verificações de estruturas. A resistência à tração e à flexão, por outro lado, são pouco utilizadas, isto porque elas são da ordem de 10% a 15% da resistência à compressão, respectivamente (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Mediante análise da Tabela 35 nota-se que a resistência à tração dos concretos deste trabalho é da ordem de 8% a 12% da resistência à compressão.

Tabela 35. Razão da resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) e à resistência à compressão axial (f_{cm}) dos concretos.

Concretos	f_{cm}	$f_{ct,sp}$	Razão (%)
	(MPa)	(MPa)	resistência à tração / resistência à compressão
C20	36,05	3,99	11%
C20-ARC30	31,99	3,10	10%
C20-ARC50	23,01	2,64	11%
C20-ARP30	35,50	3,57	10%
C20-ARP50	35,57	3,31	9%
C40	49,71	5,14	10%
C40-ARC30	47,48	4,29	9%
C40-ARC50	38,65	4,63	12%
C40-ARP30	41,39	4,34	10%
C40-ARP50	56,25	4,50	8%

Fonte: a autora.

Os mesmos autores ainda afirmam que as resistências à compressão e à tração são intimamente relacionadas, e à medida que a resistência à compressão do concreto aumenta, a resistência à tração também aumenta, mas a uma taxa decrescente, ou seja, quando mais alta a resistência à compressão, menor a razão resistência à tração/compressão.

Esta afirmação se comprova ao analisar a Tabela 35 que mostra que o concreto de maior resistência C40-ARP50 é o de menor razão resistência à tração/compressão, e o concreto de menor resistência C20-ARC50 é o de menor razão resistência à tração/compressão.

7.1.4. Análise do módulo de elasticidade obtido

Com a intenção de analisar a incorporação do agregado reciclado de concreto (ARC) e de porcelana (ARP) no módulo de elasticidade dos concretos estudados, utilizou-se da ferramenta ANOVA *single factor* para entender quais agregados reciclados e em quais proporções afetam de maneira significativa o módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade dos concretos referência (C20 e C40) foram comparados individualmente aos módulos de cada concreto que levou agregado reciclado. Para cada comparação, foram feitas duas análises, a primeira com resultados sem considerar o coeficiente de variação na determinação do módulo médio (resultados sem CV) e, a segunda contendo resultados considerando coeficiente de variação igual a 6% (resultados com CV). A Tabela 36 e a Tabela 37 exibem a análise ANOVA do módulo de elasticidade calculado com os resultados sem e com tratamento estatístico, respectivamente.

Tabela 36. Análise ANOVA do módulo médio de elasticidade dos concretos de 20MPa (resultados sem CV).

Concretos		Média 1 (GPa)	Média 2 (GPa)	F	valor-P	F crítico	diferença de média
C20	C20-ARC30	36,16	40,84	24,59	0,0006	4,96	4,67
C20	C20-ARC50	36,16	31,37	17,28	0,0020	4,96	4,79
C20	C20-ARP30	36,16	39,37	3,61	0,0866	4,96	3,21
C20	C20-ARP50	36,16	42,05	13,94	0,0039	4,96	5,88

Fonte: a autora.

Tabela 37. Análise ANOVA do módulo médio de elasticidade dos concretos de 20MPa (resultados com CV)

Concretos		Média 1 (GPa)	Média 2 (GPa)	F	valor-P	F crítico	diferença de média
C20	C20-ARC30	36,16	40,82	20,00	0,0016	5,12	4,66
C20	C20-ARC50	36,16	32,01	15,38	0,0035	5,12	4,15
C20	C20-ARP30	36,16	41,59	21,54	0,0017	5,32	5,42
C20	C20-ARP50	36,16	43,07	27,19	0,0006	5,12	6,90

Fonte: a autora.

A Tabela 38 e a Tabela 39 apresentam na devida ordem a análise ANOVA dos concretos de 40MPa com tratamento estatístico e sem tratamento estatístico.

Tabela 38. Análise ANOVA do módulo médio de elasticidade dos concretos de 40MPa (resultados sem CV).

Concretos		Média 1 (GPa)	Média 2 (GPa)	F	valor-P	F crítico	diferença de média
C40	C40-ARC30	41,69	41,46	0,01	0,91	4,96	0,23
C40	C40-ARC50	41,69	35,44	6,40	0,04	5,59	6,25
C40	C40-ARP30	41,69	46,85	7,29	0,02	4,96	5,16
C40	C40-ARP50	41,69	44,60	1,44	0,27	5,59	2,91

Fonte: a autora.

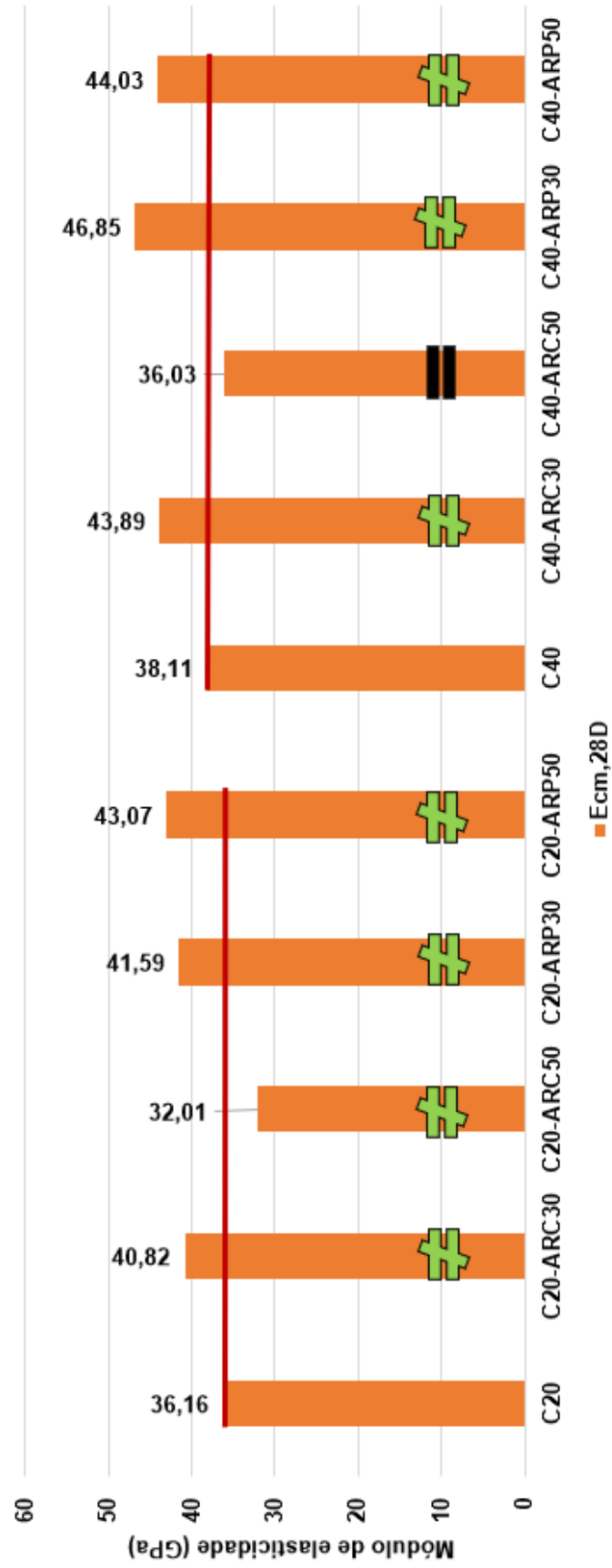
Tabela 39. Análise ANOVA do módulo médio de elasticidade dos concretos de 40MPa (resultados com CV).

Concretos		Média 1 (GPa)	Média 2 (GPa)	F	valor-P	F crítico	diferença de média
C40	C40-ARC30	38,11	43,89	9,79	0,0521	10,13	5,78
C40	C40-ARC50	38,11	36,03	2,60	0,2480	18,51	2,09
C40	C40-ARP30	38,11	46,85	23,18	0,0030	5,99	8,74
C40	C40-ARP50	38,11	44,03	85,82	0,0115	18,51	5,92

Fonte: a autora.

Para melhor entendimento da influência dos agregados reciclados no módulo de elasticidade, ilustra-se na Figura 38 todos os valores de módulo de elasticidade e também é traçada uma linha vermelha a partir do resultado de 28 dias dos concretos referência (C20 e C40), sinais de diferença são postos sobre os concretos que apresentaram diferença significativa perante a análise ANOVA e sinais de igualdade são posicionados sobre os concretos similares aos concretos referência.

Figura 38. Análise do módulo de elasticidade obtido dos concretos.



Fonte: a autora.

Por meio da análise ANOVA foi possível estabelecer que todos os concretos estudados, ambos com agregados reciclados (ARC e ARP) afetam o módulo de elasticidade, ou seja, ambos indicaram diferença significativa quando comparados ao concreto referência. Com exceção do concreto C40-ARC50 que segundo o ANOVA a média do módulo é similar a média do módulo referência.

Os agregados reciclados de concreto (ARC) normalmente reduzem o valor do módulo de elasticidade. SOARES et. al. (2014) mostram que à medida que aumenta a incorporação do ARC diminui o módulo de elasticidade, isto porque o módulo de elasticidade do concreto é influenciado pela porosidade de cada uma de suas partes.

Entretanto, neste estudo os concretos que levaram 30% de ARC (C20-ARC30 e C40-ARC30) tiveram uma tendência de aumento respectivo de 5,84% e 4,87% no módulo de elasticidade, ao passo que os concretos com 50% de ARC tiveram redução. Manzi et al. (2015) também observaram tendência de aumento no módulo de elasticidade de concretos autoadensáveis produzidos com ambos agregados miúdos e graúdos reciclados. Os autores acreditam que a melhoria observada foi por razão da melhor aderência entre a pasta de cimento e a argamassa aderida nas partículas dos agregados reciclados.

Quanto ao uso de agregados reciclados de porcelana (ARP), alguns autores verificaram que as características de alta rigidez e alta resistência mecânica das porcelanas beneficiam as propriedades mecânicas do concreto (MILHOMEM et al., 2017; CAMPOS e PAULON, 2015). Nos concretos estudados com resíduos de porcelana foi observado que os agregados reciclados de porcelana (ARP) conferiram tendência de aumento ao módulo de elasticidade dos concretos de 20MPa e 40MPa, com ambas proporções de substituição (30% e 50%), na faixa de 15,02% a 22,93%.

Acredita-se que a causa deste aumento se deva a superfície rugosa dos agregados de porcelana (superfície não esmaltada). De Argollo Ferrão et al. (2016) ao analisarem a zona de transição agregado-pasta com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), observaram que a rugosidade presente na porcelana sem esmalte permite que a pasta possa aderir com facilidade, e assim beneficiar o módulo de elasticidade.

7.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE CÁLCULO

7.2.1. Análise da resistência à tração estimada

Diferentes valores de resistência à tração foram obtidos através dos cálculos propostos pelas normas consultadas (NBR 6118:2014, fib Model Code 2010, Eurocode 2:2004 e ACI 318:2014), isto porque diferentes valores de coeficientes e desvio-padrão são adotados por cada norma. Em geral, os valores estimados de resistência à tração de todos os concretos calculados pelo Eurocode 2:2004 foram inferiores ao restante dos valores estimados por outras normas.

Para os concretos de 20Mpa, os valores de resistência à tração calculados pelo ACI 318:2014 resultaram em valores superiores, seguidos por valores calculados pelas normas NBR 6118:2014 e fib Model Code 2010. Para os concretos de 40Mpa, os valores de resistência à tração calculados pelo ACI 318:2014 se aproximaram dos valores calculados pela norma brasileira NBR 6118:2014, e em alguns concretos a norma brasileira estimou valores superiores aos valores calculados pela norma americana, sendo os concretos C40, C40-ARC30 e C40-ARP50.

Como as normas NBR 6118:2014 e fib Model Code 2010 consideram 0,90 de fator correção para calcular a resistência à tração indireta a partir da resistência à tração direta, seus valores de resistência à tração direta foram inferiores aos valores de resistência à tração indireta. O Eurocode 2:2004, por outro lado, considera um fator correção de 1,00, portanto os valores de resistência à tração direta foram iguais aos valores de resistência à tração indireta.

Semelhantemente aos valores de resistência à tração indireta obtidos por ensaios mecânicos foi calculado uma razão entre os valores calculados de resistência à tração indireta e a resistência característica à compressão. Portanto, a Tabela 40 apresenta as razões calculadas de ambos parâmetros.

Tabela 40. Razão dos valores calculados de resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) e à resistência à compressão dos concretos

Concretos	NBR 6118:2014	fib Model Code 2010	Eurocode 2:2004	ACI 318:2014
	$f_{ct,sp} / f_{ck}$	$f_{ct,sp} / f_{ck}$	$f_{ct,sp} / f_{ck}$	$f_{ct,sp} / f_{cm}$
C20	11%	11%	10%	12%
C20-ARC30	11%	12%	10%	13%
C20-ARC50	13%	14%	12%	18%
C20-ARP30	11%	11%	10%	12%
C20-ARP50	11%	11%	10%	12%
C40	10%	10%	9%	10%
C40-ARC30	10%	10%	9%	10%
C40-ARC50	10%	11%	10%	11%
C40-ARP30	10%	10%	9%	11%
C40-ARP50	9%	9%	8%	9%

Fonte: a autora.

7.2.2. Análise do módulo de elasticidade estimado

Os módulos estimados pelas normas consultadas resultaram em valores diferentes entre si, e isto porque cada norma recomenda uma equação específica de cálculo. Em geral, tanto para os concretos de 20MPa e de 40MPa, os módulos estimados pelo ACI 318:2014 foram menores do que os módulos estimados pelas outras normas.

