UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO

Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo

JOSEPH SALEM BARBAR

Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados

São Carlos – SP

2016

JOSEPH SALEM BARBAR

Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados

Tese apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – Campus de São Carlos, para obtenção do título de Doutor em Ciências. "Versão corrigida".

Área de concentração:
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

Orientador:
Prof. Dr. João Adriano Rossignolo

São Carlos – SP

2016

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

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo

com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B229i

Barbar, Joseph Salem
Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados / Joseph Salem Barbar; orientador João Adriano Rossignolo. -- São Carlos, 2016.
150 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2016.

1. Concreto leve. 2. Concreto com ar incorporado. 3. Micro-CT. 4. Carbonatação. 5. Condutividade térmica. I. Rossignolo, João Adriano , orient. II. Título.

BARBAR, Joseph Salem. I**nfluência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados**. Tese apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos – SP para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Folha de julgamento

Título da tese: **"Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados"**

Data da defesa: **11/11/2016**

Orientador: Prof. Dr. João Adriano Rossignolo

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Prof. Dr. João Adriano Rossignolo (FZEA/USP)	APROVADO
Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos (IAU/USP)	APROVADO
Prof. Dr. Antônio de Paulo Peruzzi (UFU)	APROVADO
Prof. Dr. Juliano Fiorelli (FZEA/USP)	APROVADO
Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira (UFSCar)	Aprovado

Coordenadora e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: Profa. Dra. **Cibele Saliba Rizek.**

Aos meus pais Salem e Saode, com gratidão, que não mediram esforços pela minha formação profissional; à minha esposa Paula, com amor, admiração e gratidão, pelo incentivo, compreensão, paciência, presença e incansável apoio ao longo do período de realização deste trabalho; aos meus filhos Gabriel, George e Giovana como exemplo de perseverança e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Adriano Rossignolo, pela disponibilidade, atenção dispensada, paciência, ideias e empenho durante todo o período de realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Turíbio José da Silva e Dr. Antônio de Paulo Peruzzi pelos ensinamentos e contribuições úteis à realização deste trabalho.

Aos técnicos Wanderly Geraldo da Silva, Cristiane Pires e Josildo de Azevedo da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia pela ajuda na execução de ensaios.

À técnica Ângela Maria da Silva Andrade da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pela ajuda na preparação de amostras.

Ao técnico Diego Luiz Ferrari da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, Campus de Pirassununga, pela ajuda na realização dos ensaios de condutividade térmica.

Ao técnico Daniel Uliana da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, pela realização dos ensaios de microtomografia computadorizada de raios-X, Micro-CT.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil, pelo apoio à realização desta pesquisa.

À Universidade de São Paulo e ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Campus de São Carlos, pela oportunidade de realização desta pesquisa.

À Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos e Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela disponibilização de laboratórios e equipamentos.

A todos os amigos e colegas, que de forma direta ou indireta, contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO

BARBAR, J. S. **Influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados**. 2016. 150 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

A utilização de aditivos incorporadores de ar em concretos é uma prática comum na construção civil e sua aplicação influencia significativamente diversas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. O objetivo deste estudo foi avaliar a influência do teor de ar incorporado, por meio de aditivo, no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados. O programa experimental incluiu avaliação da eficiência de aditivos na incorporação de ar em pastas de cimento, análise microestrutural e ensaios para determinação de propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade de concretos com diferentes teores de ar (10, 20 e 30%) e agregados. No estado fresco, foram realizados ensaios para determinação do teor de ar, massa específica e abatimento. No estado endurecido foram realizados ensaios de massa específica, absorção, resistência à compressão, módulo de elasticidade, velocidade de propagação da onda ultrassônica, carbonatação acelerada e condutividade térmica. Utilizando Microtomografia Computadorizada de Raios-X (Micro-CT) foram dimensionados e quantificados os poros presentes nas amostras dos concretos, bem como determinadas suas porosidades. Os concretos com menores teores de agregados apresentaram menor resistência mecânica, menor velocidade da frente de carbonatação e menor condutividade térmica. De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que o aditivo a base de resinas sintéticas foi mais eficiente na incorporação de ar; maiores teores de ar implicam em variabilidade nos resultados de ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade; os concretos com maiores teores de agregados apresentaram maior velocidade da frente de carbonatação, para mesmos teores de ar incorporado; a condutividade térmica é inversamente proporcional ao teor de ar incorporado no concreto, e quanto menor o teor de agregados, menor a condutividade térmica; o aumento do teor de ar no concreto promove aumento no diâmetro equivalente dos poros e redução da incidência de poros esféricos.

Palavras-chave: Concreto leve. Concreto com ar incorporado. Micro-CT. Carbonatação. Condutividade térmica.

ABSTRACT

BARBAR, J. S. **The influence of air entrained content in concrete performance with different aggregate contents**. 2016. 150 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

The use of entraining air additives in concrete is a common practice in construction and its application influences several concrete properties in the fresh and hardened state. The aim of this study was evaluate the influence of air entrained content, by additive, in concrete performance with different aggregate contents. The experimental program included the evaluation of additives effectiveness of air entrainment in cement pastes, microstructural analysis and the concretes physical and mechanical properties and durability, with different levels of entrained air (10, 20 and 30%) and aggregates. Tests were performed in fresh to determine the air content, density and slump. In hardened concrete, density, absorption, compressive strength, elastic modulus, ultrasonic pulse velocity, accelerated carbonation and thermal conductivity tests were performed. By computed X-ray microtomography, the pores present in the concrete samples were sized and quantified and determined the concretes porosities. Concretes with lower aggregate levels presented lower mechanical strength, carbonation speed and thermal conductivity. According to the results, it can be concluded that the synthetic resins base additive was more efficient in air entrainment; larger air content implies variability in the results of the compressive strength and elastic modulus tests; concrete with higher aggregate levels presented higher carbonation speed, for the same entrained air content; thermal conductivity is inversely proportional to the air entrained content in concrete, and as lower was the aggregate content, lower was the thermal conductivity; the increase of air content in concrete promotes increase in the pores diameter and reduction of the incidence of spherical pores.

Keywords: Lightweight concrete. Air entrained concrete. Micro-CT. Carbonation. Thermal conductivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Mecanismo de incorporação de ar. 27

Figura 3-2: Sistema de poros no concreto com ar incorporado: ar incorporado (a); ar aprisionado (b); poros capilares (c) 28

Figura 3-3: Causas físicas da deterioração do concreto 36

Figura 3-4: Causas químicas da deterioração do concreto 36

Figura 3-5: Coeficiente de carbonatação do concreto 38

Figura 4-1: Aparelho medidor do teor de ar (a) e leitura do teor de ar (b). 41

Figura 4-2: Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto 46

Figura 4-3: Região elástica de um material: 0P 48

Figura 4-4: Lei de Hooke 49

Figura 4-5: Região plástica de um material: EB 49

Figura 4-6: Representação do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial 51

Figura 4-7: Comportamentos típicos de tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto 52

Figura 4-8: Fatores que influenciam o módulo de elasticidade do concreto. 53

Figura 4-9: Ilustração dos modos de transmissão no ensaio de ultrassom no concreto: direto (a), indireto (b) e semidireto (c). 57

Figura 4-10: Efeito da porosidade (a) e concentração de areia (b) na VPU. 59

Figura 5-1: Curva granulométrica do agregado miúdo 66

Figura 5-2: Curva granulométrica do agregado graúdo 67

Figura 5-3: Determinação da massa específica da pasta de cimento no estado fresco. 69

Figura 5-4: Moldes dos corpos de prova das pastas de cimento: microscopia. 70

Figura 5-5: Esquema de corte dos corpos de prova das pastas de cimento. 73

Figura 5-6: Esquema de corte transversal do corpo de prova da pasta de cimento mostrando as áreas de obtenção das imagens. 73

Figura 5-7: Micrografias: método de identificação e dimensionamento das bolhas de ar presentes nas pastas de cimento. 73

Figura 5-8: Produção dos concretos: betoneira (a) e concreto após mistura (b).....76

Figura 5-9: Moldagem (a) e desforma (b) dos corpos de prova de concreto. 79

Figura 5-10: Consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone.....80

Figura 5-11: Medidor para determinação do teor de ar no concreto fresco: método pressométrico. 81

Figura 5-12: Determinação da massa específica e absorção de água por imersão dos concretos: estufa (a), balança hidrostática (b) e autoclave (c). 82

Figura 5-13: Preparação e caracterização dos corpos de prova de concreto: retificação das bases e topos (a), pesagem (b) e medição das alturas e diâmetros (c). 83

Figura 5-14: Ensaios de resistência à compressão (a) e módulo de elasticidade (b) dos concretos.....84

Figura 5-15: Ensaio para determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica nos concretos.....85

Figura 5-16: Câmara de carbonatação acelerada utilizada. 86

Figura 5-17: Corpos de prova dos concretos utilizados nos ensaios de carbonatação acelerada. 86

Figura 5-18: Preparação dos corpos de prova de concreto utilizados nos ensaios de carbonatação acelerada.....86

Figura 5-19: Ação da solução de fenoftaleina (a) e profundidades de carbonatação (b) nos corpos de prova de concreto. 87

Figura 5-20: Corpos de prova utilizados nos ensaios de condutividade térmica dos concretos: sem HFT (a) e com HFT (b).....88

Figura 5-21: Ensaio de condutividade térmica dos concretos.....88

Figura 5-22: Equipamento de MicroCT: vista externa (a), vista interna (b) e posicionamento da amostra (c). 89

Figura 5-23: Fluxograma do processamento de imagens no software Avizo 9.0. 90

Figura 5-24: Exemplo de discretização de poros (a) e argamassa (b).....91

Figura 5-25: Poros (a), esfericidades (b) e identificação das bolhas (c). 92

Figura 6-1: Massas específicas das pastas de cimento no estado fresco: Traços I e IV. 93

Figura 6-2: Massa específica das pastas de cimento no estado fresco: aditivos A e B. 94

Figura 6-3: Massa específica das pastas de cimento no estado endurecido: amostra seca. 94

Figura 6-4: Massa específica das pastas de cimento no estado endurecido: após saturação. 94

Figura 6-5: Massa específica das pastas de cimento no estado endurecido: amostra seca - aditivos A e B. 95

Figura 6-6: Massa específica das pastas de cimento no estado endurecido: amostra após saturação - aditivos A e B. 95

Figura 6-7: Absorção de água das pastas de cimento no estado endurecido. 96

Figura 6-8: Índice de vazios das pastas de cimento no estado endurecido. 96

Figura 6-9: Absorção de água das pastas de cimento no estado endurecido: amostra após imersão - aditivos A e B. 96

Figura 6-10: Absorção de água das pastas de cimento no estado endurecido:amostra após imersão e fervura - aditivos A e B. 97

Figura 6-11: Índice e vazios das pastas de cimento no estado endurecido: amostra após saturação - aditivos A e B. 97

Figura 6-12: Índice de vazios das pastas de cimento no estado endurecido: amostra após saturação e fervura - aditivos A e B. 97

Figura 6-13: Quantidade total de bolhas de ar observadas nas amostras das pastas de cimento dos traços controle e IV: aditivos A e B. 98

Figura 6-14: Tamanhos e quantidades de bolhas de ar observadas na amostra da pasta de cimento do traço II: aditivos A e B. 99

Figura 6-15: Tamanhos e quantidades de bolhas de ar observadas na amostra da pasta de cimento do traço III: aditivos A e B. 100

Figura 6-16: Tamanhos e quantidades de bolhas de ar observadas na amostra da pasta de cimento do traço IV: aditivos A e B. 100

Figura 6-17: Tamanhos e quantidades de bolhas de ar observadas na amostra da pasta de cimento do traço V: aditivos A e B. 100

Figura 6-18: Micrografias das pastas de cimento do traço IV obtidas por meio de Microscopia óptica (50X): aditivos A, B, C e D 101

Figura 6-19: Teor de agregados dos concretos. 103

Figura 6-20: Teor de sólidos dos concretos. 103

Figura 6-21: Consumo de cimento dos concretos (por m^3 de concreto). 103

Figura 6-22: Resultados dos teores de ar. 104

Figura 6-23: Teor de aditivo x Teor de ar: traços padrões e modificados. 105

Figura 6-24: Consumo de cimento x Teor de ar: traços padrões e modificados. 106

Figura 6-25: Resultados das massas específicas dos concretos no estado fresco. 106

Figura 6-26: Teor de ar x Massa específica: traços padrões e modificados. 107

Figura 6-27: Resultados do abatimento do tronco de cone dos concretos. 107

Figura 6-28: Teor de ar x Abatimento: traços padrões e modificados. 108

Figura 6-29: Visualização das amostras de concreto (a), volume da argamassa sem agregados graúdos com discretização dos poros (b), poros (c) e volume da argamassa (d): traços referência (0), padrões (I, II e III) e modificados (I M, II M e III M). 109

Figura 6-30: Concentração e diâmetros equivalentes dos poros presentes nas amostras dos concretos. 111

Figura 6-31: Amostras dos concretos analisadas (a) e respectivas seções transversais (b) e longitudinais (c e d): traços referência (0), padrões (I, II e III) e modificados (I M, II M e III M). 112

Figura 6-32: Concentrações e esfericidades de poros presentes nas amostras dos concretos. 115

Figura 6-33: Concentrações e diâmetros das bolhas de ar ($0 \leq \Phi < 0,95$) presentes nas amostras dos concretos. 116

Figura 6-34: Comparativo entre quantidades de poros e bolhas ($0 \leq \Phi < 0,95$) presentes nas amostras dos concretos. 117

Figura 6-35: Porosidade das argamassas dos concretos analisados. 118

Figura 6-36: Teor de ar x Porosidade: traços padrões e modificados. 119

Figura 6-37: Resultados das massas específicas dos concretos no estado endurecido: amostra seca. 120