Para os concretos de 20 MPa, os módulos estimados pelo *fib* Model Code 2010 foram superiores aos módulos estimados pelas demais normas, em seguida são os módulos calculados pela NBR 6118:2014 e pelo Eurocode 2:2004. Exceto para o concreto C20-ARC50 que a ordem decrescente de módulo estimado foi pelo *fib* Model Code 2010, Eurocode 2:2004, NBR 6118:2014 e ACI 318:2014.

Para os concretos de 40MPa, os módulos estimados pela NBR 6118:2014 foram semelhantes aos módulos estimados pelo *fib* Model Code 2010, embora os módulos de maior valor com maior ocorrência sejam os calculados pelo *fib* Model Code 2010.

Verifica-se que os concretos de 20MPa tiveram módulos inferiores aos dos concretos de 40MPa, comprovando-se que o valor do módulo de elasticidade depende da variação da resistência à compressão do concreto.

As normas estudadas neste trabalho não indicam um valor que representa a natureza do agregado reciclado de concreto (ARC) e de porcelana (ARP), portanto o

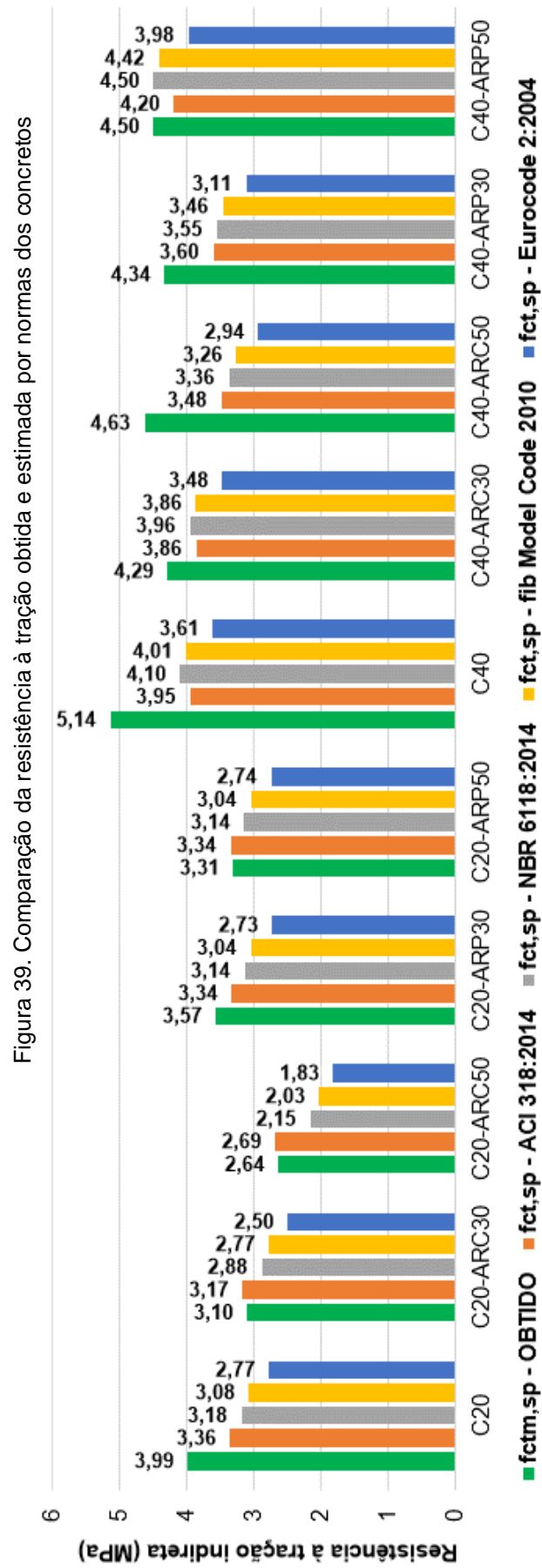
parâmetro em função da natureza do agregado graúdo ($\alpha_E=1,20$) utilizado foi igual para todos os cálculos, e mesmo assim o módulo de elasticidade estimado foi semelhante ao comportamento da resistência à compressão obtida. Pois com a incorporação de 30% de ARC, o módulo de elasticidade estimado reduziu, mas sem grande significância (assim como a resistência à compressão obtida). E de mesmo modo, ao incorporar 50% de ARC o módulo estimado reduziu mais ainda. Para os concretos com ARP (30% e 50%), os valores de módulo estimado também foram bem semelhantes aos módulos dos concretos convencionais, semelhantemente ao comportamento da resistência à compressão obtida.

7.3. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE RESULTADO OBTIDO E ESTIMADO

7.3.1. Relação da resistência à tração obtida e estimada

Os valores obtidos por ensaios mecânicos de resistência à tração indireta (ou por compressão diametral) foram comparados aos valores calculados pelas normas NBR 6118:2014, fib Model Code 2010, Eurocode 2:2004 e ACI 318:2014, e a Figura 39 ilustra tal comparação.

Para os concretos de 20MPa, os valores de resistência à tração indireta obtidos por ensaios mecânicos foram superiores aos valores estimados apenas no caso do concreto referência C20 e do concreto C20-ARP30. Para os concretos de 40MPa, os valores obtidos de resistência à tração indireta foram superiores aos estimados, tendo o concreto C40-ARP50 valor de resistência à tração obtido equiparado ao valor estimado pela norma brasileira.



Fonte: a autora.

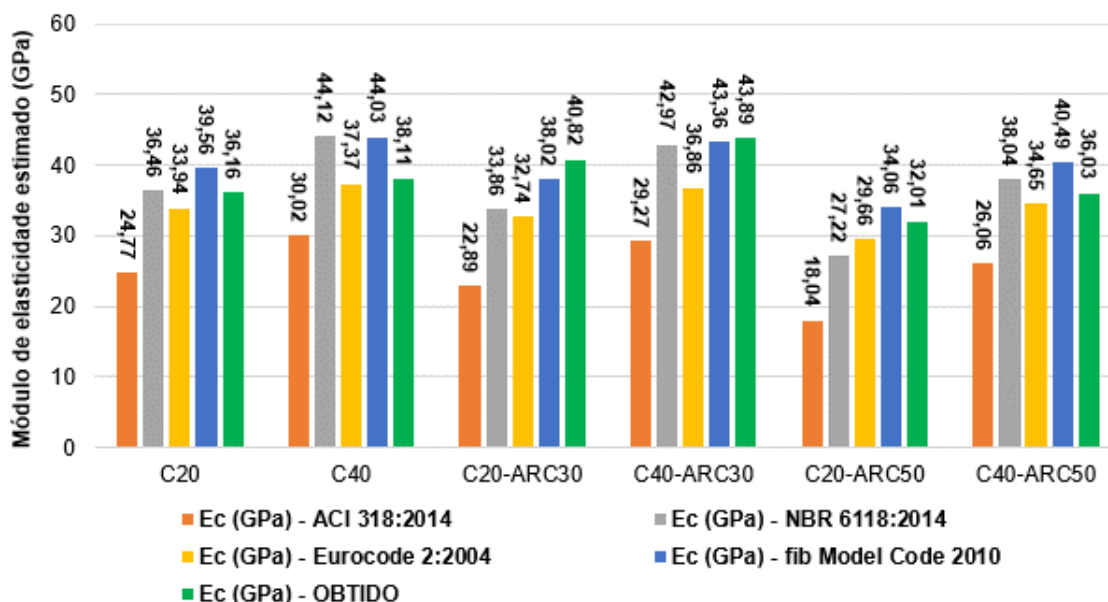
7.3.2. Relação do módulo de elasticidade obtido e estimado

A análise comparativa do módulo de elasticidade obtida e do módulo de elasticidade estimado pelas normas consultadas é ilustrada na Figura 40 e Figura 41, sendo o módulo obtida destacado na cor verde e os módulos estimados pelas respectivas normas nas cores laranja (ACI 318:2014), cinza (NBR 6118:2014), amarelo (Eurocode 2:2004) e azul (fib Model Code 2010).

Primeiro, analisando a diferença entre módulo obtida e estimado dos concretos convencionais, verificou-se que a diferença é mais preocupante no caso das normas *fib* Model Code 2010 e NBR 6118:2014, pois ambas não indicaram segurança de uso da estrutura. A segurança é obtida quando os módulos obtidos são iguais ou superiores aos módulos estimados pelas normas. No caso dos concretos convencionais desta pesquisa (C20 e C40), os módulos obtidos foram menores que os módulos estimados pelo *fib* Model Code 2010 (em 8,59% e 13,45%, respectivamente) e pela NBR 6118:2014 (em 0,82% e 13,62%, respectivamente).

Os módulos estimados pelo ACI 318:2014 e pelo Eurocode 2:2004, por outro lado, indicaram segurança no caso dos concretos convencionais, pois os módulos obtidos foram superiores aos módulos estimados. Os módulos obtidos dos concretos C20 e C40 foram 6,54% e 1,98% superiores aos módulos estimados pelo Eurocode 2:2004, e foram 45,98% e 26,95% superiores aos módulos estimados pelo ACI 318:2014.

Figura 40. Comparação do módulo obtida e estimado dos concretos convencionais e com agregados reciclados de concreto (ARC).

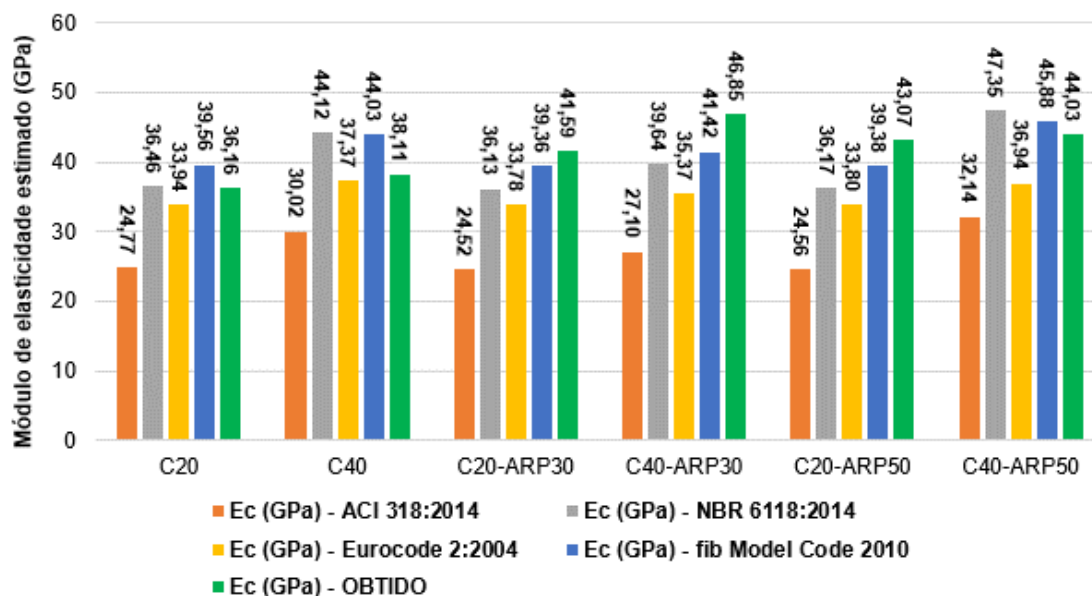


Fonte: a autora.

Para os concretos com 50% de ARC, os módulos obtidos foram menores que os módulos estimados pelo *fib* Model Code 2010. O módulo do concreto C20-ARC50 foi 6,02% menor do que o módulo estimado pelo *fib* Model Code 2010, e o módulo do concreto C40-ARC50 foi 11,01% menor do que o módulo estimado pelo *fib* Model Code 2010. O módulo obtido do concreto C40-ARC50 foi o único menor do que o módulo estimado pela NBR 6118:2014 (em 5,28%), enquanto o módulo obtido do concreto C20-ARC50 foi 17,60% maior do que o módulo estimado pela NBR 6118:2014.

Para os concretos com 30% de ARC, os módulos obtidos foram superiores aos módulos estimados. O módulo obtido do concreto C20-ARC30 foi 7,36% maior que o módulo *fib* Model Code 2010, 20,55% maior que o módulo NBR 6118:2014, 24,68% maior que o módulo Eurocode 2:2004 e 78,33% maior que o módulo ACI 318:2014. E o módulo obtido do concreto C40-ARC30 é maior que o *fib* Model Code 2010, NBR 6118:2014, Eurocode 2:2004 e ACI 318:2014 respectivamente em 1,22%, 2,14%, 19,07% e 49,95%.

Figura 41. Comparação do módulo obtido e estimado dos concretos convencionais e com agregados reciclados de porcelana (ARP).



Fonte: a autora.

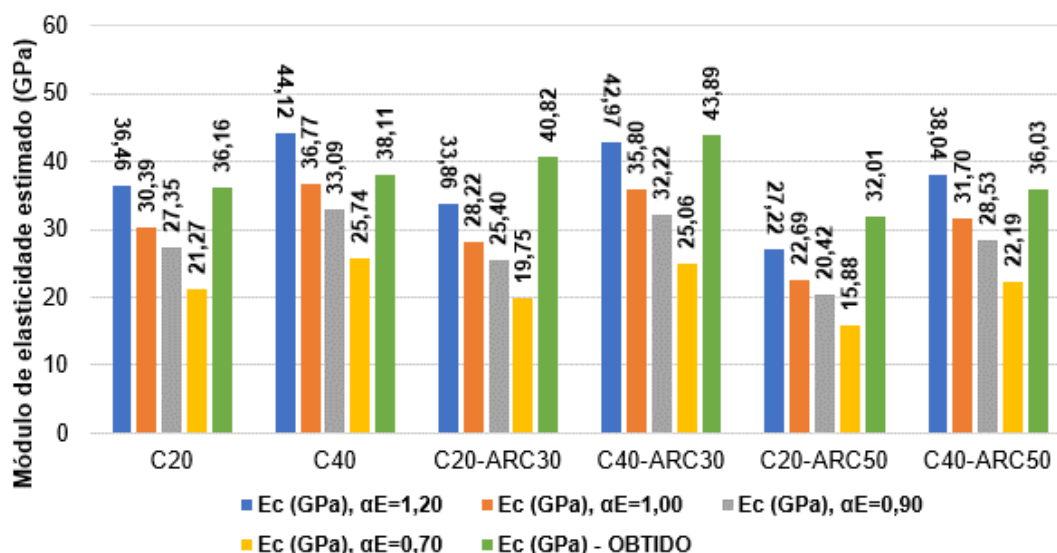
Os módulos obtidos dos concretos com 30% e 50% de ARP foram superiores aos módulos estimados por todas as normas. Exceto o concreto C40-ARP50 com módulo obtido menor que o *fib Model Code 2010* (em 4,03%) e a NBR 6118:2014 (em 7,01%).

Outra análise feita foi calcular o módulo de elasticidade considerando diferentes parâmetros em função da natureza do agregado (α_E) recomendados pela norma brasileira NBR 6118:2014. O parâmetro $\alpha_E = 1,20$ representa agregado de basalto ou diabásio, $\alpha_E = 1,00$ representa agregado de granito ou gnaiss, $\alpha_E = 0,90$ considera agregado de calcário e $\alpha_E = 0,70$ agregado de arenito. Para este trabalho inicialmente considerou nos cálculos $\alpha_E = 1,20$ em razão do uso de agregados graúdos basálticos.

Nos primeiros cálculos de módulo (considerando $\alpha_E = 1,20$) os concretos que resultaram em módulos obtidos menores que os estimados foram os concretos C20, C40, C40-ARC50 e C40-ARP50. Por isso, calculou-se novamente módulos considerando $\alpha_E = 1,00$ (granito ou gnaiss) a fim de verificar se os módulos obtidos desses concretos são mais próximos das equações considerando $\alpha_E = 1,20$ ou $\alpha_E = 1,00$.

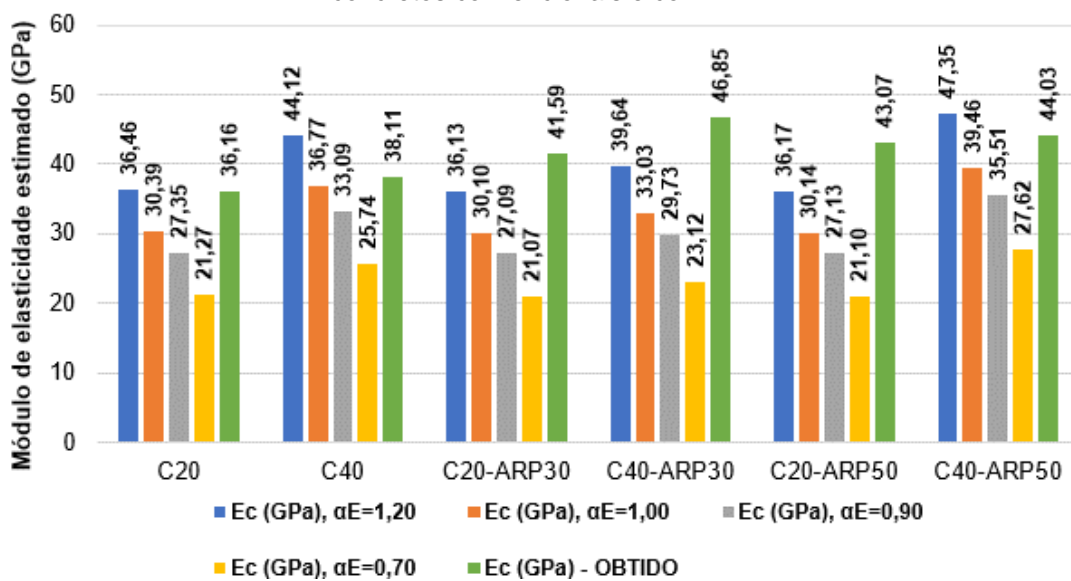
Mediante análise da Figura 42 e Figura 43, percebeu-se que os módulos experimentais (dos concretos C20, C40, C40-ARC50 e C40-ARP50) são na faixa de 1% a 8% mais próximos aos módulos calculados com $\alpha_E = 1,20$, ao contrário dos módulos calculados com $\alpha_E = 1,00$ que estão na faixa de 10% a 16%. A exceção, o módulo obtido do concreto C40 foi 4% mais próximo do módulo calculado com $\alpha_E = 1,00$, sendo distante em 16% do módulo calculado com $\alpha_E = 1,20$.

Figura 42. Comparação entre o módulo obtido e o módulo estimado com diferentes valores de α_E de concretos convencionais e com ARC.



Fonte: a autora.

Figura 43. Comparação entre o módulo obtido e o módulo estimado com diferentes valores de α_E de concretos convencionais e com ARP.



Fonte: a autora.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentro da literatura entende-se que o concreto convencional possui uma estrutura complexa. E conhecer todos os fatores que afetam as propriedades mecânicas do concreto é uma tarefa árdua. Com a inserção do agregado reciclado no concreto a estrutura se torna ainda mais complexa, pois a grande variabilidade desses agregados implica no comportamento da estrutura do concreto.

A maioria das pesquisas sobre o uso de agregados reciclados preocupam-se com a influência desses agregados sobre a resistência à compressão. Mas, para garantir um concreto estrutural de boa qualidade, é importante investigar outras propriedades como o módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade, associado ao controle de deformações estruturais, pode ser obtido por meio de ensaios mecânicos ou calculados por equações propostas por normativas. Isto posto, neste trabalho foi investigado a influência dos agregados reciclados de concreto (ARC) e porcelana (ARP) nas propriedades mecânicas (mas principalmente no módulo de elasticidade) dos concretos de classe de resistência de 20MPa e 40MPa, verificar se há similaridades entre os módulos estimados pelas normas consultadas, comparar os módulos estimados e os módulos obtidos por ensaios mecânicos e avaliar a resistência à compressão de concretos moldados em corpos de prova cilíndricos e cúbicos.

Para auxiliar na validação dos resultados foi utilizado a ferramenta ANOVA para compreender as diferenças significativas entre as médias dos resultados obtidos. No ensaio de resistência à compressão, viu-se que os agregados reciclados de concreto (ARC) afetaram a resistência à compressão dos concretos de 20MPa, mas não afetaram a resistência dos concretos de 40MPa. Ambos concretos com ARC obtiveram resistências menores do que a resistência do concreto referência de 20MPa.

Os agregados reciclados de porcelana (ARP), por outro lado, não afetaram a resistência à compressão dos concretos de 20MPa e de 40MPa. Acredita-se que isso se deva as similaridades físicas e químicas que os resíduos de porcelana possuam com os agregados naturais, citado por Campos e Paulo (2015).

No estudo do módulo obtido por ensaios mecânicos verificou-se que os ARC's e os ARP's afetaram significativamente o módulo de elasticidade de ambos concretos de 20MPa e 40MPa. Neste caso, os módulos dos concretos com 30% de ARC foram superiores aos módulos dos concretos referência, e isso pode ser justificado pela melhor aderência entre a pasta de cimento e a argamassa aderida nas partículas dos agregados reciclados.

Os módulos dos concretos com porcelana foram maiores do que os módulos dos concretos de referência. Acredita-se que a causa deste aumento seja devido a superfície rugosa da porcelana não esmaltada que permite a pasta aderir com facilidade e assim beneficiar o módulo de elasticidade.

Os módulos de elasticidade calculados pelas normas consultadas (NBR 6118:2014, fib Model Code 2010, Eurocode 2:2004 e ACI 318:2014) resultaram em valores distintos entre si, em razão de cada normativa recomendar valores distintos de coeficientes e de desvio-padrão para determinar a resistência à compressão característica. De modo geral, a ordem decrescente de valores de módulo estimado são os calculados pelo fib Model Code 2010, pela NBR 6118:2014, pelo Eurocode 2:2004 e pelo ACI 318:2014.

Como o cálculo do módulo de elasticidade considera a resistência à compressão do concreto como parâmetro principal da equação, percebeu-se que os concretos de 20MPa resultaram em módulos inferiores aos dos concretos de 40MPa. E o comportamento do módulo estimado dos concretos com agregados reciclados (ARC e ARP) foi semelhante ao comportamento dos mesmos frente a resistência à compressão obtida por ensaios mecânicos.

O módulo de elasticidade estimado por normas e aqueles obtidos por ensaios mecânicos geralmente são diferentes entre si devido aos diversos fatores intervenientes que influenciam o valor final do módulo. De modo geral, os módulos obtidos desse trabalho variam dos calculados de 1% a 13% pelo fib Model Code 2010, de 1% a 21% pela NBR 6118:2014, de 2% a 32% pelo Eurocode 2:2004 e de 27% a 78% pelo ACI 318:2014.

Espera-se que módulos obtidos sejam iguais ou superiores aos módulos estimados por normativas. No caso dos concretos convencionais (C20 e C40), os módulos obtidos foram inferiores aos módulos estimados pelas normas fib Model

Code 2010 e NBR 6118:2014, indicando falta de segurança de uso por parte dessas normas. De modo contrário, os módulos obtidos dos concretos convencionais foram superiores aos módulos estimados pelas normas ACI 318:2014 e Eurocode 2:2004.

Para os concretos com agregados reciclados, os módulos obtidos foram superiores aos módulos estimados por todas as normas. Exceto os módulos dos concretos com 50% de ARC, pois os módulos obtidos foram menores que os módulos estimados pelo fib Model Code 2010.

No cálculo do módulo de elasticidade com diferentes valores de α_E verificou-se que para os concretos com módulos obtidos menores que os módulos estimados com $\alpha_E = 1,20$ (basalto), quando estimados com $\alpha_E = 1,00$ (arenito) ficaram acima dos mesmos, conforme era esperado.

Uma análise ANOVA também foi realizada para verificar se a mudança de geometria dos corpos de prova afeta a resistência à compressão dos concretos estudados. A mudança de geometria afetou substancialmente a resistência à compressão dos concretos de 20MPa, mas não afetou a resistência dos concretos de 40MPa. Os resultados encontrados nesta pesquisa apontam que o efeito da geometria do corpo de prova é mais significativo em concretos de baixa classe de resistência.

Nos concretos de 20MPa, a resistência à compressão dos concretos moldados em corpos de prova cúbicos foi superior a resistência à compressão dos concretos moldados em corpos de prova cilíndricos. Uma possível causa seria o efeito da contenção dos pratos da prensa que se estende por toda altura dos cubos, mas nos cilindros acaba não atingindo parte da altura.

9. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Infelizmente não é possível abranger todas as áreas de interesse e relacionadas aos assuntos tratados nesta dissertação. Deste modo, alguns tópicos são sugeridos para dar continuidade deste trabalho:

- Estudar o módulo de elasticidade de concretos de resistências à compressão superiores a 80 MPa;
- Estudar o módulo de elasticidade de concretos de ultra alto desempenho, com resistências à compressão acima de 130 MPa;
- Estudar as propriedades mecânicas de concretos produzidos com outros tipos de agregado natural: calcário, gnaisse, dolomita, dentre outros;
- Estudar as propriedades mecânicas de concretos produzidos com outros tipos de materiais alternativos;
- Estudar o módulo de elasticidade estimado por outras normas internacionais;
- Estudar a influência da zona de transição no módulo de elasticidade através do MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura);
- Estudar a relação do módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS). **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, 2017.

ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE). **ACI 301-2010: Specifications for Structural Concrete**, Farmington Hills, MI, 2010, 81p.

ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE). **ACI 318-2014: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)**, Farmington Hills, MI, 2014, 519 p.

AITCIN, P.C., METHA, P.K. **Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical proprieties of high-strength concrete**, ACI Materials Journal, v. 87, n. 2, pp. 103-107, March-April, 1990.

ALMEIDA, S.M. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e defrqüência ressonante**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2012. 213p.

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 236f. Tese (Doutorado em engenharia de construção civil e urbana). Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

ÂNGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. de. **Concreto com agregados reciclados**. In: Concreto: ciência e tecnologia, 2011.

ARAUJO, S.S.; GUIMARÃES, G.N.; GEYER, A.L.B. **Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v.5, n.5, p.555-575, 2012.

ARAÚJO, D. L.; FELIX, L. P.; SILVA, L. C.; SANTOS, T. M.. **Influência de agregados reciclados de resíduos de construção nas propriedades mecânicas do concreto**. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v.11, n.1, p.16-34, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597-09: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.** W. Conshohocken, PA: ASTM International, 2009.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2000. 11p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001. 10p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006. 18p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.** Rio de Janeiro, 2003. 13p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR NM 52: Agregado Miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009. 14p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009. 14p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998. 8p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003. 13p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018. 13p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014. 256p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2009. 15p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011. 9p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.** Rio de Janeiro, 2017. 26p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro, 2019. 15p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, 2015. 7p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015. 29p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2004. 18p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 15900: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2009. 15p.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018. 16p.

ARANHA, N.; OLIVEIRA JR, J. M. de; BELLIO, L. O.; BONVENTI JR, W. **A lei de Hooke e as molas não-lineares, um estudo de caso.** Revista Brasileira de Ensino de Física, 2016.

ARAUJO, S. S.; GUIMARÃES, G. N.; GEYER, A. L. B. **Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto.** Revista IBRACON de estruturas e materiais, v.5, n.5, p.555-575, 2012.