Figura 6-38: Teor de ar x Massa específica: concreto estado endurecido - amostra seca - traços padrões e modificados. 121

Figura 6-39: Valores da absorção de água dos concretos após imersão. 122

Figura 6-40: Valores da absorção de água dos concretos após imersão e fervura. 122

Figura 6-41: Teor de ar x Absorção de água dos concretos: traços padrões e modificados. 123

Figura 6-42: Fraturas tipos F (A) e G (B) observadas nas rupturas dos corpos de prova dos concretos. 125

Figura 6-43: Valores da resistência à compressão dos concretos aos 28 e 91 dias. 126

Figura 6-44: Valores do módulo de elasticidade dos concretos aos 28 e 91 dias... 127

Figura 6-45: Comparação dos valores da resistência à compressão dos concretos padrões e modificados. 127

Figura 6-46: Resistência à compressão x Teor de ar dos concretos padrões e modificados. 128

Figura 6-47: Comparação dos valores do módulo de elasticidade dos concretos padrões e modificados. 128

Figura 6-48: Módulo de elasticidade x Teor de ar dos concretos padrões e modificados. 129

Figura 6-49: Comparativo das velocidades de propagação da onda ultrassônica dos concretos. 130

Figura 6-50: Teor de ar x VPU dos concretos. 131

Figura 6-51: Teor de sólidos x VPU dos concretos na condição seco. 131

Figura 6-52: Teor de ar x Profundidade de carbonatação dos concretos padrões e modificados. 132

Figura 6-53: Evolução da frente de carbonatação nos concretos. 133

Figura 6-54: Valores de condutividade térmica dos concretos. 134

Figura 6-55: Teor de ar x Condutividade térmica dos concretos padrões e modificados. 135

Figura 6-56: Massa específica x Condutividade térmica dos concretos padrões e modificados. 135

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Valores de referência da massa específica dos concretos leves 25

Tabela 3-2: Relação:massa específica, teor de ar e resistência à compressão 29

Tabela 3-3: Classes de agressividade ambiental 30

Tabela 3-4: Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto. 31

Tabela 3-5: Resumo das principais origens e causas da deterioração do concreto . 33

Tabela 4-1: Métodos adequados para avaliação de trabalhabilidades de misturas. . 42

Tabela 4-2: Relação entre trabalhabilidade e abatimento 42

Tabela 4-3: Correspondência entre consumo de cimento, classe de resistência e relação água/cimento 46

Tabela 4-4: Classificação dos concretos de acordo com a porosidade e a absorção de água 54

Tabela 4-5: Classificação dos concretos de acordo com a VPU. 56

Tabela 4-6: Variáveis que influenciam a velocidade de onda ultrassônica no concreto. 58

Tabela 4-7: Condutividade térmica de alguns materiais de construção civil. 60

Tabela 4-8: Condutividade térmica do concreto de acordo com a ABNT NBR 15220:2005. 61

Tabela 5-1: Etapas experimentais e ensaios realizados. 63

Tabela 5-2: Aditivos incorporadores de ar utilizados e respectivas características... 64

Tabela 5-3: Granulometria do agregado miúdo: areia média 65

Tabela 5-4: Granulometria do agregado graúdo: brita 1 66

Tabela 5-5: Materiais utilizados na produção das pastas de cimento: aditivos A e B. 68

Tabela 5-6: Materiais utilizados na produção das pastas de cimento: aditivos C e D. 69

Tabela 5-7: Determinação das massas dos corpos de prova utilizadas nos cálculos de massa específica, absorção e índice de vazios das pastas de cimento no estado endurecido. 71

Tabela 5-8: Fórmulas utilizadas nos cálculos de massa específica, absorção e índice de vazios das pastas de cimento 72

Tabela 5-9: Características e grandezas utilizadas na dosagem do concreto referência: Traço 0. 75

Tabela 5-10: Traços em massa dos concretos com ar incorporado: Traços padrões I, II e III. 76

Tabela 5-11: Traços dos concretos com ar incorporado: Traços modificados IM, IIM e IIIM. 77

Tabela 5-12: Materiais utilizados na produção dos concretos: Traços referência, padrões e modificados. 77

Tabela 5-13: Quantidades e períodos de cura dos corpos de prova dos concretos produzidos. 78

Tabela 5-14: Ensaios realizados nos concretos no estado fresco. 79

Tabela 5-15: Ensaios realizados nos concretos no estado endurecido. 81

Tabela 5-16: Determinação das massas dos corpos de prova utilizadas nos cálculos de massa específica e absorção de água por imersão dos concretos. 82

Tabela 5-17: Fórmulas utilizadas nos cálculos de massa específica e absorção de água por imersão dos concretos 83

Tabela 5-18: Quantidades e idades dos corpos de prova de concreto utilizados nos ensaios de compressão e módulo de elasticidade. 84

Tabela 5-19: Parâmetros utilizados na aquisição das microtomografias dos concretos. 90

Tabela 6-1: Tamanhos e quantidades de bolhas de ar observadas nas amostras das pastas de cimento dos traços controle e IV: aditivos A e B. 98

Tabela 6-2: Tamanhos e quantidades de bolhas de ar observadas nas amostras das pastas de cimento dos traços controle, II, III, IV e V: aditivos A e B. 99

Tabela 6-3: Traços, consumos de cimento e teores de agregados e sólidos dos concretos. 102

Tabela 6-4: Resultados obtidos nos ensaios realizados nos concretos no estado fresco. 104

Tabela 6-5: Consumos de cimento e teores de agregados e ar dos concretos. 105

Tabela 6-6: Quantidade de poros existentes nas amostras dos concretos e acréscimos de quantidade em relação ao concreto referência. 109

Tabela 6-7: Quantidades e dimensões dos poros presentes nas amostras dos concretos. 110

Tabela 6-8: Quantidades, esfericidades e volumes dos poros presentes nas amostras dos concretos. 113

Tabela 6-9: Quantidades e diâmetros das bolhas de ar (0,95 ≤ Φ ≤ 1) incorporadas presentes nas amostras dos concretos. 116

Tabela 6-10: Volumes e concentrações dos poros esféricos (0,95 ≤ Φ ≤ 1) e não esféricos (Φ < 0,95) existentes nas amostras dos concretos. 117

Tabela 6-11: Volumes de concreto, vazios e argamassa das amostras (cilindros) de concreto analisadas e porosidade da argamassa. 118

Tabela 6-12: Resultados das massas específicas dos concretos no estado endurecido. 120

Tabela 6-13: Resultados de absorção de água por imersão dos concretos. 121

Tabela 6-14: Resultados: resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto referência. 123

Tabela 6-15: Resultados: resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos padrões..... 124

Tabela 6-16: Resultados: resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos modificados. 124

Tabela 6-17: Valores da resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos com respectivos desvios padrões e coeficientes de variação. 125

Tabela 6-18: Resultados da velocidade de propagação da onda ultrassônica nos concretos. 129

Tabela 6-19: Profundidades médias de carbonatação nos concretos. 132

Tabela 6-20: Resultados de condutividade térmica dos concretos. 134

Tabela 6-21: Síntese dos principais resultados. 134

SUMÁRIO

1 Introdução e Justificativa 18

2 Objetivos 22

2.1 Objetivo geral 22

2.2 Objetivos específicos 22

3 Concreto 23

3.1 Concreto leve 24

3.2 Concreto com ar incorporado 26

3.3 Durabilidade do concreto 29

4 Propriedades e Características do Concreto 40

4.1 Estado fresco 40

4.1.1 Teor de ar 40

4.1.2 Trabalhabilidade, coesão, segregação e exsudação 41

4.2 Estado endurecido 44

4.2.1 Resistência à compressão 44

4.2.2 Módulo de elasticidade 48

4.2.3 Porosidade e permeabilidade 53

4.2.4 Microestrutura 54

4.2.5 Velocidade de propagação da onda ultrassônica 56

4.2.6 Condutividade térmica 59

5 Materiais e procedimentos 62

5.1 Materiais utilizados 64

5.1.1 Aditivos incorporadores de ar 64

5.1.2 Cimento 64
5.1.3 Agregado miúdo 65
5.1.4 Agregado graúdo 66
5.2 Procedimentos 67
5.2.1 Etapa 1 - Eficiência na incorporação de ar dos aditivos 67
5.2.1.1 Produção das pastas de cimento 67
5.2.1.2 Massa específica no estado fresco 69
5.2.1.3 Moldagem dos corpos de prova 70
5.2.1.4 Massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios no estado endurecido 71
5.2.1.5 Análise microestrutural – microscopia óptica 72
5.2.2 Etapa 2 - Características físicas e mecânicas dos concretos 74
5.2.2.1 Dosagem e produção dos concretos 75
5.2.2.2 Moldagem e cura dos corpos de prova 78
5.2.2.3 Concreto no estado fresco 79
5.2.2.3.1 Consistência dos concretos 79
5.2.2.3.2 Massa específica 80
5.2.2.3.3 Teor de ar – método pressométrico 80
5.2.2.4 Concreto no estado endurecido 81
5.2.2.4.1 Massa específica e absorção de água por imersão 81
5.2.2.4.2 Compressão axial e módulo de elasticidade 83
5.2.2.4.3 Velocidade de propagação da onda ultrassônica 84
5.2.2.4.4 Profundidade de carbonatação – carbonatação acelerada 85
5.2.2.4.5 Condutividade térmica 87
5.2.2.4.6 Análise microestrutural – microct 88
6 Resultados e Discussão 93

6.1 Etapa 1 - Eficiência na incorporação de ar dos aditivos 93

6.1.1 Determinação da massa específica – estado fresco 93

6.1.2 Determinação da massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios – estado endurecido 94

6.1.3 Análise microestrutural – microscopia óptica 98

6.2 Etapa 2 - Características físicas e mecânicas dos concretos 102

6.2.1 Dosagem e produção dos concretos 102

6.2.2 Concreto no estado fresco 104

6.2.3 Concreto no estado endurecido 108

6.2.3.1 Análise microestrutural – microct 108

6.2.3.2 Massa específica e absorção de água por imersão 119

6.2.3.3 Resistência à compressão e módulo de elasticidade 123

6.2.3.4 Velocidade de propagação da onda ultrassônica 129

6.2.3.5 Carbonatação acelerada 132

6.2.3.6 Condutividade térmica 134

6.3 Síntese dos resultados 136

7 Conclusões 139

8 Referências 141

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A indústria da construção civil no Brasil, em plena expansão com o contínuo lançamento de novos empreendimentos, tem como preocupação principal a qualidade dos materiais utilizados. Desta forma, a engenharia civil necessita de inovações tecnológicas em sistemas e produtos, com características especiais e vantagens na sua utilização.

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil e, devido sua versatilidade de aplicação, são necessárias modificações que vão desde sua forma de produção e aplicação, até, principalmente, na sua composição, com o intuito de melhorar suas características. Não se pode mais considerar apenas estudos de concretos convencionais, o que tem motivado grandes avanços em suas características nas últimas décadas.

As inovações na área de tecnologia do concreto, incluindo desenvolvimento de aditivos e adições, métodos de dosagem, equipamentos de mistura e aplicação, dentre outras, resultaram no desenvolvimento de concretos especiais. Esses são considerados especiais por apresentarem características específicas, suprindo deficiências ou incorporando propriedades não usuais aos concretos convencionais, visando desempenho adequado à situações particulares de aplicação. O concreto de alta resistência (CAR), de alto desempenho (CAD), autoadensável (CAA), leve, com resíduos reciclados, projetado, colorido, branco, dentre outros, são exemplos desses concretos (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Como as características do concreto são provenientes das propriedades dos materiais que o constitui, o concreto leve, em especial, é obtido por meio de incorporação de vazios no concreto, diminuindo sua massa específica seja pela substituição dos agregados convencionais por agregados leves, pelo uso dos agregados sem finos ou pela incorporação de ar por meio de aditivos (SOBRAL, 1996; ROSSIGNOLO, 2003). Em decorrência dessa diminuição da massa específica há redução de esforços na estrutura, fazendo com que os concretos leves sejam utilizados com maior frequência pela construção civil nos últimos anos.

Uma das principais aplicações do concreto leve com ar incorporado é em processos construtivos compostos por painéis monolíticos moldados *in loco* em edificações

habitacionais de interesse social. Os aditivos incorporadores de ar produzem número elevado de pequenas bolhas de ar, estáveis, separadas entre si e distribuídas uniformemente na faixa de poucos micrômetros (µm). As bolhas de ar incorporado aumentam a porosidade do concreto e provocam efeitos em determinadas propriedades como a trabalhabilidade e a permeabilidade (WU et al., 2016). Demais propriedades desejáveis para o concreto, como resistência, estabilidade dimensional e durabilidade, são influenciadas tanto pela proporção da pasta do concreto como pela microestrutura que, por sua vez, depende das dimensões, quantidade e distribuição dessas bolhas (CHOI; YEON; YUN, 2016).

O ar incorporado é de extrema importância à qualidade final do concreto, sendo necessário obter um teor que não reduza significativamente sua resistência mecânica e que garanta sua durabilidade. As bolhas de ar não representam riscos à durabilidade se não estiverem conectadas. Dessa forma, por estarem isoladas não contribuem para o deslocamento de fluidos através do concreto. Assim, a permeabilidade, que consiste em um dos principais mecanismos de transporte de agentes agressivos no interior do concreto, não é aumentada (NEVILLE, 2016). No entanto, a durabilidade do concreto está diretamente ligada ao comportamento da rede de poros em seu interior, ou seja, a intercomunicabilidade da rede de poros pode indicar e definir a durabilidade do concreto. A continuidade dos poros na pasta de cimento endurecida em qualquer estágio durante o processo de hidratação do cimento determinará o coeficiente de permeabilidade do concreto. Os aditivos incorporadores de ar atuam como limitantes dessa continuidade de poros (AGNESINI, 1988).

Um processo de degradação das estruturas de concreto, ocasionado pelo transporte de agentes deletérios no seu interior e que pode limitar a vida útil das estruturas de concreto, diretamente relacionado à incorporação de ar, é a carbonatação (NEVILLE, 2016). Esta reduz a alcalinidade do concreto e altera as condições de estabilidade química da película passivante das armaduras, facilitando o início do processo corrosivo das mesmas. A carbonatação está relacionada à agressividade ambiental que as estruturas de concreto são submetidas, influenciando a durabilidade das estruturas e causando transtornos aos consumidores da construção civil.

É possível por meio da utilização de aditivos incorporadores de ar a obtenção de concretos com características especiais, tais como alta trabalhabilidade, baixa permeabilidade e alta resistência química e à abrasão (KHEDR; ABOU-ZEID; ABADIR, 2006). Entretanto, são necessárias mais pesquisas para determinar a influência do teor de ar incorporado na durabilidade do concreto (FIGUEIREDO; LIMA, 2010).

Pesquisas pioneiras sobre a incorporação de ar por meio de aditivos foram realizadas entre as décadas de 50 e 80 (WOODS, 1968; LEA, F. M., 1971 *apud* MEHTA; MONTEIRO, 2014). Desde então, poucos estudos foram desenvolvidos sobre as correlações existentes entre o volume de ar incorporado e as propriedades físicas e de durabilidade dos concretos com ar incorporado por meio de aditivos.

A partir de investigações de fatores como tempos de mistura e transporte, temperatura de descarga, tempo de vibração do concreto e tipos de agente incorporador de ar, é possível experimentalmente obter formas eficazes de controlar o teor de ar e assegurar o eficaz funcionamento do incorporador de ar (LIU et al., 2016).

O conhecimento da porosidade (forma, quantidade, distribuição e conectividade dos poros) dos concretos permite avaliar as interferências ocasionadas pela adição de aditivos incorporadores de ar em sua microestrutura e, consequentemente, em suas propriedades relacionadas à resistência e durabilidade. Uma alta concentração de vazios, com bolhas de ar próximas e ou comunicantes, além de provocar queda na resistência à compressão, pode facilitar o ingresso de agentes agressivos e ocasionar corrosão prematura de armadura em concretos leves com ar incorporado (ARAUJO et al., 2014).

O estudo da microestrutura do concreto permite o desenvolvimento de adições, proporções de misturas e técnicas de execução, visando minimizar tensões internas, retrações e consequentes fissuras indesejadas. A microtomografia computadorizada (MicroCT) constitui uma técnica de inspeção por raios X atualmente empregada para conhecimento e avaliação da microestrutura do concreto. Essa técnica permite obtenção de imagens tridimensionais com resoluções na ordem de mícrons, permitindo a inspeção e avaliação da morfologia interna de amostras de concreto (LU; PETERSON; CHERNOLOZ, 2016; CHUNG et al., 2016). Dessa forma, é

possível avaliar forma, quantidade e distribuição de bolhas de ar incorporadas no concreto por meio de aditivo.

Avaliar o comportamento do concreto por meio de suas características e propriedades e conhecer sua microestrutura, em função dos teores de ar incorporado às misturas, ao consumo de cimento e teores de agregados permite subsidiar estudos no intuito de otimizar o uso de aditivos para produção de concretos que atendam às especificações exigidas para determinadas aplicações.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência do teor de ar incorporado no desempenho de concretos com diferentes teores de agregados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito de aditivos incorporadores de ar comerciais em pastas de cimento;
- Determinar as propriedades termo-físico-mecânicas de concretos com diferentes teores de ar incorporado e de agregados;
- Avaliar a microestrutura de concretos com diferentes teores de ar incorporado e de agregados.

3 CONCRETO

Segundo a American Society for Testing and Materials (ASTM), o concreto é um material compósito que consiste de um meio aglomerante no qual estão aglutinadas partículas de diferentes naturezas. No concreto de cimento Portland:

- o aglomerante é o cimento em presença de água;
- o agregado é qualquer material granular (areia, pedregulho, rocha britada, seixos, escória de alto-forno, resíduos de construção e demolição etc.): se as partículas de agregado são maiores do que 4,75 mm, o agregado é considerado graúdo; se menores, o agregado é miúdo;
- os aditivos e adições são substâncias adicionadas ao concreto em seu estado fresco, alterando algumas propriedades, adequando-as às necessidades construtivas.

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil e, ao longo do tempo, transformações em suas características e propriedades são objetos constantes de pesquisas. Atualmente, o mercado exige concretos que apresentem características especiais e vantagens na sua utilização (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

As principais características que tornam o concreto um material de engenharia amplamente utilizado são: resistência à água, diversidade de formas e tamanhos de elementos estruturais obtidos devido sua consistência plástica, baixo custo e rápida disponibilidade para uma obra (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Para a engenharia, características desejáveis para o concreto como resistência, estabilidade dimensional e durabilidade, são influenciadas tanto pela proporção como pelas propriedades da pasta do concreto, tais como tipo, quantidade e distribuição de sólidos e vazios. Essas propriedades também são influenciadas pela microestrutura que, por sua vez, depende do tipo, tamanho, forma e distribuição dos seus constituintes. Desse modo, modificando a estrutura interna, modificam-se também as propriedades do concreto. Assim, é possível manipular constituintes do concreto visando obter, ou melhorar, determinadas propriedades, como trabalhabilidade, tempo de pega, densidade, resistência mecânica, acabamento e especialmente durabilidade.

Os aditivos ou adições representam, frequentemente, um quarto componente além do cimento, agregados e água utilizados imediatamente antes ou durante a mistura do concreto, com o intuito de promover alterações nas suas características ou propriedades. A importância do emprego dos aditivos na elaboração dos concretos faz com que a normativa internacional considere-os um dos componentes do concreto (MARTIN, 2005). A Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 11768:2011 define aditivos como:

> "... produtos que adicionados em pequena quantidade a concretos de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições".

A eficácia de um aditivo depende de sua dosagem no concreto e ele representa meio complementar para melhorar a qualidade do concreto e não a solução para corrigir formulações incorretas de concreto.

A incorporação de ar por meio de aditivo provoca significativas alterações nas características do concreto, que poderão influenciar significativamente na sua durabilidade, pois modifica algumas de suas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

3.1 CONCRETO LEVE

O concreto pode ser classificado quanto à massa específica em pesado, normal ou leve, sendo esse último ainda classificado em concreto poroso, com agregado sem finos e com agregado leve (ROSSIGNOLO, 2003).

Mehta e Monteiro (2014) classificaram o concreto, de acordo com a massa específica, em três grupos:

- Concreto de densidade normal – apresenta massa específica da ordem de 2400 kg/m³;
- Concreto leve – apresenta densidade abaixo de 1800 kg/m^3;
- Concreto pesado – apresenta massa específica maior que 3200 kg/m^3.

A Tabela 3-1 indica os valores de referência da massa específica para concretos leves segundo algumas normas internacionais.

Tabela 3-1: Valores de referência da massa específica dos concretos leves (ROSSIGNOLO, 2009).

Referência	Massa Específica (kg/m^3)
RILEM (1975)	$\gamma < 2000$
CEB-FIP (1977)	$\gamma < 2000$
NS 3473 E (1992)	$1200 < \gamma < 2000$
ACI 213-87 (1995)	$1400 < \gamma < 1850$
CEN prEN 205-25	$800 \leq \gamma \leq 2000$

No Brasil, de acordo com a norma técnica ABNT NBR 8953:2015, o concreto leve possui massa específica inferior a 2000 kg/m^3.

A redução da massa específica do concreto pode ser obtida substituindo parte dos materiais sólidos por ar e os valores de massas específicas dos concretos leves ficam em torno de 300 kg/m^3 a 1900 kg/m^3 (NEVILLE, 2016).

Segundo Sobral (1996) a única forma de se produzir concreto leve é incorporar ar à sua composição. Isso pode ser conseguido de três maneiras distintas:

- Eliminando as partículas mais finas da granulometria do agregado (concreto sem finos);
- Introduzindo grandes vazios no interior da massa de concreto (concreto aerado);
- Substituindo os agregados normais (areia e brita) por um agregado celular, oco ou poroso (concreto com agregados leves).

A substituição dos agregados do concreto por agregados leves, ou seja, agregados contendo grande proporção de vazios, tem sido objeto de inúmeros estudos para formulação de concretos leves. Agregados que possuem massa unitária menor do que 1120 Kg/m^3, geralmente são considerados leves e utilizados na produção de concretos leves (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Esses concretos são produzidos utilizando-se agregados como argilas, folhelhos, ardósias, escórias expandidas e cinza volante aglomerada (SOBRAL, 1996). O concreto leve pode ser classificado ainda quanto a sua aplicação, se é para função estrutural, de vedação ou de enchimento (NEVILLE, 2016).

Para utilizar concreto leve é necessário que as propriedades que serão solicitadas, durante o seu uso, não sejam comprometidas e que, com o alcance delas, outras

não sejam afetadas. Para tanto, são necessários estudos para analisar e verificar vantagens e desvantagens do concreto leve que pode ser utilizado nas mais diferentes obras. A importância desses estudos decorre de vários fatores, como por exemplo, ambientais, nos quais a reciclagem de resíduos, na forma de materiais e componentes para a construção civil, pode gerar benefícios à sociedade, como redução de custo da construção, de consumo de energia na produção de materiais e da emissão de poluentes, assim como a diminuição no consumo de matérias-primas. Dentre as vantagens do uso do concreto leve destacam-se: redução de esforços na estrutura devido ao carregamento permanente, redução das cargas transmitidas às fundações, redução dos custos com transporte, içamento e montagem de edificações pré-fabricadas, produção de elementos estruturais com seções transversais menores, propriedades térmicas diferenciadas, menor solicitação da estrutura e economia de aço decorrente da diminuição dos esforços (MARTINS et al., 2003).

O comportamento do concreto leve não está relacionado somente com a massa específica, mas também com a resistência mecânica e a durabilidade, que são importantes para sua qualidade (NEWMAN; CHOO, 2003; ROSSIGNOLO, 2003).

O fato de que quanto mais leve for um concreto menor será sua resistência torna necessário encontrar um equilíbrio entre a redução da massa específica e perda de resistência. Por isso, o concreto leve é geralmente aplicado em locais ou peças que não sejam muito solicitadas estruturalmente. Entretanto, sua utilização pode ser observada em estruturas como pontes, plataformas, pré-moldados, na constituição de pavimentos, barragens e em diversos outros empreendimentos (GIACOMIN, 2005; SANTIAGO, 2008; ROSSIGNOLO, 2009). Atualmente, concretos leves estruturais têm sido amplamente utilizados na execução de habitações de interesse social produzidas segundo o sistema construtivo de painéis monolíticos moldados *in loco*. Dentre os materiais utilizados na obtenção de concretos leves, destacam-se os aditivos incorporadores de ar.

3.2 CONCRETO COM AR INCORPORADO

Concretos convencionais contêm em seu interior, mesmo sem uso de aditivos incorporadores de ar, teores entre 1% e 3% de seu volume na forma de ar

aprisionado. Nos casos de concretos produzidos em centrais e transportados por caminhões betoneira este percentual pode chegar à ordem de 4%. No entanto, esse ar aprisionado consiste em cavidades microscópicas de formas irregulares, absolutamente ineficazes se comparadas com o ar incorporado sob a forma de microbolhas esféricas de diâmetros entre 100 µm e 500µm (AGNESINI, 1988).

O uso de ar incorporado por meio de aditivos foi descoberto acidentalmente e utilizado como artifício para se obter um concreto mais durável frente aos efeitos do gelo e degelo (NEVILLE, 2016). A dimensão, o espaçamento e número de microbolhas dispersas no concreto são parâmetros que regulam a resistência do concreto ao gelo. Os aditivos incorporadores de ar reduzem a tensão superficial da água, favorecendo a formação de pequenas bolhas esféricas, e evitam coalescência de bolhas dispersas (MEHTA; MONTEIRO, 2014) (Figura 3-1).

O ar é deliberadamente incorporado produzindo um número elevado de bolhas de ar, quase esféricas, estáveis, separadas entre si e distribuídas uniformemente (MARTIN, 2005).

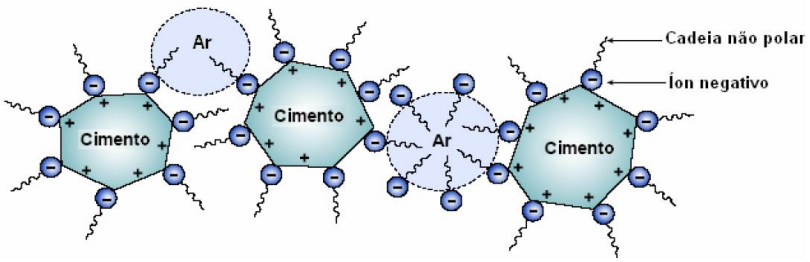

Figura 3-1: Mecanismo de incorporação de ar (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Na solidificação da água no concreto (congelamento), o aumento de seu volume provoca um acréscimo na pressão da água não congelada, resultando em microfissuras na pasta cimentícia. As microbolhas de ar próximas aos poros capilares onde se encontra a água que está congelando, alivia essa pressão hidráulica devido ao transporte da água dos poros capilares para as microbolhas, evitando a formação das microfissuras. O teor adequado de aditivo incorporador de ar em concretos porosos favorece a compactação e uniformização da mistura, melhorando a durabilidade do concreto frente às ações de congelamento e descongelamento (WU et al., 2016).

A Figura 3-2 mostra os diferentes tipos de poros existentes no concreto com ar incorporado.