BEHNOOD, A.; OLEK, J. ; GLINICKI, M. A. **Predicting Modulus Elasticity of Recycled Aggregate Concrete Using M5' Model Tree Algorithm.** Construction and Building Materials. v. 94, 2015, p.137-147.

BENETTI, J. **Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico de Concreto Produzido com Agregado Graúdo Reciclado de Concreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2012, 83p.

BEUSHAUSEN, H. e DITTMER, T. **The Influence of Aggregate Type on the Strength and Elastic Modulus of High Strength Concrete.** Construction and Building Materials, v.74, p.132-139, 2015.

BILESKY, P.; HELENE, P.; NETO, C. S.; CASTRO, A. L. de. **Influência da natureza petrográficas do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto.** 60º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon, 2018.

BORGES, A. P. S. N.; MOTTA, L. A. de C.; PINTO, E. B. **Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais.** Revista Materia, v.24, n.02, 2019.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução nº 307**, 5 de julho de 2002.

BRITO, J., SOARES, D.; FERREIRA, J.; PACHECO, J. **In Situ materials characterization of full-scale recycled aggregates concrete structures.** Construction and Building Materials, v.71, p.237-245, 2014.

BRITO, J.; ROBLES, R. **Recycled aggregate concrete methodology for estimate its long term properties.** Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, v.17, n.6, p.449-462, 2010.

CAMPOS, R. S. **Concreto autoadensável produzido com resíduos de construção e demolição: propriedades mecânicas e reológicas.** 2017. 228f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana), Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

CAMPOS, R. S.; BARBOSA, M. P.; PIMENTEL, L. P., MACIEL, G. F. **Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável.** Revisa Materia, v.23, n.1, 2018.

CAMPOS, M. A.; PAULON, V. A. **Utilização de agregados alternativos de isoladores elétricos de porcelana em concretos.** Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo, v.7, n.1, p.30-43, 2015.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION). **Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1).** 2004. 227p.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION). **IS EN 12390-3: Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens.** 2009. 9p.

CORINALDESI, V. **Mechanical and Elastic Behaviour of Concretes made of Recycled-Concrete Coarse Aggregates.** Construction and Building Materials, v.24, n.9, 2010, p.1616-1620.

CTR – CENTRAL DE TRIAGEM E RECICLAGEM. **Recebemos – Pré-moldados.** <http://ctrsp.com.br/materiais_recebidos/pre-moldado> Acesso em: 29 maio 2018.

DA SILVA, F. M.; BARBOSA, L. A. G.; LINTZ, R. C. C.; JACINTHO, A. E. P. G. A. **Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber.** Construction and Building Materials, v.91, pp.71-79, 2015.

DA SILVA, F. M.; VAZ, V. V.; BARBOSA, L. A. G.; LINTZ, R. C. C. **Avaliação da resistência mecânica de pisos intertravados de concreto sustentáveis (PICS)**. Revista Materia, v.22, n.1, 2017.

DE ARGOLLO FERRÃO, A.M.; CAMPOS, M.A.; PAULON, V.A. **Argamassa com agregados de isoladores elétricos de porcelana: Influência da camada de esmalte nas propriedades mecânicas e de durabilidade**. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Águas de Lindóia, São Paulo, 2016.

DENG, F. et al. **Compressive Strength Prediction of Recycled Concrete Based on Deep Learning**. Construction and Building Materials, v.175, 2018, p.562-569.

DEUTSCH, N.M. **Diferenças entre isoladores de porcelana e poliméricos**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016, 53p.

DEVORE, J. L. **Multifactor Analysis of Variance**. In: DEVORE, J. L. **Probability & Statistic: for engineering and the Science** c. 8. ed. São Luis (Califórnia): Brooks/cole, 2012. p. 419-465.

DHIR, R.K.; LIMBACHIYA, M.C.; LEELAWAT, T. **Suitability of Recycled Aggregate for Use in BS 5328 Designated Mixes**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and Buildings, v. 134, n. 3, 1999, p.257-274.

DILLMAN, R. **Concrete with Recycled Concrete Aggregate**. Proceedings of International Symposium on Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate, Dundee, UK, 1998, p. 239-253.

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

FERNANDES JÚNIOR, A. et al. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: PMGI-RSU**. Campinas, 2012, 80p. Disponível em <http://www.campinas.sp.gov.br/arquivos/diagnostico_pgi_rsu_campinas.pdf>. Acesso em: 25 de maio de 2018.

FERREIRA, L.; RIBAS, L.; DE SOUZA, V.C.; BRAGANÇA, S.R. **Avaliação da reutilização de isoladores elétricos de porcelana em cerâmicas triaxiais**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, Paraná, 2018.

fib (THE INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE). **FIB Model Code for Concrete Structures 2010**.

FIEDERER, L. **Clássicos da Arquitetura: Panteão Romano / Imperador Adriano**. 2017. Disponível em <<https://www.archdaily.com.br/br/802972/classicos-da-arquitetura-panteao-romano-imperador-adriano>>. Acesso em: 19 de janeiro de 2020.

FONSECA, N.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. **The Influence of Curing Conditions on the Mechanical Performance of Concrete made with Recycled Concrete Waste**, Cement and Concrete Composites. v. 33, n. 6, 2011, p.637-643.

GUJEL, D.A. **Avaliação do comportamento elástico de concretos produzidos com substituição parcial dos agregados graúdos naturais por reciclados de concreto a partir de ensaios estático e dinâmico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014, 127p.

GYURKÓ, Z.; NEMES, E. **Specimen size and shape effect on the compressive strength of normal strength concrete**. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 64 (1), pp. 276-286, 2020.

HAMASSAKI, L. T.; SANTOS, R. F. C. **Corpos de prova: Soluções Inovadoras**. **Revista notícias da construção**. SINDUSCON. Novembro, 2013.

HASSAN, A.; JONES, S. **Non-destructive testing of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): A feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques**. Construction and Building Materials, v.35, p.361-367, 2012.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. In: Geraldo C. Isaia. (Org). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia**

dos Materiais. 3ª Edição. Revisada e Atualizada. São Paulo: Ibracon, 2010, p.905-944.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3ª ed. Revisada e Atualizada. São Paulo: Ibracon, 2017, v.II, p. 970-1005.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Editora Pini, 1992.

ISAIA, G. C. (Ed.): **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, vol. 1; p. 1-600, 2005a.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3ª Edição. s.l.: IBRACON, 2017. 2 volumes. ISBN/ISSN 978-85-98576-27-5.

JACINTHO, A. E. P. G. A. **Módulo de elasticidade de concretos com agregados reciclados**. Revista Matéria, v.24, n.02, p.1-3, ISSN 1517-7076 Editorial, e-12385, 2019.

JUNIOR, A. S. M.; RIBEIRO, K. A.; MERIJ, A. C.; FURTADO, D. H.; SANTOS, T. C.; BARROS, T. S.; SILVA, S. D. **Estudo da influência da adição de vidro automotivo nas propriedades mecânicas do concreto**. INOVAE. Journal of Engineering, Architecture and Technology Innovation, v.7, n.1, 2019.

KAISH, A. B. M. A.; JAMIL, M.; RAMAN, S. N.; ZAIN, M. F. M. **Axial behavior of ferrocement confined cylindrical concrete specimens with different sizes**. Construction and Building Materials. Vol. 78, pp.50-59, 2015.

KANELLOPOULOS, A.; PETROU, M.F.; IOANNOU, I. **Durability performance of selfcompacting concrete**. University of Cyprus, Department of Civil and Environmental Engineering, 1678, PO Box 20537, Nicosia, Cyprus. December, 2012.

KAKIZAKI et al. **Strength and Elastic Modulus of Recycled Aggregate Concrete**. Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Tokyo, Japan, 1988, p.565-574.

KIMURA, Alio. BUENO, Suely. **ABNT NBR 6118:2014 Comentários e Exemplos de aplicação.** s.l. s.n. 2015. 480 p. ISBN/ISSN 978-85-98576-24-4.

LEITE, H. R.; GIRARDI, R.; HASTENPFLUG, D. **Durabilidade do Concreto: Análise dos Requisitos dos Materiais Constituintes.** Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana, n.8, p. 14-25, 2018.

LEMONS, A. M.; FRENDEBERG, F. C. **Estudo da utilização de fibra de coco em vidas de concreto.** Engineering Sciences, v.7, n.2, 2019.

LOPES, Taís Biazão. **Comparação da microestrutura do concreto auto adensável com o concreto convencional.** 2016. 1 recurso online (76 p.). Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP.

LOVATO et al. **Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes,** Construction and Building Materials, v.26, n.1, p.437-447, 2012.

MALÁRICS, V.; MÜLLER, H. S.: **Evaluation of the splitting tension test for concrete from a fracture mechanical point of view,** in: Proceedings of the 7th international conference on fracture mechanics of concrete and concrete structures, Oh, B. H. et al. (Hrsg.), Hanrimwon Co. Ltd., Seoul, Korea, CD:05-06, 2010, S. 709-716.

MANZI, S., MAZZOTTI, C., BIGNOZZI, M.C., et al., **Preliminary Studies on the Effect of C&DW on the Long-Term Properties of Sustainable Self-Compacting Concrete.** In: CONCREEP 10, pp. 1554-1560, 2015.

MEHTA, P. Kumar. MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 2^a Edição. s.l.: Nicole Pagan Hasparyk, 2014. 782 p. ISBN/ISSN 978-85-98576-21-3.

MELLMANN, G. **Processed Concrete Rubble for the Reuse as Aggregate.** Proceedings of the International Seminar on Exploiting Waste in Concrete, Dundee, UK, 1999, p.171-178.

MILHOMEM, P. A.; SILVA, J. M.; COSTA, P. S. **Avaliação das propriedades mecânicas do concreto produzido com resíduo de isoladores elétricos de**

porcelana. REEC - Revista Eletrônica da Engenharia Civil, v.14, n.1, p.238-247, 2018.

MOREIRA, L. H. H. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. 2010. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MUCIACCIA, G.; ROSATI, G.; DI LUZIO, G. **Compressive failure and size effect in plain concrete cylindrical specimens**. Construction and Building Materials. Vol. 137, pp. 185-194. 2017.

NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S. **The ultrasonic pulse velocity method**. CRC handbook on nondestructive testing of concrete. CRC Press, p. 169- 189, 2004.

NADERPOUR, H.; RAFIEAN, A.H.; FAKHARIAN, P. **Compressive Strength Prediction of Environmentally Friendly Concrete Using Artificial Neural Networks**. Journal of Building Engineering, v.16, 2018, p.213-219.

NETO, L.A.C.V.; SALES, A.T.C.; SALES, L.C. **Efeitos da variabilidade de agregados de RCD sobre o desempenho mecânico do concreto de cimento Portland**. Revista Matéria, v.23, n.1, 2018.

NETO, B. B. P.; OLIVEIRA, D. R. C.; RAMOS, D. **Efeito do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência**. Revista Matéria, v.16, n.2, p.690-702, 2011.

NEVILLE, Adam N. **Propriedades do Concreto**. 5ª Edição. s.l.: Editora Bookman, 2015. 912 p. ISBN-13 978-8582603659.

PACHECO et al. **Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto**. Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto. Natal, Rio Grande do Norte, 2014.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A.P. **Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). Concreto: Ciência e Tecnologia. 1ªed. São Paulo: IBRACON, 2011: IBRACON, 2011, Cap. 16 p. 585-614.

PEREZ-BENEDICTO, J.A. et al. **Características mecánicas de hermiones com áridos reciclados procedentes de lós rechazos em prefabricación.** Materiales de Construcción, v.62, p.25-37, 2012.

PETRUCCI, E.G.R.: **Concreto de cimento Portland.** 14^o. ed. São Paulo: Globo, 2005. 307 p.

RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: Efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

RAMADEVI, K.; CHITRA, R. **Concrete using recycled aggregates.** International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), v.8, p.413-419, 2017.

RAVINDRARAJAH, R.S.; TAM, C.T. **Properties of Concrete made Crushed Concrete as Coarse Aggregate.** Magazine of Concrete Research, v. 31, n. 130, 1985, p.29-38.

RIBEIRO JÚNIOR, E.: **Propriedades dos materiais constituintes do concreto.** Revista especialize on-line. MBA Gerenciamento de obra, tecnologia & qualidade da construção, Instituto de Pós-Graduação – IPOG. Goiânia, 2015. 15p.

RILEM (INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES). **NDT 1 Testing of concrete by the ultrasonic pulse method,** 1972, 10p.

RILEM (INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES). **121-DRG: Guidance for demolition and re-use of concrete and masonry.** 1972.

RIZZO, G. F. **Durabilidade de concretos com agregados reciclados.** 2018. 156f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana), Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2018.

RUIZ, A. N. **Concreto com fresado asfáltico aplicado em dispositivos de proteção e drenagem de obras viárias.** 2017. 191f. Dissertação de Mestrado

(Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana), Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

SAMPAIO, Z. L. M.; SOUZA, P. A. B. F.; GOUVEIA, B. G. **Análise da influência das cinzas do bagaço de cana de açúcar no comportamento mecânico de concretos**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v.7, n.4, p. 626-647, 2014.

SANTOS, A. C. dos; ARRUDA, A.M. de; SILVA, T.J. da; VITOR, P. de C.P. **Estudo comparativo entre valores teóricos e resultados experimentais de modulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes tipos de agregado graúdo**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.17, n.3, p. 249-262, 2017.

SEFFF, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L. **Comportamento reológico de pasta de cimento com adição de sílica ativa, nanossílica e dispersante policarboxílico**. Revista Matéria, v. 15, n.1, p. 12-20, 2010.

SHI, C.; LI, Y.; ZHANG, J.; LI, W.; CHONG, L.; XIE, Z. **Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review**. Journal of Cleaner Production, v.112, n.1, p.466-472, 2016.

SHIROMA, L. **Atividade pozolânica de resíduos de isoladores de porcelana em matrizes cimentícias**. 2016. 139f. Tese (Doutorado em engenharia agrícola). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2016.

SILVA, J. A. **Reciclagem de resíduos produzidos pela indústria de pré-moldados em concreto na região de Chapecó-SC**. Revista online IPOG Especialize, Goiânia, v.1, n.9, 2014.

SILVA, R.V. et al. **Design of reinforced recycled aggregate concrete elements in conformity with Eurocode 2**. Construction and Building Materials, v.105, p.144-156, 2015.

SINAIE, S; HEIDARPOUR, A.; ZHAO, X. L.; SANJAYAN, J. G. **Effect of size on the response of cylindrical concrete samples under cyclic loading**. Construction and Building Materials. Vol. 84, pp.399-408, 2015.

SOARES, D. et al. **Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance.** Construction and Building Materials, v.71, p.237-245, 2014.

SOUZA, F.J.P.; NEVES, W.F.; ALARCON, O.E. **Estudo da viabilidade de obtenção de isoladores elétricos a partir de resíduo de esmaltação.** v.50, n.315, 2004.

STASIAK-BETLEJEWSKA, R.; POTKÁNY, M. **Construction costs analysis and its importance to the economy.** In: Procedia Economics and Finance, London, v.34, p.35-42, 2015.

TIBBETS et al. **Aggregate Correction Factors for Concrete Elastic Modulus Prediction.** ACI Structural Journal, s.l., Title No. 115-S71. p. 931-941, 2018

JUROWSKI, K.; GRZESZCZYK, S. **Influence of Selected Factors on the Relationship between the Dynamic Elastic Modulus and Compressive Strength of Concrete.** Materials MDPI, 11, 477, doi 103390/ma11040477, 2018.

VASCONCELOS, A.; GIAMMUSSO, S. **O Misterioso Módulo de elasticidade.** Biblioteca Digital TQS. 21p. 2009.

XIAO, J.Z.; LI, J.B.; ZHANG, C. **On Relationships between the Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete: An overview.** Materials and Structures, v.39, n.6, 2007, p.655-664.

ZHOU, F.P., BARR, B.I.G., LYDON, F. D., **Fracture proprieties of high strength concrete with varying silica fume content and aggregates,** Cement and Concrete Research, v. 25, n. 3, pp. 543 – 552, 1995.

ZILCH, K.; ROSS, F. **An Equation to Estimate the Modulus of Elasticity of concrete with Recycled Aggregates.** Civil Engineering (New York, N.Y.), v. 76, n.4, 2001, p.187-191.

WU et al. **Effect of Coarse Aggregate Type on Mechanical Properties of High-Performance Concrete.** Cement and Concrete Research. v. 31. n. 10. P.1421-1425, 2001.

ANEXO A

Neste anexo A são relacionados os valores individuais de resistência à compressão cilíndrica dos concretos estudados para idade de 7 e 28 dias, sendo que alguns destes valores foram considerados discrepantes por não respeitar o coeficiente de variação igual a 6%, conforme sugerido pela NBR 5739:2018 (ABNT, 2018). Em seguida são relacionadas tabelas que sintetizam os valores individuais de cada concreto, os valores discrepantes retirados são destacados na cor vermelha, e os valores médios de resistência e coeficiente de variação são realçados em amarelo.

Tabela 41. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C20

Traço	CPs	7 dias			28 dias*		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(N)	(MPa)	(MPa)	(N)	(MPa)	(MPa)
C20	1	241,23	30,71	30,71	29325,36	36,62	36,62
	2	180,13	22,93	-	28410,55	35,47	35,47
	3	217,64	27,71	27,71	22483,63	28,07	-
	4	246,82	31,43	31,43	26542,29	33,14	-
	5	224,45	28,58	28,58	27019,02	33,74	-
	6	-	-	-	26155,75	32,66	-
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		Média	28,27	29,61	Média	33,28	36,05
		DP	3,35	1,75	DP	2,96	0,81
		CV (%)	11,84	5,91	CV (%)	8,88	2,24
		Mínimo	22,93	27,71	Mínimo	28,07	35,47
		Máximo	31,43	31,43	Máximo	36,62	36,62
		Média - Mín=	5,34	1,90	Média - Mín=	5,21	0,57
		M - MÁX=	-3,15	-1,82	M - MÁX=	-3,33	-0,57

*Feito aos 25 dias. Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 42. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C40.

TRAÇO	CPs	7 DIAS			28 DIAS		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(N)	(MPa)	(MPa)	(N)	(MPa)	(MPa)
C40	1	363647,81	46,30	46,30	399785,16	50,90	50,90
	2	323846,19	41,23	41,23	327005,06	41,64	-
	3	359983,53	45,83	45,83	380958,34	48,51	48,51
	4	354803,00	45,17	45,17	324098,91	41,27	-
	5	339135,06	43,18	43,18	191679,55	24,41	-
	6	404207,56	51,47	-	318412,97	40,54	-
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	45,53	44,34	MÉDIA	41,21	49,71
		DP	3,46	2,11	DP	9,27	1,69
		CV (%)	7,61	4,75	CV (%)	22,50	3,40
		MÍNIMO	41,23	41,23	MÍNIMO	24,41	48,51
		MÁXIMO	51,47	46,30	MÁXIMO	50,90	50,90
		MÉDIA - MÍN=	4,30	3,11	MÉDIA - MÍN=	16,80	1,20
		MÉDIA - MÁX=	-5,93	-1,96	MÉDIA - MÁX=	-9,69	-1,20

Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 43. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C20-ARC30.

TRAÇO	CPs	7 DIAS			28 DIAS		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(kN)	(MPa)	(MPa)	(N)	(MPa)	(MPa)
C20-ARC30	1	147708,23	18,81	-	238936,08	30,42	30,42
	2	147834,59	18,82	-	261553,50	33,30	33,30
	3	172726,39	21,99	21,99	260163,59	33,13	33,13
	4	169693,89	21,61	21,61	209874,58	26,72	-
	5	199639,88	25,42	-	244369,31	31,11	31,11
	6	166029,61	21,14	21,14	209369,16	26,66	-
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	21,30	21,58	MÉDIA	30,22	31,99
		DP	2,45	0,43	DP	2,96	1,44
		CV (%)	11,49	1,98	CV (%)	9,78	4,51
		MÍNIMO	18,81	21,14	MÍNIMO	26,66	30,42
		MÁXIMO	25,42	21,99	MÁXIMO	33,30	33,30
		MÉDIA - MÍN=	2,49	0,44	MÉDIA - MÍN=	3,57	1,57
		MÉDIA - MÁX=	-4,12	-0,41	MÉDIA - MÁX=	-3,08	-1,31

Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 44. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C20-ARC50.

TRAÇO	CPs	7 DIAS			28 DIAS		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(N)	(MPa)	(MPa)	(N)	(MPa)	(MPa)
C20- ARC50	1	143033,13	18,21	18,21	184098,28	23,44	23,44
	2	139242,48	17,73	17,73	156805,75	19,97	-
	3	149729,91	19,06	19,06	134693,73	17,15	-
	4	151498,86	19,29	19,29	184856,41	23,54	23,54
	5	168430,34	21,45	-	170199,31	21,67	21,67
	6	142527,70	18,15	18,15	183845,58	23,41	23,41
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	18,98	18,49	MÉDIA	21,53	23,01
		DP	1,34	0,66	DP	2,56	0,90
		CV (%)	7,08	3,57	CV (%)	11,91	3,90
		MÍNIMO	17,73	17,73	MÍNIMO	17,15	21,67
		MÁXIMO	21,45	19,29	MÁXIMO	23,54	23,54
		MÉDIA - MÍN=	1,25	0,76	MÉDIA - MÍN=	4,38	1,34
		MÉDIA - MÁX=	-2,46	-0,80	MÉDIA - MÁX=	-2,01	-0,52

Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 45. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C20-ARP30.

TRAÇO	CPs	7 DIAS			28 DIAS		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(N)	(MPa)	(MPa)	(N)	(MPa)	(MPa)
C20- ARP30	1	241336,80	30,73	30,73	239820,55	30,53	-
	2	241084,09	30,70	30,70	332185,59	42,30	-
	3	268250,28	34,15	-	278737,69	35,49	35,49
	4	240831,39	30,66	30,66	277095,09	35,28	35,28
	5	225668,86	28,73	28,73	280506,66	35,72	35,72
	6	253340,47	32,26	-	241084,09	30,70	-
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	31,21	30,21	MÉDIA	35,00	35,50
		DP	1,83	0,98	DP	4,30	0,22
		CV (%)	5,86	3,25	CV (%)	12,29	0,61
		MÍNIMO	28,73	28,73	MÍNIMO	30,53	35,28
		MÁXIMO	34,15	30,73	MÁXIMO	42,30	35,72
		MÉDIA - MÍN=	2,47	1,47	MÉDIA - MÍN=	4,47	0,21
		MÉDIA - MÁX=	-2,95	-0,52	MÉDIA - MÁX=	-7,29	-0,22

Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 46. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C20-ARP50.

TRAÇO	CPs	7 DIAS			28 DIAS		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(N)	(MPa)	(MPa)	(N)	(MPa)	(MPa)
C20-ARP50	1	237419,81	30,23	30,23	282781,03	36,00	36,00
	2	239820,55	30,53	30,53	298069,91	37,95	37,95
	3	228575,02	29,10	29,10	277474,16	35,33	35,33
	4	195470,17	24,89	-	259279,13	33,01	33,01
	5	247022,75	31,45	31,45	203809,56	25,95	-
	6	232997,42	29,67	29,67	234260,95	29,83	-
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	29,31	30,20	MÉDIA	33,01	35,57
		DP	2,31	0,89	DP	4,44	2,04
		CV (%)	7,88	2,95	CV (%)	13,46	5,73
		MÍNIMO	24,89	29,10	MÍNIMO	25,95	33,01
		MÁXIMO	31,45	31,45	MÁXIMO	37,95	37,95
		MÉDIA - MÍN=	4,42	1,09	MÉDIA - MÍN=	7,06	2,56
		MÉDIA - MÁX=	-2,14	-1,25	MÉDIA - MÁX=	-4,94	-2,38

Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 47. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C40-ARC30.

TRAÇO	CPs	7 DIAS			28 DIAS		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(N)	(MPa)	(MPa)	(N)	(MPa)	(MPa)
C40-ARC30	1	246896,39	31,44	-	320813,69	40,85	-
	2	275326,13	35,06	35,06	354929,38	45,19	45,19
	3	293394,78	37,36	37,36	360615,31	45,91	45,91
	4	228954,08	29,15	-	372366,25	47,41	47,41
	5	266228,63	33,90	-	367438,44	46,78	46,78
	6	304261,28	38,74	38,74	409135,38	52,09	52,09
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	34,27	37,05	MÉDIA	46,37	47,48
		DP	3,59	1,86	DP	3,64	2,71
		CV (%)	10,48	5,02	CV (%)	7,84	5,72
		MÍNIMO	29,15	35,06	MÍNIMO	40,85	45,19
		MÁXIMO	38,74	38,74	MÁXIMO	52,09	52,09
		MÉDIA - MÍN=	5,12	1,99	MÉDIA - MÍN=	5,53	2,29
		MÉDIA - MÁX=	-4,47	-1,69	MÉDIA - MÁX=	-5,72	-4,61

Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 48. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C40-ARC50.

TRAÇO	CPs	7 DIAS			28 DIAS		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(N)	(MPa)	(MPa)	(N)	(MPa)	(MPa)
C40- ARC50	1	264712,34	33,70	-	279622,16	35,60	35,60
	2	365795,84	46,57	-	243611,19	31,02	-
	3	296680,00	37,77	37,77	242726,70	30,90	-
	4	296932,72	37,81	37,81	273430,81	34,81	34,81
	5	328015,88	41,76	-	224531,67	28,59	-
	6	250560,67	31,90	-	357709,16	45,54	45,54
	7			-	233123,77	29,68	-
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	38,25	37,79	MÉDIA	33,74	38,65
		DP	5,35	0,02	DP	5,81	5,98
		CV (%)	13,98	0,06	CV (%)	17,22	15,47
		MÍNIMO	31,90	37,77	MÍNIMO	28,59	34,81
		MÁXIMO	46,57	37,81	MÁXIMO	45,54	45,54
		MÉDIA - MÍN=	6,35	0,02	MÉDIA - MÍN=	5,15	3,84
		MÉDIA - MÁX=	-8,32	-0,02	MÉDIA - MÁX=	-11,81	-6,89

Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 49. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C40-ARP30.

TRAÇO	CPs	7 DIAS			28 DIAS		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(N)	(MPa)	(MPa)	(N)	(MPa)	(MPa)
C40- ARP30	1	278990,41	35,52	35,52	259405,47	33,03	-
	2	260416,31	33,16	33,16	308178,25	39,24	39,24
	3	314875,03	40,09	-	302871,38	38,56	38,56
	4	286571,66	36,49	36,49	258394,64	32,90	-
	5	313106,06	39,87	-	364153,22	46,37	46,37
	6	272167,25	34,65	34,65	177654,22	22,62	-
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	36,63	34,96	MÉDIA	35,45	41,39
		DP	2,82	1,41	DP	8,00	4,32
		CV (%)	7,69	4,04	CV (%)	22,57	10,44
		MÍNIMO	33,16	33,16	MÍNIMO	22,62	38,56
		MÁXIMO	40,09	36,49	MÁXIMO	46,37	46,37
		MÉDIA - MÍN=	3,47	1,80	MÉDIA - MÍN=	12,83	2,83
		MÉDIA - MÁX=	-3,46	-1,53	MÉDIA - MÁX=	-10,91	-4,98

Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 50. Valores individuais de resistência à compressão axial do concreto C40-ARP50.