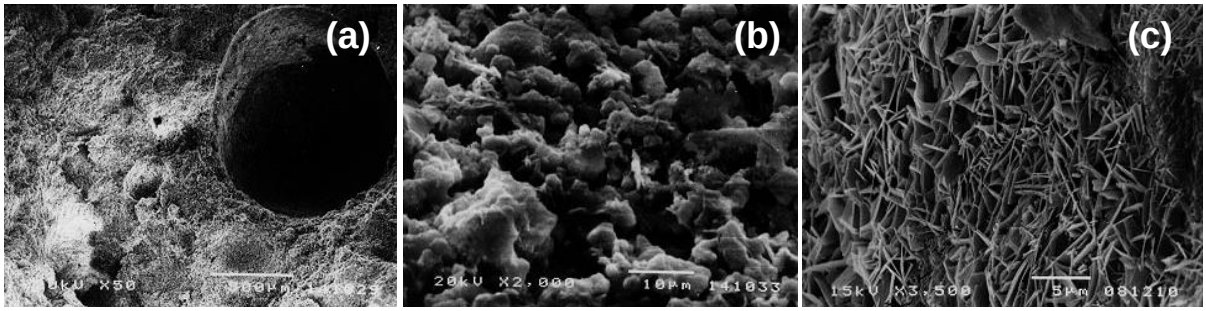

Figura 3-2: Sistema de poros no concreto com ar incorporado: ar incorporado (a); ar aprisionado (b); poros capilares (c) (NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000).

Concretos com ar incorporado apresentam macroporos, com diâmetros maiores que 50nm, poros capilares ou microporos com diâmetros menores que 2nm, e mesoporos com diâmetros entre 2 nm e 50 nm (SCHOBER, 2011; KREFT et al., 2011). Segundo Mehta e Monteiro (2014) as bolhas de ar incorporado possuem dimensões entre 100 µm e 1 mm de diâmetro, enquanto os vazios de ar aprisionado são maiores, ficando entre 1 mm e 10 mm. Araujo et al. (2014) evidenciaram em seus estudos com concretos leves com ar incorporado maioria de bolhas de ar incorporadas com diâmetros até 300 µm e concentração maior de bolhas de ar com diâmetros entre 40 e 140 µm. Os autores relataram também não ter havido distribuição uniforme de bolhas no concreto e ainda a ocorrência de conectividade e união entre bolhas.

Silva N. et al. (2009), a partir de análises de imagens da microestrutura de argamassa com aditivo incorporador de ar obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura, observaram que a quantidade de micro bolhas de ar cresce com o aumento do teor de vazios. Os autores destacam que o volume de ar incorporado depende principalmente da quantidade de aditivo incorporador de ar. Entretanto, Agnesini (1988) e Neville (2016) relataram que a quantidade de ar incorporado por meio de aditivos não é proporcional ao teor de aditivo a partir de um determinado momento, ou seja, uma maior dosagem não incorporará mais ar ao concreto. Agnesini (1988) destacou ainda que quanto maior o teor de aditivo empregado, menores serão os diâmetros das bolhas de ar e as distâncias entre elas.

Existe uma variedade de aditivos incorporadores de ar, normalmente, consistindo de sais de resina de madeira, materiais proteicos, ácidos graxos e alguns detergentes sintéticos. Substâncias como azeite, ácido oleico e peróxido de hidrogênio também podem ser utilizados como aditivos incorporadores de ar (GIRIDHAR; PRATHAP KUMAR; PRAVEEN KUMAR, 2013). Aditivos incorporadores de ar de composições químicas semelhantes, mas de fontes distintas, podem apresentar diferentes desempenhos nas misturas (BARFIELD; GHAFOORI, 2012; LAZNIEWSKA-PIEKARCZYK, 2013).

Outras motivações que levam à incorporação de ar aos concretos são a obtenção de massa específica menor, o isolamento térmico ou absorção acústica (NEVILLE, 2016). A incorporação de ar resulta em diminuição da resistência à compressão dos concretos, apesar de proporcionar melhor trabalhabilidade (AÏTCIN, 2000; BARFIELD; GHAFOORI, 2012; NEVILLE; BROOKS, 2013; ARAUJO et al., 2014).

Relações entre valores de massa específica, teor de ar e resistência à compressão de concretos são mostrados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2: Relação: massa específica, teor de ar e resistência à compressão. (NEVILLE, 2016)

Massa específica (kg/m^3)	500,00	900,00	1300,00	1700,00
Teor de ar (%)	78	62	45	28
Resistência à compressão (MPa)	1,0	2,0	5,0	10,0

3.3 DURABILIDADE DO CONCRETO

Dentre as qualidades que tornam o concreto o material mais utilizado no mundo é sua reconhecida durabilidade que está diretamente relacionada às suas características e às de seus constituintes.

O concreto será considerado durável quando capaz de resistir por muitos anos às condições para as quais foi projetado sem deteriorar-se, ou seja, deve suportar o processo de deterioração ao qual se supõe que venha a ser submetido (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2014).

A Norma Brasileira ABNT NBR 6118:2014 aborda a durabilidade da estrutura e trata de algumas diretrizes para a durabilidade e qualidade das estruturas de concreto e conceitua durabilidade como sendo a:

> "... capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração dos projetos".

Nos últimos anos, além da preocupação com a resistência do concreto, a durabilidade também tem sido enfoque de engenheiros e projetistas. Atualmente, não só no Brasil, mas em todo o mundo, a falta de durabilidade das estruturas de concreto tem ocasionado desconforto e transtornos aos consumidores da construção civil, sejam públicos ou privados. Com alguns anos de vida, edifícios residenciais e comerciais, de pequeno e grande porte e obras de arte (pontes, viadutos, túneis, etc.) podem apresentar manifestações patológicas relacionadas com uma ou mais formas de deterioração do concreto. O problema não é relativo às patologias em si, pois elas são inevitáveis com o envelhecimento das estruturas, mas à idade em que estão surgindo (ANDRADE, 2005).

A durabilidade do concreto é afetada por diversos fatores e situações, desde seus materiais constituintes até o meio ambiente em que está inserido. Inevitavelmente, a estrutura de concreto perderá a durabilidade ao longo do tempo pela forte interação existente com o meio ambiente.

A classificação de agressividade ambiental da Norma Brasileira ABNT NBR 6118:2014 define os requisitos mínimos que o concreto necessita para garantir boa durabilidade, referentes à relação água/cimento e a resistência à compressão do concreto (Tabelas 3-3 e 3-4). A agressividade ambiental está relacionada às ações físicas e químicas deletérias ao concreto, não estando relacionada às ações mecânicas, aos efeitos da temperatura e a retrações hidráulicas.

Tabela 3-3: Classes de agressividade ambiental (ABNT NBR 6118:2014).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana[1),2)]	Pequeno

III	Forte	Marinha[1)]	Grande
		Industrial[1),2)]	
IV	Muito forte	Industrial[1),3)]	Elevado
		Respingo de maré	

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

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

[3)] Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Tabela 3-4: Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto. (ABNT NBR 6118:2014)

Concreto	**Tipo**	**Classe de agressividade**			
		I	II	III	IV
Relação água/aglomerante em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

Notas:
1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655
2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado
3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido

A recomendação técnica do American Concrete Institute (ACI), ACI 201.2R:2001, especificamente para o material concreto, conceitua como durável aquele que possui capacidade de resistir ao intemperismo, ataque químico, desgaste por abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, retendo sua forma original, qualidade e capacidade de utilização, quando exposto ao ambiente de trabalho.

O conhecimento da influência do ar incorporado nas propriedades do concreto, bem como os possíveis processos de deterioração, permite direcionar com maior

segurança suas diversas aplicações. Propriedades como porosidade e permeabilidade, que estão intrinsecamente relacionadas entre si, são diretamente afetadas pela incorporação de ar.

PROCESSOS DE DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

O conhecimento dos principais mecanismos de deterioração do concreto pode auxiliar no diagnóstico da maior parte dos problemas patológicos das estruturas. As causas da deterioração do concreto são consequências da ação de agentes naturais com os quais ele interage, provocando seu envelhecimento, isto é, a perda progressiva de desempenho estético, funcional ou estrutural.

A umidade relativa, orientação de chuvas e ventos, concentrações de substâncias nele presentes, temperatura, além das características dos materiais constituintes do concreto e de seus poros, são fatores importantes na interação entre meio ambiente e concreto (NEPOMUCENO, 2005). A água está sempre envolvida no processo de deterioração do concreto, em quase todos os mecanismos de sua degradação.

As causas da deterioração do concreto, induzidas por vários agentes, envolvem diversas ações mecânicas, físicas, químicas, físico-químicas e até biológicas. Essas atuam principalmente em meios agressivos de forma simultânea e progressiva, influenciando na sinergia de cada mecanismo e tornando difícil a determinação da contribuição das diversas causas atuantes (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O comportamento mecânico do concreto traduz seu estado de deterioração por reações ocasionadas pelo tipo de solicitação, velocidade, duração e intensidade do carregamento da estrutura, relação água/cimento, idade do concreto, aditivos incorporados, entre outros. Em concretos com ar incorporado, o volume de ar incorporado representa uma fração significativa do volume total da pasta cimentícia, o que influencia, consideravelmente, a resistência mecânica do concreto.

A deterioração do concreto por reações físicas é ocasionada principalmente devido aos efeitos do desgaste superficial do concreto, a cristalização de sais em seu interior, ao congelamento e degelo e ainda à exposição ao fogo. Os concretos com ar incorporado, que são mais porosos, em contato com soluções de alta concentração salina estão sujeitos à ação física da cristalização dos sais.

As diversas manifestações patológicas que ocorrem em estruturas de concreto estão relacionadas com uma ou mais formas de deterioração do concreto (Tabela 3-5).

Tabela 3-5: Resumo das principais origens e causas da deterioração do concreto (ANDRADE, 2005).

Origem da Deterioração	Causa			Sintoma
Mecânica	Sobrecarga			Fissuração
	Impacto			
	Cargas cíclicas			
	Restrição à variação de volumes sob gradientes normais de temperatura e umidade			
Física	Desgaste superficial	Atrito	Abrasão	Desgaste superficial
			Erosão	
		Cavitação		
	Cristalização de sais			Fissuração
				Escamamento
	Congelamento e degelo			Expansão
				Fissuração
				Escamamento
	Fogo			Fissuração
				Lascamento
				Desidratação da pasta
Química	Lixiviação			Dissolução Decomposição química
	Troca iônica	Ação dos sais		
		Ação dos ácidos		
	Formação de compostos expansivos	Sulfatos de sódio, potássio, cálcio e magnésio		Expansão
				Fissuração
				Decomposição química
		Reação álcali-agregado		Expansão
		Hidratação MgO e CaO		Fissuração
	Corrosão da armadura			Expansão
				Fissuração
	Biológica			Dissolução

Com relação à deterioração causada pelo congelamento e degelo, esta ocorre exclusivamente em países de clima frio. A aplicação mais importante de aditivos incorporadores de ar é em misturas de concretos dosados para resistir a esses ciclos de congelamento e descongelamento. O que ocorre é o congelamento da água presente nos poros capilares do concreto, aumentando o seu volume em 9% (ANDRADE, 2005). Se não houver espaço suficiente para acomodar esse volume, as paredes dos poros capilares sofrerão tensões de tração e, consequentemente, expansão ocasionadas pela água. No congelamento quando há a expansão da água, espera-se que o excesso de água consiga escapar para os vazios ocupados com o ar, princípio no qual se baseia a incorporação de ar (NEVILLE, 2016).

Em situações contrárias ao congelamento, o concreto sob a ação de temperaturas elevadas perde progressivamente seu desempenho mecânico, devido a uma série de transformações químicas e físicas em seu interior. Durante o aquecimento do concreto, ocorre a vaporização gradativa da água livre dos poros capilares maiores e, em seguida, da água adsorvida, existente nos poros do gel. O vapor d'água formado nos poros não consegue migrar e sair do concreto com a mesma velocidade com que foram formados, ocasionando pressões internas. Essas pressões são proporcionais à taxa de aquecimento e à umidade do concreto, e inversamente proporcional à permeabilidade da pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Ambientes com agressividade química também representam importantes causas de deterioração do concreto. A ação desses ambientes pode se apresentar de diversas formas, como, por exemplo, pela deterioração do concreto por ataque ácido, ataque alcalino, ataque por cloretos, lixiviação, carbonatação, dentre outros (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os concretos, independentemente de sua composição, expostos a soluções ácidas fortes ou compostos que possam dar origem a ácidos fortes, com pH igual ou menor que 3, sofrerão severa deterioração (ANDRADE, 2005). Sabe-se que os concretos de cimento Portland não têm boa resistência à ação dos ácidos, devido a alcalinidade de sua pasta.

A deterioração química do concreto é causada pela reação química direta dos agentes externos com os constituintes da pasta de cimento, mas pode ocorrer deterioração química internamente ao concreto. As substâncias agressivas

penetram através da rede de poros da microestrutura do concreto e têm como forças impulsoras as diferenças de concentração, pressão, temperatura, densidade, potencial elétrico e a sucção capilar (NEPOMUCENO, 2005). Nestas condições, a impermeabilidade do concreto, além da estanqueidade da estrutura, tornam-se fatores determinantes da durabilidade.

Os ataques químicos ao concreto se manifestam por meio de efeitos físicos nocivos (diminuição da resistência, fissuração e lascamento, aumento da porosidade e permeabilidade). A melhor forma de se amenizar a intensidade de uma agressão química ao concreto é diminuir a porosidade e permeabilidade do mesmo, a fim de se reduzir a velocidade da penetração de agentes agressivos (AÏTCIN, 2000).

A maioria dos problemas de durabilidade mais comuns em estruturas não geraria consequências nocivas sobre o concreto se este tivesse baixíssima porosidade quando exposto a um ambiente agressivo e mantivesse esta baixa permeabilidade ao longo de sua vida útil (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A utilização de aditivo incorporador de ar em concretos com agregados leves não interfere significativamente na sorvidade do concreto após 90 dias. E, o aumento da permeabilidade aos íons cloreto está mais relacionada à rede de poros da pasta de cimento do que os poros dos agregados (LO et al., 2006).