TRAÇO	CPs	7 DIAS			28 DIAS		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(N)	(MPa)	(MPa)	(N)	(MPa)	(MPa)
C40- ARP50	1	257004,75	32,72	-	418991,00	53,35	53,35
	2	288719,69	36,76	-	464604,94	59,16	59,16
	3	332438,28	42,33	42,33	288593,34	36,74	-
	4	344062,88	43,81	43,81			
	5	297185,44	37,84	37,84			
	6	329911,19	42,01	42,01			
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	39,24	41,49	MÉDIA	49,75	56,25
		DP	4,21	2,56	DP	11,63	4,11
		CV (%)	10,73	6,17	CV (%)	23,38	7,30
		MÍNIMO	32,72	37,84	MÍNIMO	36,74	53,35
		MÁXIMO	43,81	43,81	MÁXIMO	59,16	59,16
		MÉDIA - MÍN=	6,52	3,66	MÉDIA - MÍN=	13,00	2,90
		MÉDIA - MÁX=	-4,56	-2,31	MÉDIA - MÁX=	-9,41	-2,90

Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

ANEXO B

Neste anexo B são relacionados os valores individuais de resistência à compressão cúbica dos concretos estudados aos 28 dias, sendo que alguns destes valores foram considerados discrepantes por não respeitar o coeficiente de variação igual a 6%, conforme sugerido pela NBR 5739:2018 (ABNT, 2018). Em seguida são relacionadas tabelas que sintetizam os valores individuais de cada concreto, os valores discrepantes retirados são destacados na cor vermelha, e os valores médios de resistência e coeficiente de variação são realçados em amarelo.

Tabela 51. Valores individuais de resistência à compressão cúbica do concreto C20 e C40.

IDADE	CPS	C20*			C40		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(kgf)	(MPa)	(MPa)	(N)	(MPa)	(MPa)
28 DIAS	1	39684,58	38,92	38,92	533215,38	53,32	53,32
	2	44980,16	44,11	44,11	294531,97	29,45	-
	3	37803,43	37,07	-	511861,47	51,19	51,19
	4	36179,97	35,48	-	546735,25	54,67	54,67
	5	42738,24	41,91	41,91	482547,25	48,25	-
	6	44284,39	43,43	43,43	574533,19	57,45	57,45
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	40,15	42,09	MÉDIA	49,06	54,16
		DP	3,53	2,31	DP	10,10	2,62
		CV (%)	8,79	5,48	CV (%)	20,58	4,85
		MÍNIMO	35,48	38,92	MÍNIMO	29,45	51,19
		MÁXIMO	44,11	44,11	MÁXIMO	57,45	57,45
		MÉDIA - MÍN=	4,67	3,17	MÉDIA - MÍN=	19,60	2,97
		MÉDIA - MÁX=	-3,96	-2,02	MÉDIA - MÁX=	-8,40	-3,29

*Feito aos 35 dias. Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 52. Valores individuais de resistência à compressão cúbica do concreto C20-ARC30 e C20-ARC50.

IDADE	CPS	C20-ARC30			C20-ARC50		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(kgf)	(MPa)	(MPa)	(N)	(MPa)	(MPa)
28 DIAS	1	44000,93	44,00	-	299333,44	29,93	29,93
	2	35561,51	35,56	35,56	326499,63	32,65	32,65
	3	38692,47	38,69	38,69	324857,03	32,49	32,49
	4	31721,9	31,72	-	324730,69	32,47	32,47
	5	40084,01	40,08	-	282654,69	28,27	28,27
	6	35329,59	35,33	35,33	342673,00	34,27	34,27
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	37,57	36,53	MÉDIA	31,68	31,68
		DP	4,29	1,88	DP	2,17	2,17
		CV (%)	11,43	5,14	CV (%)	6,86	6,86
		MÍNIMO	31,72	35,33	MÍNIMO	28,27	28,27
		MÁXIMO	44,00	38,69	MÁXIMO	34,27	34,27
		MÉDIA - MÍN=	5,84	1,20	MÉDIA - MÍN=	3,41	3,41
		MÉDIA - MÁX=	-6,44	-2,16	MÉDIA - MÁX=	-2,59	-2,59

Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 53. Valores individuais de resistência à compressão cúbica do concreto C20-ARP30 e C20-ARP50.

IDADE	CPS	C20-ARP30			C20-ARP50		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(N)	(MPa)	(MPa)	(N)	(MPa)	(MPa)
28 DIAS	1	578576,56	57,86	57,86	500995,00	50,10	-
	2	519442,72	51,94	51,94	391951,19	39,20	39,20
	3	537637,75	53,76	53,76	460940,66	46,09	-
	4	537006,00	53,70	53,70	377673,16	37,77	37,77
	5				421518,09	42,15	42,15
	6				480020,16	48,00	-
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	54,32	54,32	MÉDIA	43,88	39,70
		DP	2,51	2,51	DP	4,96	2,24
		CV (%)	4,62	4,62	CV (%)	11,30	5,63
		MÍNIMO	51,94	51,94	MÍNIMO	37,77	37,77
		MÁXIMO	57,86	57,86	MÁXIMO	50,10	42,15
		MÉDIA - MÍN=	2,37	2,37	MÉDIA - MÍN=	6,12	1,94
		MÉDIA - MÁX=	-3,54	-3,54	MÉDIA - MÁX=	-6,21	-2,45

Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 54. Valores individuais de resistência à compressão cúbica do concreto C40-ARC30 e C40-ARC50.

IDADE	CPS	C40-ARC30			C40-ARC50		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(kgf)	(MPa)	(MPa)	(kgf)	(MPa)	(MPa)
28 DIAS	1	612186,81	61,22	-	318665,66	31,87	-
	2	487348,72	48,73	48,73	422149,88	42,21	42,21
	3	487727,78	48,77	48,77	382980,03	38,30	-
	4	477240,38	47,72	47,72	387655,13	38,77	-
	5	428720,31	42,87	-	416084,88	41,61	41,61
	6	405850,16	40,59	-	397131,72	39,71	-
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	48,32	48,41	MÉDIA	38,74	41,91
		DP	7,16	0,59	DP	3,71	0,43
		CV (%)	14,83	1,23	CV (%)	9,57	1,02
		MÍNIMO	40,59	47,72	MÍNIMO	31,87	41,61
		MÁXIMO	61,22	48,77	MÁXIMO	42,21	42,21
		MÉDIA - MÍN=	7,73	0,69	MÉDIA - MÍN=	6,88	0,30
		MÉDIA - MÁX=	-12,90	-0,36	MÉDIA - MÁX=	-3,47	-0,30

Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 55. Valores individuais de resistência à compressão cúbica do concreto C40-ARP30 e C40-ARP50.

IDADE	CPS	C40-ARP30			C40-ARP50		
		F	f _c	f _c	F	f _c	f _c
		(N)	(MPa)	(MPa)	(N)	(MPa)	(MPa)
28 DIAS	1	435290,7	43,53	43,53	359730,81	35,97	-
	2	638468,5	63,85	-	612186,81	61,22	61,22
	3	446030,8	44,60	44,60	515652,09	51,57	-
	4	443377,4	44,34	44,34	464857,66	46,49	-
	5	495814,5	49,58	-	604226,50	60,42	60,42
	6	426572,3	42,66	42,66	547114,31	54,71	54,71
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	48,09	43,78	MÉDIA	51,73	58,78
		DP	8,09	0,88	DP	9,49	3,55
		CV (%)	16,82	2,01	CV (%)	18,35	6,04
		MÍNIMO	42,66	42,66	MÍNIMO	35,97	54,71
		MÁXIMO	63,85	44,60	MÁXIMO	61,22	61,22
		MÉDIA - MÍN=	5,44	1,12	MÉDIA - MÍN=	15,76	4,07
		MÉDIA - MÁX=	-15,75	-0,82	MÉDIA - MÁX=	-9,49	-2,43

Obs.: f_c: resistência individual à compressão axial cilíndrica; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

ANEXO C

Neste anexo C são relacionados os valores individuais de resistência à tração por compressão diametral dos concretos estudados aos 28 dias, sendo que alguns destes valores foram considerados discrepantes por não respeitar o coeficiente de variação igual a 6%, conforme sugerido pela NBR 5739:2018 (ABNT, 2018). Em seguida são relacionadas tabelas que sintetizam os valores individuais de cada concreto, os valores discrepantes retirados são destacados na cor vermelha, e os valores médios de resistência e coeficiente de variação são realçados em amarelo.

Tabela 56. Valores individuais de resistência à tração por compressão diametral do concreto C20 e C40.

IDADE	CPS	C20*			C40		
		F	f _{ct,sp}	f _{ct,sp}	F	f _{ct,sp}	f _{ct,sp}
		(kgf)	(MPa)	(MPa)	(kgf)	(MPa)	(MPa)
28 DIAS	1	11016,34	3,44	-	7614,80	2,38	-
	2	16827,29	5,25	-	10526,72	3,29	-
	3	13490,18	4,21	4,21	12137,30	3,79	-
	4	14933,26	4,66	-	17046,33	5,32	5,32
	5	12047,11	3,76	3,76	15886,72	4,96	4,96
	6	17561,72	5,48	-	9470,18	2,96	-
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	4,47	3,99	MÉDIA	3,78	5,14
		DP	0,81	0,32	DP	1,15	0,26
		CV (%)	18,20	7,99	CV (%)	30,51	4,98
		MÍNIMO	3,44	3,76	MÍNIMO	2,38	4,96
		MÁXIMO	5,48	4,21	MÁXIMO	5,32	5,32
		MÉDIA - MÍN=	1,03	0,23	MÉDIA - MÍN=	1,40	0,18
		MÉDIA - MÁX=	-1,01	-0,23	MÉDIA - MÁX=	-1,54	-0,18

*Feito aos 35 dias. Obs.: f_{ct,sp}: resistência individual à tração por compressão diametral;
DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 57. Valores individuais de resistência à tração por compressão diametral do concreto C20-ARC30 e C20-ARC50.

IDADE	CPS	C20-ARC30			C20-ARC50		
		F	f _{ct,sp}	f _{ct,sp}	F	f _{ct,sp}	f _{ct,sp}
		(kgf)	(MPa)	(MPa)	(kgf)	(MPa)	(MPa)
28 DIAS	1	9096,53	2,84	-	6249,03	1,95	-
	2	10410,76	3,25	3,25	7795,19	2,43	2,43
	3	7782,30	2,43	-	8825,95	2,76	2,76
	4	9418,65	2,94	2,94	8439,42	2,63	2,63
	5	11557,49	3,61	-	8787,30	2,74	2,74
	6	10011,34	3,13	3,13	7357,11	2,30	-
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	3,03	3,10	MÉDIA	2,47	2,64
		DP	0,40	0,16	DP	0,31	0,15
		CV (%)	13,16	5,02	CV (%)	12,60	5,64
		MÍNIMO	2,43	2,94	MÍNIMO	1,95	2,43
		MÁXIMO	3,61	3,25	MÁXIMO	2,76	2,76
		MÉDIA - MÍN=	0,60	0,16	MÉDIA - MÍN=	0,52	0,21
		MÉDIA - MÁX=	-0,58	-0,14	MÉDIA - MÁX=	-0,29	-0,11

Obs.: f_{ct,sp}: resistência individual à tração por compressão diametral;
DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 58. Valores individuais de resistência à tração por compressão diametral do concreto C20-ARP30 e C20-ARP50.

IDADE	CPS	C20-ARP30			C20-ARP50		
		F	f _{ct,sp}	f _{ct,sp}	F	f _{ct,sp}	f _{ct,sp}
		(kgf)	(MPa)	(MPa)	(kgf)	(MPa)	(MPa)
28 DIAS	1	14495,18	4,52	-	9341,34	2,92	-
	2	11750,76	3,67	3,67	10758,65	3,36	3,36
	3	7112,30	2,22	-	10462,30	3,27	3,27
	4	11132,30	3,47	3,47	8220,38	2,57	-
	5	9367,11	2,92	-	8916,15	2,78	-
	6	8697,11	2,71	-	11944,03	3,73	-
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	3,25	3,57	MÉDIA	3,10	3,31
		DP	0,81	0,14	DP	0,43	0,07
		CV (%)	24,98	3,82	CV (%)	13,74	1,97
		MÍNIMO	2,22	3,47	MÍNIMO	2,57	3,27
		MÁXIMO	4,52	3,67	MÁXIMO	3,73	3,36
		MÉDIA - MÍN=	1,03	0,10	MÉDIA - MÍN=	0,54	0,05
		MÉDIA - MÁX=	-1,27	-0,10	MÉDIA - MÁX=	-0,63	-0,05

Obs.: f_{ct,sp}: resistência individual à tração por compressão diametral;
DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 59. Valores individuais de resistência à tração por compressão diametral dos concretos C40-ARC30 e C40-ARC50.

IDADE	CPs	C40-ARC30			C40-ARC50		
		F	f _{ct,sp}	f _{ct,sp}	F	f _{ct,sp}	f _{ct,sp}
		(kgf)	(MPa)	(MPa)	(kgf)	(MPa)	(MPa)
28 DIAS	1	17716,33	5,53	-	15255,37	4,76	4,76
	2	14843,06	4,63	4,63	14572,49	4,55	4,55
	3	13644,80	4,26	4,26	15010,57	4,69	4,69
	4	13631,91	4,26	4,26	14855,95	4,64	4,64
	5	12897,49	4,03	4,03	16891,72	5,27	-
	6	16466,53	5,14	-	14456,53	4,51	4,51
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	4,64	4,29	MÉDIA	4,74	4,63
		DP	0,59	0,25	DP	0,28	0,10
		CV (%)	12,61	5,86	CV (%)	5,87	2,19
		MÍNIMO	4,03	4,03	MÍNIMO	4,51	4,51
		MÁXIMO	5,53	4,63	MÁXIMO	5,27	4,76
		MÉDIA - MÍN=	0,61	0,27	MÉDIA - MÍN=	0,22	0,12
		MÉDIA - MÁX=	-0,89	-0,34	MÉDIA - MÁX=	-0,54	-0,13

Obs.: f_{ct,sp}: resistência individual à tração por compressão diametral;

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 60. Valores individuais de resistência à tração por compressão diametral dos concretos C40-ARP30 e C40-ARP50.

IDADE	CPs	C40-ARP30			C40-ARP50		
		F	f _{ct,sp}	f _{ct,sp}	F	f _{ct,sp}	f _{ct,sp}
		(kgf)	(MPa)	(MPa)	(kgf)	(MPa)	(MPa)
28 DIAS	1	14353,45	4,48	4,48	10320,57	3,22	-
	2	13425,76	4,19	4,19	9792,30	3,06	-
	3	8954,80	2,80	-	10861,72	3,39	-
	4	20383,45	6,36	-	14469,41	4,52	4,52
	5	19262,48	6,01	-	9869,61	3,08	-
	6	11029,22	3,44	-	14353,45	4,48	4,48
		ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
		MÉDIA	4,55	4,34	MÉDIA	3,62	4,50
		DP	1,40	0,20	DP	0,69	0,03
		CV (%)	30,89	4,72	CV (%)	18,97	0,57
		MÍNIMO	2,80	4,19	MÍNIMO	3,06	4,48
		MÁXIMO	6,36	4,48	MÁXIMO	4,52	4,52
		MÉDIA - MÍN=	1,75	0,14	MÉDIA - MÍN=	0,57	0,02
		MÉDIA - MÁX=	-1,82	-0,14	MÉDIA - MÁX=	-0,89	-0,02

Obs.: f_{ct,sp}: resistência individual à tração por compressão diametral;

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

ANEXO D

Neste anexo D são relacionados os valores individuais de módulo de elasticidade dos concretos estudados aos 7 e 28 dias. Alguns valores discrepantes foram descartados para determinar a média do módulo, seguindo as premissas da norma NBR 8522:2017 (ABNT, 2017) pois diz que se a resistência efetiva ($f_{c,ef}$) diferir da resistência de ruptura (f_c) do concreto em $\pm 20\%$, o resultado de módulo do corpo de prova não é confiável. Também foi respeitado o coeficiente de variação igual a 6% conforme orienta a NBR 5738:2018 (ABNT, 2018). Em seguida são relacionadas tabelas que sintetizam os valores individuais de cada concreto, os valores discrepantes retirados são destacados na cor vermelha, e os valores médios de resistência e coeficiente de variação são realçados em amarelo.

Tabela 61. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20 aos 7 dias.

CPS	7 DIAS									
	f_c	-20%	$f_{c,ef}$	20%	σ_a	σ_b	ϵ_a	ϵ_b	E_c	E_c
	(MPa)		(MPa)		(MPa)	(MPa)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	(GPa)	(GPa)
1	28,28	22,62	22,44	33,94	0,5	8,48	21,52	252,84	34,51	-
2	28,28	22,62	35,08	33,94	0,5	8,48	20,62	271,66	31,80	-
3	28,28	22,62	34,96	33,94	0,5	8,48	12,55	229,52	36,80	-
4	28,28	22,62	33,05	33,94	0,5	8,48	8,07	244,77	33,73	33,73
5	28,28	22,62	23,27	33,94	0,5	8,48	17,93	239,39	36,05	36,05
6	28,28	22,62	29,14	33,94	0,5	8,48	10,76	241,18	34,65	34,65
								ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
								MÉDIA	34,59	34,81
								DP	1,76	1,17
								CV (%)	5,09	3,36
								MÍNIMO	31,80	33,73
								MÁXIMO	36,80	36,05
								MÉDIA - MÍN=	2,79	1,08
								MÉDIA - MÁX=	-2,21	-1,24

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto; ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 62. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20 aos 28 dias.

CPS	28 DIAS										
	f_c (MPa)	-20%	$f_{c,ef}$ (MPa)	20%	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_a ($\mu\epsilon$)	ϵ_b ($\mu\epsilon$)	E_c (GPa)	E_c (GPa)	
1	33,94	27,15	36,07	40,73	0,5	10,18	21,52	295,87	35,29	35,29	
2	33,94	27,15	35,63	40,73	0,5	10,18	23,31	286,01	36,86	36,86	
3	33,94	27,15	38,63	40,73	0,5	10,18	29,59	297,66	36,12	36,12	
4	33,94	27,15	35,23	40,73	0,5	10,18	11,66	269,87	37,50	37,50	
5	33,94	27,15	34,44	40,73	0,5	10,18	17,93	270,77	38,29	38,29	
6	33,94	27,15	37,55	40,73	0,5	10,18	24,21	318,29	32,92	32,92	
									ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
									MÉDIA	36,16	36,16
									DP	1,90	1,90
									CV (%)	5,25	5,25
									MÍNIMO	32,92	32,92
									MÁXIMO	38,29	38,29
									MÉDIA - MÍN=	3,24	3,24
									MÉDIA - MÁX=	-2,13	-2,13

*Feito aos 35 dias. Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;

ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 63. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40 aos 7 dias.

CPS	7 DIAS										
	f_c (MPa)	-20%	$f_{c,ef}$ (MPa)	20%	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_a ($\mu\epsilon$)	ϵ_b ($\mu\epsilon$)	E_c (GPa)	E_c (GPa)	
1	44,34	35,47	38,26	53,21	0,5	13,30	17,22	334,34	40,37	40,37	
2	44,34	35,47	42,26	53,21	0,5	13,30	19,03	304,44	44,85	44,85	
3	44,34	35,47	42,31	53,21	0,5	13,30	44,4	434,91	32,78	-	
4	44,34	35,47	46,12	53,21	0,5	13,30	19,03	300,81	45,43	45,43	
5	44,34	35,47	45,59	53,21	0,5	13,30	26,28	325,28	42,82	42,82	
6	44,34	35,47	43,39	53,21	0,5	13,30	12,68	308,06	43,34	43,34	
									ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
									MÉDIA	41,60	43,36
									DP	4,67	1,99
									CV (%)	11,23	4,58
									MÍNIMO	32,78	40,37
									MÁXIMO	45,43	45,43
									MÉDIA - MÍN=	8,82	2,99
									MÉDIA - MÁX=	-3,83	-2,07

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 64. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40 aos 28 dias.

CPS	28 DIAS										
	f_c (MPa)	-20%	$f_{c,ef}$ (MPa)	20%	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_a ($\mu\epsilon$)	ϵ_b ($\mu\epsilon$)	E_c (GPa)	E_c (GPa)	
1	39,52	31,62	50,90	47,43	0,5	11,86	15,4	281,78	42,63	-	
2	39,52	31,62	41,64	47,43	0,5	11,86	19,93	313,5	38,69	38,69	
3	39,52	31,62	48,51	47,43	0,5	11,86	21,75	299	40,96	-	
4	39,52	31,62	41,27	47,43	0,5	11,86	43,49	346,11	37,53	37,53	
5	39,52	31,62	24,41	47,43	0,5	11,86	28,09	302,62	41,37	-	
6	39,52	31,62	40,54	47,43	0,5	11,86	19,93	251,88	48,96	-	
									ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
									MÉDIA	41,69	38,11
									DP	4,02	0,82
									CV (%)	9,64	2,15
									MÍNIMO	37,53	37,53
									MÁXIMO	48,96	38,69
									MÉDIA - MÍN=	4,16	0,58
									MÉDIA - MÁX=	-7,27	-0,58

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 65. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARC30 aos 7 dias.

CPS	7 DIAS										
	f_c (MPa)	-20%	$f_{c,ef}$ (MPa)	20%	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_a ($\mu\epsilon$)	ϵ_b ($\mu\epsilon$)	E_c (GPa)	E_c (GPa)	
1	21,58	17,26	25,82	25,90	0,5	6,47	8,07	156	40,38	40,38	
2	21,58	17,26	21,91	25,90	0,5	6,47	43,93	235,8	31,14	-	
3	21,58	17,26	22,60	25,90	0,5	6,47	35,86	190,97	38,51	38,51	
4	21,58	17,26	26,72	25,90	0,5	6,47	19,72	195,45	34,00	-	
5	21,58	17,26	28,65	25,90	0,5	6,47	47,52	263,59	27,65	-	
6	21,58	17,26	23,21	25,90	0,5	6,47	16,14	178,42	36,81	36,81	
									ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
									MÉDIA	34,75	38,57
									DP	4,78	1,79
									CV (%)	13,76	4,63
									MÍNIMO	27,65	36,81
									MÁXIMO	40,38	40,38
									MÉDIA - MÍN=	7,10	1,76
									MÉDIA - MÁX=	-5,64	-1,81

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 66. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARC30 aos 28 dias.

CPS	28 DIAS									
	f_c	-20%	$f_{c,ef}$	20%	σ_a	σ_b	ϵ_a	ϵ_b	E_c	E_c
	(MPa)		(MPa)		(MPa)	(MPa)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	(GPa)	(GPa)
1	31,99	25,59	32,14	38,39	0,5	9,60	103,11	321,87	41,58	41,58
2	31,99	25,59	26,92	38,39	0,5	9,60	12,55	243,87	39,33	39,33
3	31,99	25,59	24,28	38,39	0,5	9,60	16,14	238,49	40,91	-
4	31,99	25,59	30,28	38,39	0,5	9,60	18,83	241,18	40,91	40,91
5	31,99	25,59	26,63	38,39	0,5	9,60	17,04	229,52	42,81	42,81
6	31,99	25,59	29,92	38,39	0,5	9,60	34,97	265,39	39,48	39,48
								ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
								MÉDIA	40,84	40,82
								DP	1,31	1,47
								CV (%)	3,21	3,59
								MÍNIMO	39,33	39,33
								MÁXIMO	42,81	42,81
								MÉDIA - MÍN=	1,51	1,50
								MÉDIA - MÁX=	-1,98	-1,99

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 67. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARC50 aos 7 dias.

CPS	7 DIAS									
	f_c	-20%	$f_{c,ef}$	20%	σ_a	σ_b	ϵ_a	ϵ_b	E_c	E_c
	(MPa)		(MPa)		(MPa)	(MPa)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	(GPa)	(GPa)
1	18,49	14,79	17,34	22,19	0,5	5,55	28,09	202,96	28,86	28,86
2	18,49	14,79	19,92	22,19	0,5	5,55	12,68	164	33,35	33,35
3	18,49	14,79	15,46	22,19	0,5	5,55	15,4	169,43	32,76	32,76
4	18,49	14,79	18,82	22,19	0,5	5,55	16,31	179,4	30,94	30,94
5	18,49	14,79	19,93	22,19	0,5	5,55	25,37	187,55	31,12	31,12
6	18,49	14,79	22,86	22,19	0,5	5,55	6,34	144,06	36,64	-
								ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
								MÉDIA	32,28	31,41
								DP	2,66	1,76
								CV (%)	8,23	5,61
								MÍNIMO	28,86	28,86
								MÁXIMO	36,64	33,35
								MÉDIA - MÍN=	3,42	2,55
								MÉDIA - MÁX=	-4,36	-1,94

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 68. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARC50 aos 28 dias.

CPS	28 DIAS									
	f_c	-20%	$f_{c,ef}$	20%	σ_a	σ_b	ϵ_a	ϵ_b	E_c	E_c
	(MPa)		(MPa)		(MPa)	(MPa)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	(GPa)	(GPa)
1	23,01	18,41	24,00	27,62	0,5	6,90	28,09	233,76	31,14	31,14
2	23,01	18,41	23,68	27,62	0,5	6,90	19,03	226,51	30,87	30,87
3	23,01	18,41	21,91	27,62	0,5	6,90	29,9	257,32	28,16	-
4	23,01	18,41	23,13	27,62	0,5	6,90	19,93	206,58	34,31	34,31
5	23,01	18,41	23,20	27,62	0,5	6,90	21,75	216,55	32,88	32,88
6	23,01	18,41	21,45	27,62	0,5	6,90	26,28	233,76	30,87	30,87
								ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
								MÉDIA	31,37	32,01
								DP	2,09	1,53
								CV (%)	6,65	4,79
								MÍNIMO	28,16	30,87
								MÁXIMO	34,31	34,31
								MÉDIA - MÍN=	3,21	1,15
								MÉDIA - MÁX=	-2,94	-2,30

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do
 corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 69. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARP30 aos 7 dias.

CPS	7 DIAS									
	f_c	-20%	$f_{c,ef}$	20%	σ_a	σ_b	ϵ_a	ϵ_b	E_c	E_c
	(MPa)		(MPa)		(MPa)	(MPa)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	(GPa)	(GPa)
1	30,21	24,16	25,00	36,25	0,5	9,06	30,48	255,53	38,04	-
2	30,21	24,16	23,38	36,25	0,5	9,06	26	239,39	40,12	-
3	30,21	24,16	19,53	36,25	0,5	9,06	20,62	232,21	40,46	-
4	30,21	24,16	32,22	36,25	0,5	9,06	20,62	218,77	43,21	43,21
5	30,21	24,16	37,10	36,25	0,5	9,06	43,93	278,84	36,45	-
6	30,21	24,16	32,24	36,25	0,5	9,06	15,24	217,87	42,25	42,25
								ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
								MÉDIA	40,09	42,73
								DP	2,53	0,68
								CV (%)	6,31	1,58
								MÍNIMO	36,45	42,25
								MÁXIMO	43,21	43,21
								MÉDIA - MÍN=	3,64	0,48
								MÉDIA - MÁX=	-3,12	-0,48

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do
 corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 70. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARP30 aos 28 dias.