A incorporação de ar por meio de bolhas não conectadas entre si, apesar de aumentar a porosidade, diminui a permeabilidade, o que não inviabiliza o emprego de concretos com ar incorporado em ambientes agressivos.

Os processos químicos e físicos de deterioração podem ocorrer simultaneamente no concreto, podendo um processo até desencadear o outro. Mehta e Gerwick (1982) agruparam as causas físicas e químicas da deterioração do concreto que podem ser observadas nas Figuras 3-3 e 3-4.

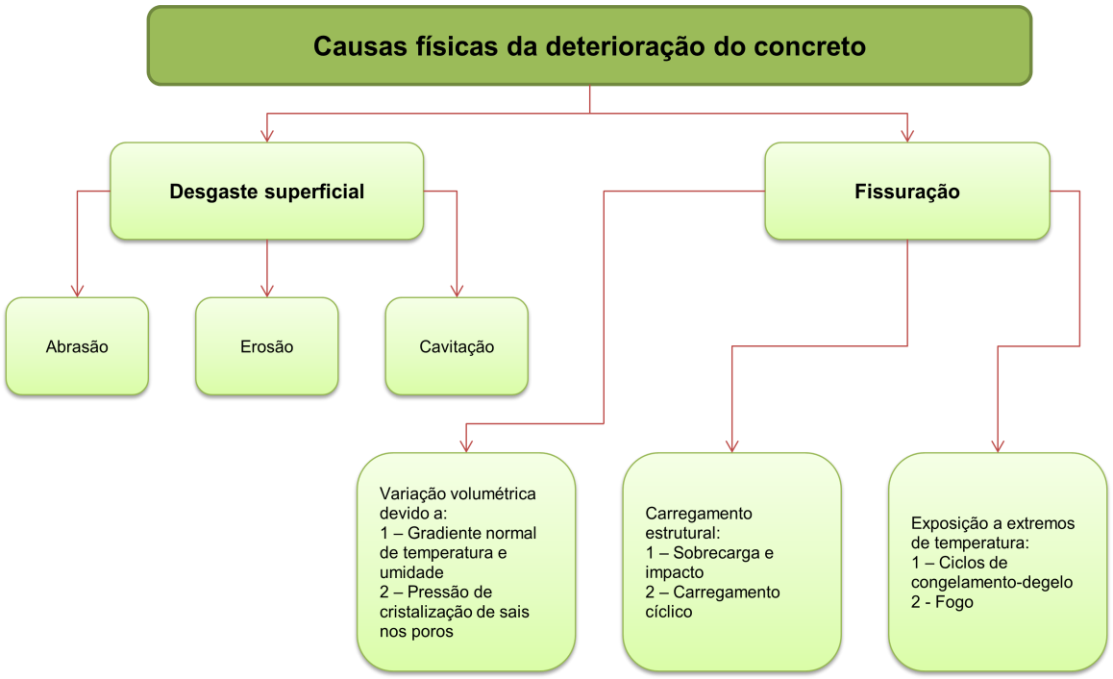

Figura 3-3: Causas físicas da deterioração do concreto (MEHTA; GERWICK, 1982).

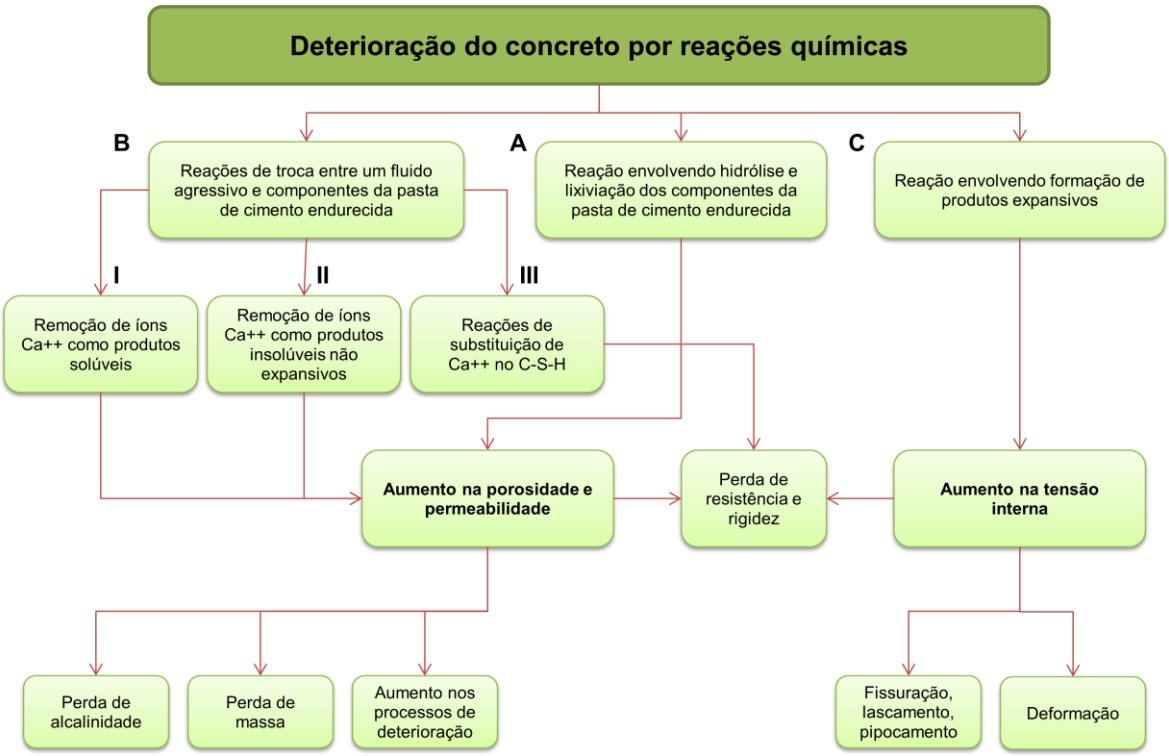

Figura 3-4: Causas químicas da deterioração do concreto (MEHTA; GERWICK, 1982).

CARBONATAÇÃO

O fenômeno da carbonatação do concreto está intimamente relacionado ao desenvolvimento das cidades, devido ao aumento da emissão de gás carbônico, seja pela instalação de grandes indústrias ou pelo aumento da frota de veículos. A carbonatação acontece naturalmente nas estruturas de concreto, exigindo apenas certa concentração de CO_2 no ar ambiente e uma variação de umidade, para que o gás penetre, produzindo reações de neutralização do concreto e, posteriormente, despassivação das armaduras.

Na atmosfera, os principais constituintes presentes que podem produzir reações de neutralização do concreto são o gás carbônico (CO_2), o dióxido de enxofre (SO_2) e o gás sulfídrico (H_2S). Esse processo de neutralização, devido à maior incidência de CO_2 nas reações, recebe o nome de carbonatação e tem-se como resultado a redução do pH do concreto a valores próximos a 9 (NEVILLE, 2016). As reações de carbonatação no concreto ocorrem entre o CO_2 e os produtos resultantes da hidratação do cimento, principalmente o hidróxido de cálcio que reage com o CO_2, resultando na formação do carbonato de cálcio ($Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$). Assim, a reserva alcalina decorrente da quantidade de cimento no concreto, constitui importante fator na velocidade de carbonatação (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007).

A carbonatação se dá a partir da superfície, sendo formada uma frente de carbonatação separando duas zonas de pH muito distintas: uma com pH superior a 12 e outra com pH próximo a 8 (FIGUEIREDO, 2005). A penetração do CO_2 no concreto causa despassivação da armadura, permitindo que tenha início o processo de corrosão da mesma. Daí a importância de se conhecer a profundidade de carbonatação e, em especial, saber se a armadura foi alcançada pela frente de carbonatação. Em concretos leves com ar incorporado, as armaduras podem apresentar diferenças significativas nos níveis de passivação e corrosão em relação aos concretos convencionais (ARAUJO et al., 2014).

A difusividade, que é uma função do sistema de poros da pasta enquanto ocorre a difusão do CO_2, consiste no principal fator de controle da carbonatação. O CO_2 difunde através de poros preenchidos com água ou com ar, sendo que o processo de difusão no ar é de 10^4 a 10^5 vezes mais rápido que na água. Outros fatores

relevantes na carbonatação são o tipo de cimento, relação água/cimento e grau de hidratação (NEVILLE, 2016). Em concretos mais porosos há tendência de crescimento mais rápido da frente de carbonatação, ou seja, maior velocidade da frente de carbonatação em decorrência de maior facilidade de acesso de CO_2 (MEIRA; PADARATZ; BORBA JÚNIOR, 2006). Assim, a velocidade da frente de carbonatação no concreto depende além das suas condições de umidade, principalmente da estrutura da sua rede de poros (BAKKER, 1988). A variação do consumo de cimento, isoladamente, não influencia a velocidade de carbonatação em concretos e argamassas com relação água/cimento fixa (MITRE; BARBOSA; HELENE, 2002).

O coeficiente de carbonatação (k) do concreto pode ser determinado pela razão entre a profundidade de carbonatação (D) e a raiz quadrada do tempo (t) de exposição ao CO_2 (Figura 3-5). Entretanto, só pode ser aplicada a condições de exposição uniformes (NEVILLE, 2016).

$$k = D / \sqrt{t}$$

k = coeficiente de carbonatação (mm/ano^{0,5})
D = profundidade de carbonatação (mm)
t = tempo de exposição (anos)

Figura 3-5: Coeficiente de carbonatação do concreto (NEVILLE, 2016).

Em concretos com ar incorporado é possível, a partir da profundidade de penetração de CO2 e da determinação dos coeficientes de carbonatação, avaliar o desempenho que cada teor de ar proporciona ao concreto e compará-los entre si, verificando sua viabilidade de aplicação.

O estudo do comportamento do concreto ante a carbonatação compreende ensaios acelerados, implicando em baixos custos de execução e rápida coleta de dados (PAULETTI; POSSAN; DAL MOLIN, 2007*)*. No Brasil, assim como em outros países, ensaios de carbonatação acelerada realizados em câmaras especiais são amplamente utilizados para avaliação da frente de carbonatação em concretos. Parâmetros como concentração de CO_2, temperatura e umidade interna (câmara), umidade interna do corpo de prova e formato dos corpos de prova interferem esses ensaios acelerados. Nessas câmaras de carbonatação é possível realizar simultaneamente ensaios acelerados de carbonatação e penetração de íons cloreto

(GHAHARI et al., 2016). A umidade adequada para aceleração da reação de carbonatação em concretos está compreendida entre 50% e 80% de umidade relativa (SILVA, F. et al., 2009; NEVILLE, 2016).

A comprovação ou não de áreas carbonatadas mais corrente utilizada é por meio de indicadores de pH à base de fenolftaleína ou timolftaleina. Trata-se de método colorimétrico simples e comum para determinar a extensão da carbonatação, consistindo em aspergir na superfície do concreto uma solução de um dos indicadores (BUCHER, 1989; NEVILLE, 2016). Este método é limitado, pois nem todos os concretos carbonatam a uma mesma velocidade, considerando que esta depende da difusividade do CO_2 que está relacionada a diversas variáveis tais como consumo e tipo de cimento, porosidade, umidade relativa, relação a/c entre outras (NEVILLE, 2016).

O conhecimento dos parâmetros que afetam o avanço da frente de carbonatação permitirá a definição de traços com melhor capacidade de prover o concreto de durabilidade adequada (CASTRO; SANJUÁN; GENESCÁ, 2000).

4 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO

4.1 ESTADO FRESCO

Algumas características responsáveis pela qualidade final do concreto devem ser verificadas antes de seu processo de endurecimento, ou seja, no estado fresco. O teor de ar, a trabalhabilidade, a coesão, a segregação e a exsudação são algumas das características que podem atestar a qualidade do concreto no estado fresco. Essas características do concreto fresco devem ser observadas, pois os resultados isolados de resistência à compressão não são suficientes para garantir um bom desempenho do concreto, devendo ser também verificados outros fatores, que vão desde a dosagem adequada do concreto até a sua cura.

4.1.1 Teor de ar

O controle do teor de ar é fundamental no controle da qualidade do concreto, quer seja para verificar limites máximos e mínimos desejáveis de ar incorporado, ou para identificar teores de vazios de ar no concreto.

No Brasil, os procedimentos para determinação do teor de ar do concreto fresco pelo método gravimétrico são descritos pela norma técnica ABNT NBR 9833:2008 e pelo método pressométrico, a ABNT NBR NM 47:2003. Estudos comparativos de métodos de determinação de teor de ar em argamassas mostraram que os métodos gravimétrico e pressométrico não consideram a absorção dos agregados (SCHANKOSKI et al., 2012).

O medidor de ar do tipo pressométrico é o equipamento utilizado para realização do ensaio de medição do ar incorporado no concreto, o qual consiste de um recipiente hermeticamente fechado, que é preenchido com concreto fresco (Figura 4-1). Através de orifícios, é injetada a água no recipiente fechado, de forma a expulsar o ar do concreto. Na saída do ar, manômetros detectam o teor liberado e indicam o percentual de ar na mistura. É importante ressaltar que ao teor de ar medido refere-se a todo ar presente no concreto, ou seja, a soma do ar aprisionado e o ar incorporado.

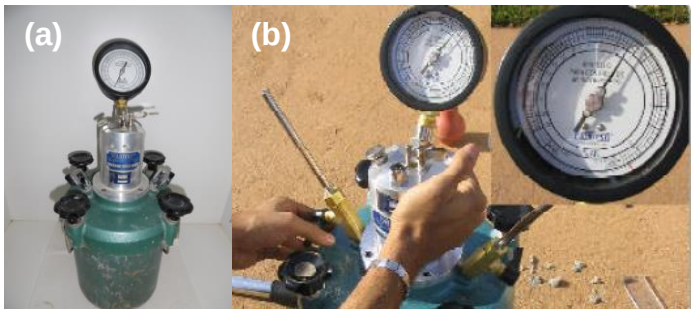

Figura 4-1: Aparelho medidor do teor de ar (a) e leitura do teor de ar (b).