CPS	28 DIAS										
	f_c (MPa)	-20%	$f_{c,ef}$ (MPa)	20%	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_a ($\mu\epsilon$)	ϵ_b ($\mu\epsilon$)	E_c (GPa)	E_c (GPa)	
1	35,50	28,40	29,70	42,59	0,5	10,65	8,07	250,15	41,92	41,92	
2	35,50	28,40	28,67	42,59	0,5	10,65	15,24	252,84	42,71	42,71	
3	35,50	28,40	39,96	42,59	0,5	10,65	16,14	275,25	39,17	39,17	
4	35,50	28,40	31,32	42,59	0,5	10,65	27,79	321,87	34,51	-	
5	35,50	28,40	29,12	42,59	0,5	10,65	1,79	240,28	42,55	42,55	
6	35,50	28,40	30,81	42,59	0,5	10,65	31,38	318,29	35,37	-	
									ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
									MÉDIA	39,37	41,59
									DP	3,67	1,65
									CV (%)	9,33	3,97
									MÍNIMO	34,51	39,17
									MÁXIMO	42,71	42,71
									MÉDIA - MÍN=	4,86	2,42
									MÉDIA - MÁX=	-3,34	-1,12

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 71. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARP50 aos 7 dias.

CPS	7 DIAS										
	f_c (MPa)	-20%	$f_{c,ef}$ (MPa)	20%	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_a ($\mu\epsilon$)	ϵ_b ($\mu\epsilon$)	E_c (GPa)	E_c (GPa)	
1	30,20	24,16	26,43	36,24	0,5	9,06	11,78	200,24	45,42	-	
2	30,20	24,16	23,55	36,24	0,5	9,06	19,93	254,6	36,47	-	
3	30,20	24,16	23,76	36,24	0,5	9,06	2,72	206,58	41,99	-	
4	30,20	24,16	31,08	36,24	0,5	9,06	19,03	239,2	38,88	38,88	
5	30,20	24,16	23,62	36,24	0,5	9,06	27,18	274,54	34,60	-	
6	30,20	24,16	27,98	36,24	0,5	9,06	10,87	216,55	41,61	41,61	
									ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
									MÉDIA	39,83	40,24
									DP	3,96	1,94
									CV (%)	9,95	4,81
									MÍNIMO	34,60	38,88
									MÁXIMO	45,42	41,61
									MÉDIA - MÍN=	5,23	1,37
									MÉDIA - MÁX=	-5,59	-1,37

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 72. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C20-ARP50 aos 28 dias.

CPS	28 DIAS									
	f_c (MPa)	-20%	$f_{c,ef}$ (MPa)	20%	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_a ($\mu\epsilon$)	ϵ_b ($\mu\epsilon$)	E_c (GPa)	E_c (GPa)
1	35,57	28,46	22,38	42,69	0,5	10,67	11,78	250,98	42,53	42,53
2	35,57	28,46	26,40	42,69	0,5	10,67	6,34	228,33	45,82	45,82
3	35,57	28,46	27,01	42,69	0,5	10,67	23,56	249,17	45,09	45,09
4	35,57	28,46	26,37	42,69	0,5	10,67	21,75	297,19	36,93	-
5	35,57	28,46	26,63	42,69	0,5	10,67	19,03	259,13	42,37	42,37
6	35,57	28,46	28,36	42,69	0,5	10,67	28,99	286,31	39,53	39,53
								ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
								MÉDIA	42,04	43,07
								DP	3,36	2,50
								CV (%)	7,98	5,80
								MÍNIMO	36,93	39,53
								MÁXIMO	45,82	45,82
								MÉDIA - MÍN=	5,11	3,54
								MÉDIA - MÁX=	-3,78	-2,76

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 73. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARC30 aos 7 dias.

CPS	7 DIAS									
	f_c (MPa)	-20%	$f_{c,ef}$ (MPa)	20%	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_a ($\mu\epsilon$)	ϵ_b ($\mu\epsilon$)	E_c (GPa)	E_c (GPa)
1	37,05	29,64	42,76	44,46	0,5	11,12	30,81	270,01	44,38	44,38
2	37,05	29,64	33,48	44,46	0,5	11,12	39,87	293,56	41,84	41,84
3	37,05	29,64	36,50	44,46	0,5	11,12	24,46	271,82	42,91	42,91
4	37,05	29,64	37,20	44,46	0,5	11,12	27,18	304,44	38,29	38,29
5	37,05	29,64	26,90	44,46	0,5	11,12	26,28	296,28	39,31	-
6	37,05	29,64	31,37	44,46	0,5	11,12	15,4	269,1	41,84	41,84
								ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
								MÉDIA	41,43	41,85
								DP	2,26	2,25
								CV (%)	5,46	5,37
								MÍNIMO	38,29	38,29
								MÁXIMO	44,38	44,38
								MÉDIA - MÍN=	3,14	3,57
								MÉDIA - MÁX=	-2,95	-2,53

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 74. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARC30 aos 28 dias.

CPS	28 DIAS									
	f_c (MPa)	-20%	$f_{c,ef}$ (MPa)	20%	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_a ($\mu\epsilon$)	ϵ_b ($\mu\epsilon$)	E_c (GPa)	E_c (GPa)
1	47,48	37,98	32,21	56,97	0,5	14,24	21,75	371,48	39,30	-
2	47,48	37,98	43,45	56,97	0,5	14,24	24,46	328,9	45,14	45,14
3	47,48	37,98	50,85	56,97	0,5	14,24	19,93	322,56	45,41	45,41
4	47,48	37,98	53,89	56,97	0,5	14,24	1383,55	1717,89	41,11	41,11
5	47,48	37,98	46,37	56,97	0,5	14,24	26,28	378,73	38,99	-
6	47,48	37,98	35,18	56,97	0,5	14,24	7,25	361,52	38,79	-
								ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
								MÉDIA	41,46	43,89
								DP	3,07	2,41
								CV (%)	7,41	5,50
								MÍNIMO	38,79	41,11
								MÁXIMO	45,41	45,41
								MÉDIA - MÍN=	2,66	2,78
								MÉDIA - MÁX=	-3,96	-1,53

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 75. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARC50 aos 7 dias.

CPS	7 DIAS									
	f_c (MPa)	-20%	$f_{c,ef}$ (MPa)	20%	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_a ($\mu\epsilon$)	ϵ_b ($\mu\epsilon$)	E_c (GPa)	E_c (GPa)
1	37,79	30,23	35,51	45,35	0,5	11,34	29,90	314,40	38,09	38,09
2	37,79	30,23	32,74	45,35	0,5	11,34	41,68	354,27	34,67	34,67
3	37,79	30,23	38,34	45,35	0,5	11,34	8,15	306,25	36,35	36,35
4	37,79	30,23	38,06	45,35	0,5	11,34	47,12	367,86	33,79	33,79
5	37,79	30,23	36,44	45,35	0,5	11,34	22,65	299,00	39,22	-
6	37,79	30,23	37,95	45,35	0,5	11,34	31,71	347,02	34,37	34,37
								ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
								MÉDIA	36,08	35,45
								DP	2,20	1,76
								CV (%)	6,09	4,95
								MÍNIMO	33,79	33,79
								MÁXIMO	39,22	38,09
								MÉDIA - MÍN=	2,29	1,67
								MÉDIA - MÁX=	-3,13	-2,64

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 76. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARC50 aos 28 dias.

CPS	28 DIAS									
	f_c (MPa)	-20%	$f_{c,ef}$ (MPa)	20%	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_a ($\mu\epsilon$)	ϵ_b ($\mu\epsilon$)	E_c (GPa)	E_c (GPa)
1	32,21	25,77	35,10	38,65	0,5	9,66	18,12	280,88	34,87	34,87
2	32,21	25,77	37,65	38,65	0,5	9,66	11,78	258,23	37,18	37,18
3	32,21	25,77	52,11	38,65	0,5	9,66	17,22	284,5	34,28	-
4		0,00		0,00	0,5	0,00			-	-
5		0,00		0,00	0,5	0,00			-	-
6		0,00		0,00	0,5	0,00			-	-
								ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
								MÉDIA	35,44	36,03
								DP	1,53	1,63
								CV (%)	4,32	4,53
								MÍNIMO	34,28	34,87
								MÁXIMO	37,18	37,18
								MÉDIA - MÍN=	1,16	1,15
								MÉDIA - MÁX=	-1,74	-1,15

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 77. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARP30 aos 7 dias.

CPS	7 DIAS									
	f_c (MPa)	-20%	$f_{c,ef}$ (MPa)	20%	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_a ($\mu\epsilon$)	ϵ_b ($\mu\epsilon$)	E_c (GPa)	E_c (GPa)
1	34,96	27,96	33,30	41,95	0,5	10,49	29,9	322,56	34,12	34,12
2	34,96	27,96	35,89	41,95	0,5	10,49	56,18	372,39	31,58	-
3	34,96	27,96	39,27	41,95	0,5	10,49	9,06	250,98	41,28	-
4	34,96	27,96	34,83	41,95	0,5	10,49	24,46	291,75	37,36	37,36
5	34,96	27,96	41,25	41,95	0,5	10,49	45,3	318,93	36,50	36,50
6	34,96	27,96	46,51	41,95	0,5	10,49	13,59	228,33	46,51	-
								ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
								MÉDIA	37,89	35,99
								DP	5,33	1,68
								CV (%)	14,06	4,66
								MÍNIMO	31,58	34,12
								MÁXIMO	46,51	37,36
								MÉDIA - MÍN=	6,31	1,87
								MÉDIA - MÁX=	-8,61	-1,37

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 78. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARP30 aos 28 dias.

CPS	28 DIAS										
	f_c	-20%	$f_{c,ef}$	20%	σ_a	σ_b	ϵ_a	ϵ_b	E_c	E_c	
	(MPa)		(MPa)		(MPa)	(MPa)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	(GPa)	(GPa)	
1	41,39	33,11	42,57	49,67	0,5	12,42	8,15	260,04	47,31	47,31	
2	41,39	33,11	48,75	49,67	0,5	12,42	1,81	240,11	50,01	50,01	
3	41,39	33,11	37,03	49,67	0,5	12,42	13,59	260,95	48,18	48,18	
4	41,39	33,11	37,02	49,67	0,5	12,42	24,46	294,47	44,13	44,13	
5	41,39	33,11	48,78	49,67	0,5	12,42	21,75	271,82	47,65	47,65	
6	41,39	33,11	45,26	49,67	0,5	12,42	40,77	312,59	43,84	43,84	
									ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
									MÉDIA	46,85	46,85
									DP	2,41	2,41
									CV (%)	5,14	5,14
									MÍNIMO	43,84	43,84
									MÁXIMO	50,01	50,01
									MÉDIA - MÍN=	3,01	3,01
									MÉDIA - MÁX=	-3,15	-3,15

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 79. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARP50 aos 7 dias.

CPS	7 DIAS										
	f_c	-20%	$f_{c,ef}$	20%	σ_a	σ_b	ϵ_a	ϵ_b	E_c	E_c	
	(MPa)		(MPa)		(MPa)	(MPa)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	(GPa)	(GPa)	
1	41,49	33,20	36,81	49,79	0,5	12,45	20,84	273,63	47,27	47,27	
2	41,49	33,20	31,85	49,79	0,5	12,45	9,97	236,48	52,75	-	
3	41,49	33,20	36,25	49,79	0,5	12,45	19,03	289,03	44,25	44,25	
4	41,49	33,20	33,93	49,79	0,5	12,45	31,71	331,62	39,84	-	
5	41,49	33,20	34,38	49,79	0,5	12,45	20,84	279,07	46,27	46,27	
6	41,49	33,20	36,58	49,79	0,5	12,45	4,53	300,81	40,33	-	
									ANÁLISE ESTATÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
									MÉDIA	45,12	45,93
									DP	4,81	1,53
									CV (%)	10,66	3,34
									MÍNIMO	39,84	44,25
									MÁXIMO	52,75	47,27
									MÉDIA - MÍN=	5,28	1,68
									MÉDIA - MÁX=	-7,63	-1,34

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.

Tabela 80. Valores individuais de módulo de elasticidade do concreto C40-ARP50 aos 28 dias.

CPS	28 DIAS									
	f_c	-20%	$f_{c,ef}$	20%	σ_a	σ_b	ϵ_a	ϵ_b	E_c	E_c
	(MPa)		(MPa)		(MPa)	(MPa)	($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	(GPa)	(GPa)
1	56,25	45,00	42,60	67,50	0,5	16,88	37,15	395,04	45,76	-
2	56,25	45,00	55,46	67,50	0,5	16,88	14,5	388,70	43,76	43,76
3	56,25	45,00	48,89	67,50	0,5	16,88	9,97	379,64	44,30	44,30
4										
5										
6										
								ANÁLISE ESTADÍSTICA	S/ TRAT.	C/ TRAT.
								MÉDIA	44,60	44,03
								DP	1,03	0,38
								CV (%)	2,31	0,86
								MÍNIMO	43,76	43,76
								MÁXIMO	45,76	44,30
								MÉDIA - MÍN=	0,84	0,27
								MÉDIA - MÁX=	-1,15	-0,27

Obs.: σ_a : tensão básica; σ_b : tensão maior, considerada 30% da resistência do concreto;
 ϵ_a : deformação específica do concreto sob a tensão básica; ϵ_b : deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior; E_c : módulo de elasticidade individual
 DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Fonte: a autora.