4.1.2 Trabalhabilidade, coesão, segregação e exsudação

A trabalhabilidade adequada em cada situação de concretagem é fundamental para a obtenção de um produto final de qualidade. Essa propriedade consiste na facilidade e homogeneidade com a qual o concreto recém obtido pode ser misturado, lançado, adensado e acabado (ACI 116R-90, 1994).

A obtenção de um concreto com trabalhabilidade adequada não depende unicamente da quantidade de água utilizada, mas sim de seleção e proporção adequada dos materiais e, muitas vezes, do uso de adições e aditivos. Os teores de pasta, de argamassa e de agregados devem ser compatibilizados, em função da trabalhabilidade desejada. Isto se consegue mediante o conhecimento das características de cada componente e de sua proporção correta na mistura.

Ainda não há ensaio aceitável que determine diretamente a trabalhabilidade do concreto (NEVILLE, 2016). No entanto, inúmeras tentativas têm sido feitas para correlacionar a trabalhabilidade com alguma grandeza física fácil de ser determinada.

Dentre os ensaios mais utilizados que indicam indiretamente a trabalhabilidade dos concretos convencionais e bombeados, destaca-se o ensaio de abatimento do tronco de cone (Slump Test). Este ensaio mede a consistência e a fluidez do material, permitindo o controle da uniformidade do concreto. No Brasil este ensaio é regulamentado pela ABNT NBR – NM 67:1998. Misturas com consistência rija têm abatimento zero, de modo que não se consegue, nesses casos, observar variações de trabalhabilidade. Já misturas ricas, como as comumente utilizadas nos concretos para a construção civil, podem ser aferidas satisfatoriamente com este ensaio.

Alguns ensaios adequados para diferentes trabalhabilidades de misturas e a relação entre trabalhabilidade e grandeza de abatimento são mostrados nas Tabelas 4-1 e 4-2 respectivamente.

Tabela 4-1: Métodos adequados para avaliação de trabalhabilidades de misturas.

Método	Normas	Trabalhabilidade
Ensaio de Abatimento	NBR NM 67 (1998) ASTM C 143-90a BS 1881: Parte 102: 1983	Média e alta
Ensaio do Fator de Adensamento	BS 1881: Parte 103: 1983 ACI 211.3-75	Baixa, média e alta
Ensaio Vebe	BS 1881: Parte 104: 1983 ACI 211.3-75	Muito baixa e baixa
Ensaio de Espalhamento	NBR NM 68 (ABNT, 1998c) BS 1881: Parte 105: 1984	Muito alta

Tabela 4-2: Relação entre trabalhabilidade e abatimento (NEVILLE, 2016).

Trabalhabilidade	Abatimento (mm)
Abatimento zero	0
Muito baixa	5 a 10
Baixa	15 a 30
Média	15 a 75
Alta	80 a 155
Muito Alta	160 ao desmoronamento

O ar incorporado no concreto melhora sua trabalhabilidade, influenciando a consistência da mistura, tornando-a mais plástica, facilitando seu lançamento e adensamento. Isto ocorre, provavelmente, devido as bolhas de ar esféricas se comportarem como agregado miúdo, com atrito superficial muito baixo e grande elasticidade.

Além da melhoria na trabalhabilidade do concreto, a incorporação de ar passou a ser adotada também para diminuição do fator água/cimento e diminuição da permeabilidade. Entretanto, o concreto com ar incorporado, menos permeável, em traços mais resistentes requer consumo maior de cimento, o que pode levar a

fissuração generalizada e, por consequência, aumento da permeabilidade causando deterioração da estrutura. Em traços muito pobres, com consumo de cimento abaixo de 150 kg/m³, dependendo da granulometria dos agregados, é imprescindível a incorporação de ar com o intuito de se obter melhor consistência, compensando a falta de finos destes traços. Sendo assim, concretos pobres poucos trabalháveis e concretos médios a ricos ou com trabalhabilidade adequada, requerem estabelecimento de critérios objetivos para a utilização do ar incorporado. A utilização deste artifício pode trazer prejuízos à resistência de alguns traços de concreto e, consequentemente, necessidade de aumento de consumo de cimento, com prejuízos técnicos e econômicos.

A noção de trabalhabilidade é muito mais subjetiva que física e seu componente físico mais importante é a consistência, termo que, aplicado ao concreto, traduz propriedades intrínsecas da mistura fresca. Essas propriedades estão relacionadas com a mobilidade da massa e a coesão entre os elementos componentes, tendo em vista a uniformidade e a compacidade do concreto, além do bom rendimento durante a execução da estrutura (NEVILLE, 2016).

Outra propriedade do concreto no estado fresco relacionada à trabalhabilidade é a coesão, que representa sua homogeneização, sem separação de materiais da mistura em todas as fases de sua utilização, quer seja na produção, no transporte, no lançamento, ou mesmo, no seu adensamento. A falta de coesão da mistura pode acarretar a desagregação do concreto no estado fresco, alterando sua composição física e sua homogeneidade. O concreto ideal é aquele que apresenta coesão e trabalhabilidade adequadas à sua aplicação. A coesão depende muito da proporção de partículas finas na mistura.

A incorporação de ar faz com que a mistura se comporte como se tivesse excesso de areia (agregado miúdo) tornando-a mais coesiva (NEVILLE, 2016). Muitas vezes é necessário fazer várias misturas experimentais com diferentes proporções entre agregados graúdos e miúdos para se encontrar uma mistura com coesão adequada.

Além da trabalhabilidade e coesão, o concreto apresenta no estado fresco as características de segregação e exsudação. A segregação é definida como sendo a separação dos componentes do concreto fresco de tal forma que sua distribuição não seja mais uniforme. A exsudação é uma forma particular de segregação, em que

a água da mistura tende elevar-se à superfície do concreto recentemente lançado. Esse fenômeno é provocado pela impossibilidade dos constituintes sólidos fixarem toda a água da mistura e depende, principalmente, das propriedades do cimento. A exsudação causa também o enfraquecimento da aderência pasta-agregado (zona de transição), aumento da permeabilidade do concreto e, se a água for impedida de evaporar, pela camada que lhe é superposta, poderá resultar em uma camada de concreto fraca, porosa e de baixa resistência ao desgaste (NEVILLE, 2016).

O ar incorporado na mistura do concreto reduz a exsudação, pois as bolhas de ar mantêm as partículas em suspensão, de modo a diminuir a sedimentação e evitar que a água seja expelida. A segregação também é reduzida pela incorporação de ar durante o manuseio e o transporte, devido ao aumento da coesão (NEVILLE; BROOKS, 2013). No entanto, as bolhas de ar podem ser expelidas havendo excesso de vibração, ocasionando a segregação do concreto.

Combinações de consistência inadequada com agregados de massa específica muito alta ou muito baixa, pouca quantidade de partículas finas e métodos inadequados de transporte, lançamento e adensamento são as principais causas da segregação e exsudação do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A segregação e exsudação podem ser reduzidas ou eliminadas por meio de controle maior da dosagem e de métodos mais eficientes e bem executados de lançamento e adensamento do concreto.

4.2 ESTADO ENDURECIDO

As propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido são a base para que seja dimensionada uma estrutura de concreto armado. Essas propriedades são verificadas e avaliadas por meio de experimentos em laboratórios reproduzindo o mais fielmente possível as condições de serviço, desde a natureza e duração das cargas aplicadas até as condições ambientais.

4.2.1 Resistência à compressão

A resistência mecânica à compressão (f_c) é a principal propriedade do concreto no seu estado endurecido e mais valorizada por projetistas e engenheiros de controle de qualidade. Na maior parte das estruturas, o concreto é submetido a esforços que

resultam em tensões de compressão. Este fator, somado à simplicidade e precisão do ensaio, faz com que a resistência axial seja a propriedade mais avaliada para a verificação da qualidade de um concreto. O concreto é excelente quando submetido a esforços de compressão e deixa a desejar sob esforços de tração. A resistência à tração é da ordem da décima parte da resistência à compressão (PETRUCCI; PAULON, 2005).

A resistência pode ser definida como a tensão última aplicada ao elemento que provoca a desagregação do material que o compõe, ou ainda, como a capacidade do material de suportar ações aplicadas sem que ele entre em colapso (ISAIA, 2007).

Diversos fatores influenciam consideravelmente a resistência à compressão do concreto. Fatores desde o adensamento até as condições de cura (grau de hidratação do cimento) têm efeitos na resistência do concreto. Outras variações podem influenciar os resultados dos ensaios de resistência à compressão como: tipo e tamanho de corpo de prova, tipo do molde, preparação dos corpos de prova, rigidez da máquina de ensaio e a velocidade de aplicação da força (NEVILLE, 2016). A norma técnica brasileira que prescreve os procedimentos para o ensaio de compressão do concreto é a ABNT NBR 5739:2007.

A Figura 4-2 mostra as interações entre os diversos fatores que influenciam a resistência do concreto.

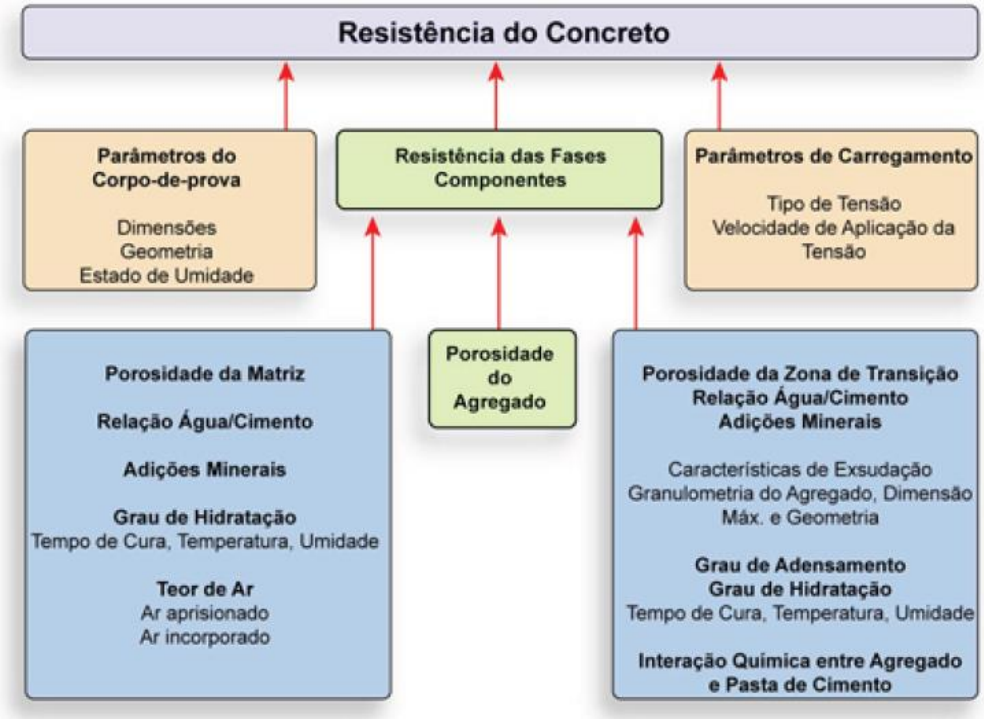

Figura 4-2: Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os concretos são classificados em grupos de resistência, conforme a resistência característica à compressão (f_{ck}), e essa classificação está diretamente relacionada ao consumo de cimento. A tabela 4-3 apresenta a correspondência entre os consumos de cimento e as classes de resistência de concretos.

Tabela 4-3: Correspondência entre consumo de cimento, classe de resistência e relação água/cimento (NBR 6118:2014; NBR 8953:2015).

Concreto	**Tipo**	**Consumo de cimento (Kg/m^3)**			
	CA e CP	**≥ 260**	**≥ 280**	**≥ 320**	**≥ 360**
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Relação água/aglomerante em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45

CA – componentes e elementos estruturais de concreto armado
CP – componentes e elementos estruturais de concreto protendido

Estudos que relacionam a perda de resistência do concreto com a quantidade de ar incorporado mencionados na literatura foram realizados mais intensamente nas décadas de 1970 e início da década de 1980. Segundo Mehta e Monteiro (2014), os

resultados desses estudos demonstraram que concretos contendo alto consumo de cimento sofrem perda de resistência considerável com acréscimo de incorporação de ar; enquanto concretos com baixo consumo de cimento têm tendência a sofrer pequena perda na resistência ou podem ganhar resistência com o ar incorporado. Esses autores explicam que o aumento da porosidade da matriz do concreto, obtido com o ar incorporado, diminui a resistência dos materiais compósitos; enquanto que a melhoria da trabalhabilidade e a compacidade da mistura obtida tendem a aumentar a resistência da zona de transição na interface, melhorando a resistência do concreto. Há uma compensação do efeito benéfico do ar incorporado na zona de transição sobre seu efeito adverso na matriz.

Aditivos incorporadores de ar em dosagens mais ricas de concreto (alto consumo de cimento) provocam queda na resistência mecânica, o que não acontece para dosagens com consumo de cimento inferior a 250 kg/m^3, podendo conservar ou até aumentar a resistência mecânica do concreto (AGNESINI, 1988).

Fausto e Moser (2011) evidenciaram em seus estudos que há benefícios na resistência mecânica de traços de concreto com baixo consumo de cimento e abatimento de concreto convencional, cerca de 50 mm, com uso de ar incorporado nos teores usuais, de até 5%, e que o excesso de ar incorporado causa perda significativa de resistência.

Vieira, Faria e Castro (2011) avaliaram os impactos das microbolhas de ar incorporadas por meio de aditivo nas propriedades do concreto fresco e endurecido com teores de ar de 1,5%, 2,5% e 5,0%. Observaram o ganho de resistência à compressão para baixos teores de ar incorporado e indiferença na relação entre o consumo de cimento empregado e a resistência à compressão para o intervalo de variação do teor de ar estudado.

Ensaios realizados com teores de ar incorporado mais elevados, de 6 a 12%, resultaram em perdas de resistência da ordem de 10% a 50% quando comparado com o concreto sem ar incorporado, o que justifica o controle sistemático por meio de ensaios de laboratório, durante a produção de concreto com ar incorporado (FAUSTO; MOSER, 2011). O aumento do teor de ar e diminuição do fator de espaçamento, além de reduzir as resistências à compressão e à flexão do concreto, afeta a permeabilidade (CHOI et al., 2016).

4.2.2 Módulo de elasticidade

A maioria dos projetos estruturais é feita com base na resistência à compressão, mas, para um cálculo estrutural se aproximar de maneira mais realista ao comportamento do material, é importante o conhecimento das propriedades de deformação do material, não só a resistência à compressão. É necessário conhecer com precisão o módulo de elasticidade, a retração, a fluência, e outros parâmetros que expressem as condições dos estados limites de serviço.

A escolha do concreto ou de um material construtivo qualquer para aplicação especifica depende de sua capacidade de suportar a força aplicada. A alteração resultante da carga aplicada é chamada de deformação e é definida pela mudança de comprimento por unidade de comprimento, sendo a carga chamada de tensão (força por unidade de área) (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os ensaios mecânicos usualmente utilizados na caracterização de materiais são: ensaio de tração, compressão, flexão, impacto e dureza. Esses resultam normalmente em dois tipos básicos de deformação: a deformação elástica e a deformação plástica (CALLISTER, 2002).

O comportamento elástico de um material é a propriedade mecânica que caracteriza a capacidade do mesmo retornar às suas dimensões e formas iniciais, após ser submetido à aplicação de forças. Trata-se de um processo de deformação no qual a tensão e a deformação são proporcionais, denominado deformação elástica (Figura 4-3). Em uma escala atômica, a deformação elástica manifesta-se como pequenas alterações no espaçamento interatômico e na extensão de ligações interatômicas.

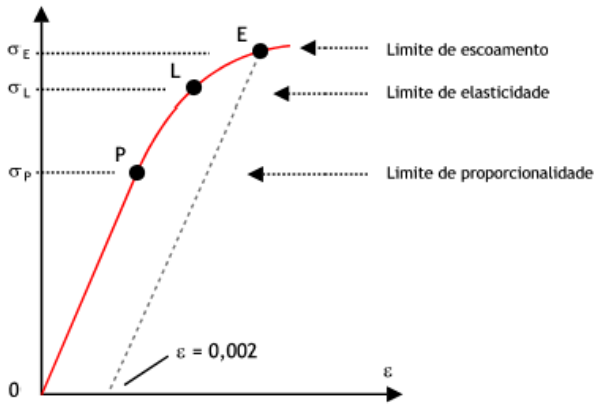

Figura 4-3: Região elástica de um material: 0P (CALLISTER, 2002).

Na fase de deformação elástica a relação é linear entre a força aplicada e a deformação sofrida é reversível. Essa relação de proporcionalidade é conhecida por Lei de Hooke onde a constante de proporcionalidade é o módulo de elasticidade (E) ou módulo de *Young* do material (Figura 4-4).

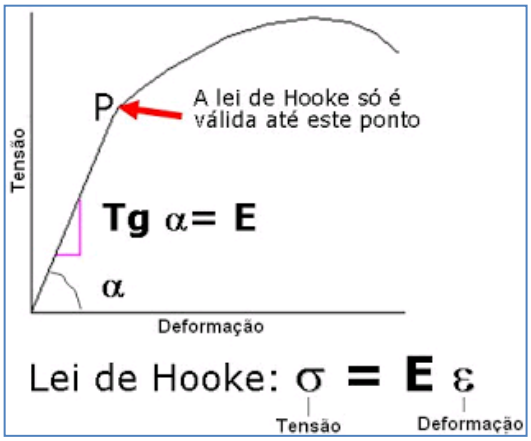

Figura 4-4: Lei de Hooke (CALLISTER, 2002).

Esse módulo pode ser considerado como sendo rigidez ou resistência do material à deformação elástica. Quanto maior o valor de E, mais rígido é o material ou menor será sua deformação elástica resultante da aplicação de uma determinada tensão.

A deformação plástica ocorre quando o material ultrapassa o ponto máximo de deformação. A tensão não é mais proporcional à deformação, ocorrendo uma deformação permanente, não recuperável (Figura 4-5).

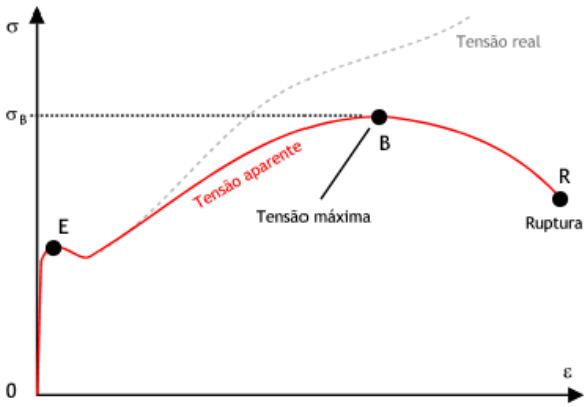

Figura 4-5: Região plástica de um material: EB (CALLISTER, 2002).

A transição do comportamento elástico para o plástico é uma transição gradual para a maioria dos metais ou transição elastoplástica gradual. Nesta fase de transição, a

curva tensão x deformação apresenta uma curvatura no ponto de surgimento da deformação plástica que aumenta mais rapidamente com o aumento da tensão.

Em escala atômica, a deformação plástica é o resultado do deslocamento permanente dos átomos que compõem e que constituem o material em análise, diferindo da deformação elástica em que os átomos conservam suas posições relativas.

O concreto, assim como muitos materiais, é elástico dentro de certos limites. Os elementos do concreto quase sempre sofrem alguma restrição. A tensão elástica de tração surge quando a deformação por retração em um material elástico se encontra totalmente restringida (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Seguindo a lei de Hooke, a intensidade dessa tensão induzida (σ) é determinada pelo produto da deformação ε pelo módulo de elasticidade do material. As deformações no concreto ocorrem como resultado da reação do material à carga externa e ao ambiente. Basicamente, existem duas deformações principais: a deformação de retração associada ao resfriamento (contração térmica) e a deformação por retração associada à perda de umidade (retração por secagem); sendo que a primeira ocorre no concreto recém-endurecido na presença ou não de carga. Além disso, sob um carregamento constante, ao longo do tempo, o concreto apresenta uma fluência. Tanto a fluência quanto a retração por secagem e contração térmica são da mesma ordem de grandeza da deformação elástica devido às tensões (NEVILLE, 2016). Daí a necessidade de avaliar o módulo de elasticidade para determinar as tensões induzidas pelas deformações descritas anteriormente.

O módulo de elasticidade do concreto pode ser definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e deformação instantânea dentro de um limite proporcional adotado (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O conceito de elasticidade é geralmente aplicado a materiais que possuem um comportamento linear, porém isto somente acontece quando da aplicação de tensões pequenas, a partir de 50% das tensões aplicadas este conceito de linearidade pode não ser mais verdade. No caso do concreto, o comportamento deixa de ser linear um pouco antes de 50% da carga última, comportamento este explicado por vários estudos sobre o processo de micro-fissuração progressiva do concreto sob cargas. Por isso, alguns preferem denominar “módulo de deformação” ao invés de “módulo de elasticidade”.

O módulo de elasticidade no concreto é dado pela declividade da curva de tensão-deformação sob um carregamento uniaxial, segundo o que prescreve a ABNT NBR 8522:2008. O pico da curva tensão-deformação é atingido quando se aumenta a tensão aplicada para mais de 70% da resistência final, pois neste momento começa a ruptura da argamassa, as fissuras tendem a se propagar diminuindo a quantidade de caminhos para suportar o carregamento. A deformação resultante da ação de uma carga instantânea em um corpo de prova de concreto mostra não ser diretamente proporcional à tensão aplicada, nem totalmente recuperada no descarregamento, pois o concreto pode apresentar microfissuras prévias que são intensificadas durante a solicitação (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão, quanto à microfissuração do concreto e o nível de tensão pode ser dividido em quatro estágios distintos (Figura 4-6).

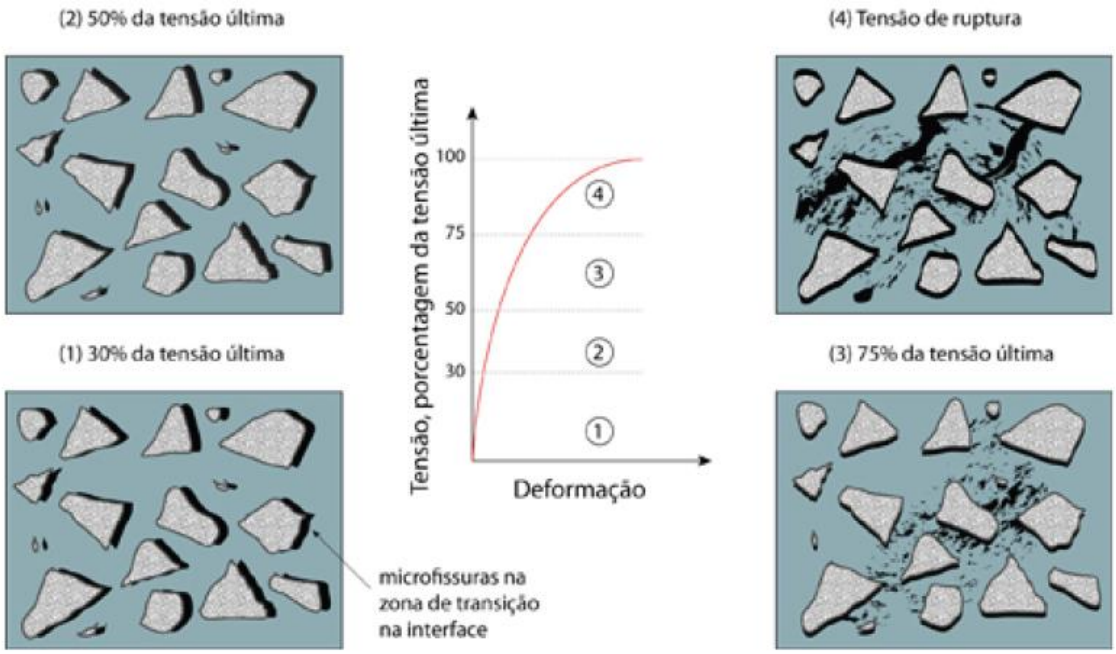

Figura 4-6: Representação do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Abaixo de 30% da carga última, as fissuras na zona de transição na interface permanecem estáveis; a curva σ-ε permanece linear (estágio 1). Acima de 30% de carga última, com o aumento da tensão as microfissuras da zona de transição na interface começam a aumentar em comprimento, abertura e quantidade. A relação ε/σ aumenta e a curva começa a desviar da reta (estágio 2). De 50 a 60% da tensão

última, novas fissuras começam a se formar. Até 75% da carga última o sistema de fissuras na zona de transição se torna instável e há aumento da proliferação e propagação das fissuras na matriz, provocando inclinação ainda maior na curva σ-ε (estágio 3). Com a liberação da energia de deformação ocorre o crescimento das fissuras que se propagam, culminando no rompimento do material (estágio 4) (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A incorporação de ar altera significativamente a quantidade de poros da matriz cimentícia no concreto, o que, afetará diretamente seu módulo de elasticidade. Entretanto, o módulo de elasticidade segue a tendência da resistência à compressão do concreto. Maior resistência presume menor porosidade e, portanto maior módulo de elasticidade (REBMANN, 2011).

Os materiais constituintes do concreto possuem módulo de elasticidade muito diferente do módulo de elasticidade do concreto. Os agregados, geralmente, possuem módulos de elasticidade maiores do que a pasta de cimento. Desta forma, a deformação do concreto, provavelmente, será um valor intermediário entre o módulo do agregado e do módulo da pasta. Assim, concretos com baixo consumo de cimento possuem maior proporção de agregados o que implica em maior módulo de elasticidade (REBMANN, 2011).

Ao observar as curvas tensão x deformação (σ-ε) dos agregados, pasta de cimento e concreto carregado em compressão uniaxial, percebe-se que o concreto não é um material elástico ao contrário dos agregados e da pasta de cimento que apresentam um comportamento quase linear (Figura 4-7).

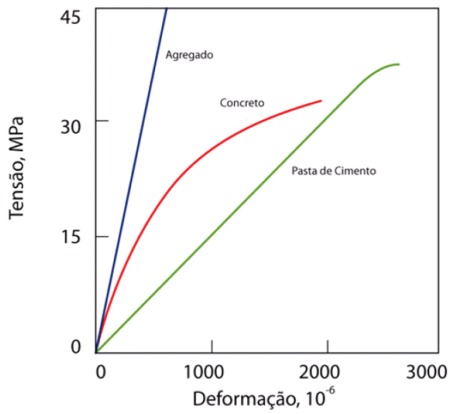

Figura 4-7: Comportamentos típicos de tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014)

A curvatura da relação do concreto pode ser explicada pelo aparecimento de microfissuras presentes tanto na pasta de cimento como na zona de transição.

Os principais fatores que influenciam o módulo de elasticidade do concreto podem ser divididos em quatro grupos: parâmetros de ensaios, matriz da pasta de cimento, zona de transição e agregados (Figura 4-8).

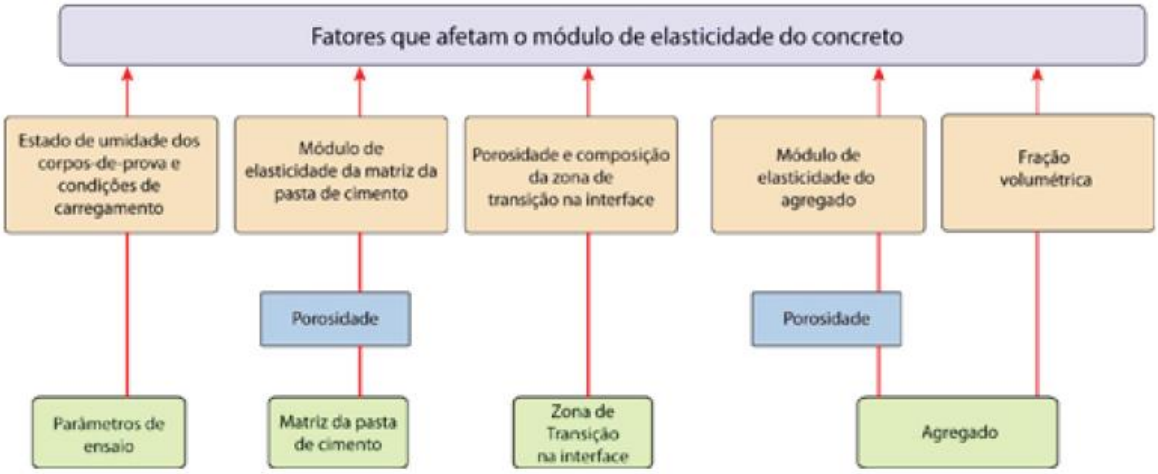

Figura 4-8: Fatores que influenciam o módulo de elasticidade do concreto.
(MEHTA; MONTEIRO, 2014)

4.2.3 Porosidade e permeabilidade

A porosidade é a medida da proporção do volume total do concreto ocupada pelos poros, geralmente expressa em porcentagem. A estrutura de uma pasta endurecida de concreto não é homogênea. Assim, não é a porosidade total que influencia efetivamente a resistência, a permeabilidade e as variações de volume em uma pasta de cimento endurecida, mas sim a distribuição do tamanho dos poros. Essa distribuição do tamanho dos poros é afetada pela relação água-cimento e pela idade (grau) de hidratação do cimento. Os poros grandes influenciam principalmente a resistência à compressão e a permeabilidade, enquanto os poros pequenos influenciam mais a retração por secagem e a fluência.

A permeabilidade, que representa a facilidade com que um fluido pode escoar através de um sólido, é definida pelo tamanho e continuidade dos poros na estrutura desse sólido. A permeabilidade será alta se a porosidade for grande e os poros estiverem interligados, pois, contribuirão para o deslocamento de fluidos através do concreto. O tamanho e a continuidade dos poros na pasta de cimento endurecida,

em qualquer estágio durante o processo de hidratação do cimento, determinarão o coeficiente de permeabilidade do concreto (SUN; DAI; Ng, 2014).

Os vazios no concreto constituem as entradas e os meios de condução de água e demais agentes agressivos que desencadearão processos deteriorantes em seu interior. Permeabilidade e absorção estão relacionadas diretamente à porosidade e a conectividade e tamanhos dos poros, e situam-se dentre os principais mecanismos de transporte de agentes agressivos no interior do concreto (SUN; DAI; Ng, 2014). Segundo Rebmann (2011), o consumo de cimento também constitui fator influente na porosidade de concretos, sendo que baixos consumos de cimento implicam em menor absorção em ensaios de absorção de água por imersão.

Helene e Terzian (1992) elaboraram uma proposta para classificação dos concretos sem aditivos de acordo com a porosidade e a absorção de água apresentada na Tabela 4-4. Segundo Neville (2016), bons concretos têm absorção menor do que 10%, em massa.

Tabela 4-4: Classificação dos concretos de acordo com a porosidade e a absorção de água. (HELENE; TERZIAN, 1992)

Qualidade do concreto	Propriedade	
	Porosidade	Absorção de água
Duráveis	< 10%	< 4,2%
Normais	10 a 15%	4,2 a 6,3%
Deficientes	> 15%	> 6,3%

Considerando que o agregado no concreto é geralmente assumido como impermeável e que o ar incorporado aumenta a porosidade do concreto, mas de certa forma diminui a sua permeabilidade, a incorporação de ar está diretamente relacionada à durabilidade do concreto.

4.2.4 Microestrutura

Atualmente, são utilizadas diversas técnicas para a análise não só da morfologia da porosidade, mas de toda a microestrutura do concreto, tais como Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM), Difratometria de Raios X (DRX), Microscopia Óptica de

Transmissão (MOT), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Microtomografia Computadorizada (Micro-CT), entre outras.

A microscopia eletrônica de varredura tem sido uma ferramenta de trabalho utilizada pelos pesquisadores em várias áreas do conhecimento, uma vez que ela abrange um conjunto de técnicas que possibilitam a caracterização da morfologia do material, composição química e determinação da estrutura atômica. Rossignolo (2003) utilizou a microscopia eletrônica de varredura em seus estudos para análise microestrutural da interface agregado-pasta de concretos com agregados leves nacionais e com agregados tradicionais. Por meio dessa técnica, foi possível analisar também a porosidade e o teor de hidróxido de cálcio na zona de transição entre agregado leve e matriz de cimento. Entretanto, a porosimetria por intrusão de mercúrio destaca-se como a mais utilizada das técnicas na determinação da porosidade de concretos.

A Microtomografia Computadorizada (Micro-CT) representa um avanço das técnicas de inspeção por raios X, que permite a obtenção de informações sobre o posicionamento e a forma tridimensional (3D) de um objeto. A inspeção das amostras feita por meio dessa técnica permite o conhecimento da morfologia interna das mesmas, e sua utilização implica em procedimentos não invasivos, com alto poder de resolução da ordem de mícrons (LU; PETERSON; CHERNOLOZ, 2016; CHUNG et al., 2016).

As porosidades superficiais calculadas por imagens obtidas por Micro-CT podem ser utilizadas como parâmetro para avaliação da porosidade do concreto (PESSÔA et al., 2011; BERNARDES et al., 2012). A Micro-CT tem sido amplamente utilizada também na avaliação de permeabilidade do concreto (LU; PETERSON; CHERNOLOZ, 2016; CHUNG et al., 2013; CHUNG et al., 2014), distribuição de vazios e rigidez de agregados leves (CHUNG et al., 2013), processos de formação da rede de poros de agregados leves (KORAT et al., 2013), análise da microestrutura de pastas de cimento (GALLUCI et al., 2007; BOSSA et al., 2015; ZHANG; JIVKOV, 2016; CHUNG et al., 2016) e em análises da distribuição de fibras sintéticas adicionadas ao concreto (BORDELON; ROESLER, 2014; PONIKIEWSKI et al., 2015).

4.2.5 Velocidade de propagação da onda ultrassônica

A determinação da velocidade da onda ultrassônica é um método não destrutivo que consiste na medição do tempo de percurso de ondas longitudinais de pulso ultrassônico através do concreto, normalmente com frequências elevadas, entre 20 kHz e 150 kHz (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Considerando-se que uma forma de conhecer a heterogeneidade interna de um material sólido é por meio do modo como uma onda se reflete e refrata através desse material, o método de velocidade de pulso ultrassônico – VPU ou velocidade de propagação da onda ultrassônica é amplamente utilizada na avaliação da homogeneidade do concreto. Além dessa aplicação, a VPU pode ser utilizada para estimar a resistência à compressão, determinar o módulo de elasticidade dinâmico e detectar a presença de fissuras e trincas no concreto (THAI et al., 2011). A VPU tem sido utilizada ainda, na caracterização de materiais à base de cimento nas primeiras idades e na avaliação da integridade do concreto (YE GUANG; VAN BREUGEL; FRAAIJ, 2001).

O concreto pode ser classificado de acordo com os valores da VPU mostrados na Tabela 4-5.

Tabela 4-5: Classificação dos concretos de acordo com a VPU.
(CANOVAS, 1998 *apud* CARMO, 2009)

Velocidade da onda ultrassônica (m/s)	Qualidade do concreto
V > 4500	Excelente
3500 < V < 4500	Ótimo
3000 < V < 3500	Bom
2000 < V < 3000	Regular
V < 2000	Ruim

A velocidade de propagação do pulso ultrassônico em um concreto convencional varia entre 3700 m/s e 4200 m/s (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

Existem dois tipos de ondas possíveis de propagação no interior de um sólido homogêneo: as ondas longitudinais, em que as partículas se movem para frente e para trás ao longo da direção de propagação a onda, e as ondas transversais ou

cisalhantes, em que as partículas se movem transversalmente em direção à propagação da onda. Em estudos experimentais de propagação de ondas, geofísicos em medições de ondas geradas durante terremotos, verificaram que as ondas longitudinais deslocam mais rápido do que as ondas transversais. Por essa razão, as ondas longitudinais também são conhecidas como ondas primárias e as ondas transversais como secundárias (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O equipamento utilizado no ensaio de VPU é composto por um circuito eletrônico capaz de gerar pulsos transformados em ondas ultrassônicas que são transmitidas por meio de transdutores transmissores para emissão das ondas, e receptores para sua captação, posicionados em pontos distintos do elemento de concreto ensaiado. As ondas recebidas são amplificadas e transformadas em pulsos elétricos, possibilitando a obtenção do tempo de propagação. A velocidade de propagação da onda ultrassônica é obtida pela divisão da distância linear entre os transdutores (transmissor e receptor) pelo tempo de percurso registrado pelo equipamento. Para minimizar a ocorrência de erros no ensaio, é necessário que o contato dos transdutores com o concreto esteja perfeito, ou seja, sem a presença de camada de ar. O ar na interface das superfícies do concreto e o transdutor pode induzir a erro na indicação do tempo de propagação da onda (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004). Para tanto, um gel (ou produto similar) é normalmente aplicado nas superfícies dos transdutores e concreto, propiciando o perfeito acoplamento das mesmas.

Existem três modos de transmissão para realização do ensaio em função do posicionamento dos transdutores na peça de concreto ensaiada: direto, indireto e o semidireto (Figura 4-9).

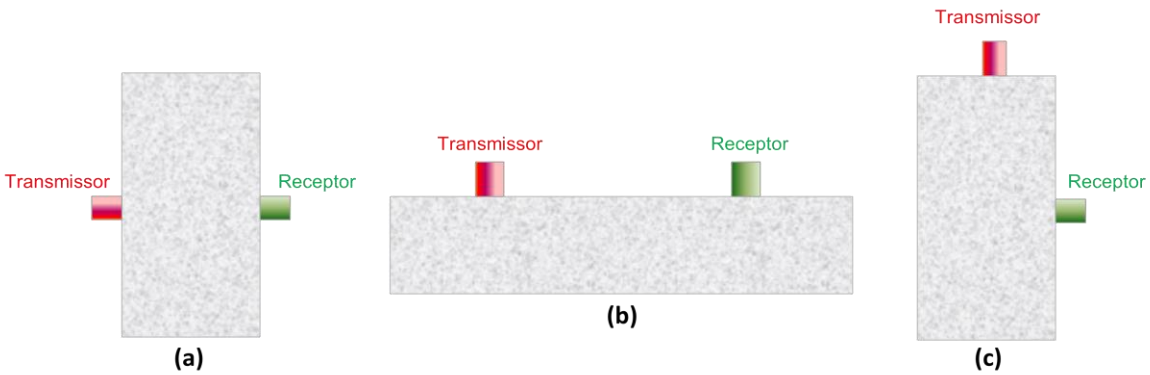

Figura 4-9: Ilustração dos modos de transmissão no ensaio de ultrassom no concreto: direto (a), indireto (b) e semidireto (c).

A norma brasileira que prescreve o método de ensaio para determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica nos concretos é a ABNT NBR 8802:2013.

A velocidade de ondas ultrassônicas através de materiais sólidos depende da densidade e das propriedades elásticas desses materiais, ou seja, quando as ondas ultrassônicas atravessam o aço no concreto armado, a velocidade é maior devido à densidade do aço e é menor quando encontra uma descontinuidade, o que ocasiona a reflexão da onda e, consequente, retardamento do sinal a ser captado (ANDRADE, 2005). Da mesma forma, a taxa de armadura tem influência na propagação da onda ultrassônica no concreto, os vazios ou poros também a influenciam.

Mehta e Monteiro (2014) destacam que diversas variáveis afetam as velocidades das ondas no concreto. Algumas delas são mostradas na Tabela 4-6.

Tabela 4-6: Variáveis que influenciam a velocidade de onda ultrassônica no concreto. (MEHTA; MONTEIRO, 2014)

Variáveis	Influência
Idade	As velocidades das ondas aumentam à medida que continua o processo de hidratação do cimento em que a porosidade diminui. As ondas se propagam mais rapidamente no meio sólido.
Condições de umidade	As velocidades das ondas aumentam em condições saturadas.
Quantidade e tipo de agregado	As velocidades das ondas aumentam à medida que, para uma determinada matriz da pasta de cimento, aumenta a quantidade de agregado. Normalmente utilizados, os agregados de rochas têm velocidades de onda mais altas do que a pasta de cimento.
Microfissuração	As velocidades das ondas diminuem à medida que se formam microfissuras no concreto. As microfissuras reduzem os módulos de elasticidade do concreto e são formadas quando é exposto a condições ambientais agressivas ou quando o elemento de concreto fica exposto à tensão maior que 50% de sua resistência à compressão.
Presença de armadura	As velocidades de ondas aparentes aumentam na presença de armaduras. Esta deve ser evitada quando se mede a velocidade de onda no concreto.

Devido à heterogeneidade do concreto, outras variáveis também influenciam a velocidade de propagação da onda ultrassônica, tais como, o tipo de cimento, a relação água/cimento, aditivos, propriedades elásticas dos constituintes do concreto, temperatura ambiente, meio de exposição da estrutura, dimensões da peça ensaiada, modo de posicionamento dos transdutores e condições da superfície ensaiada (COSTA, 2004).

A Figura 4-10 mostra os efeitos da porosidade e concentração de areia nas velocidades de propagação de onda no concreto.

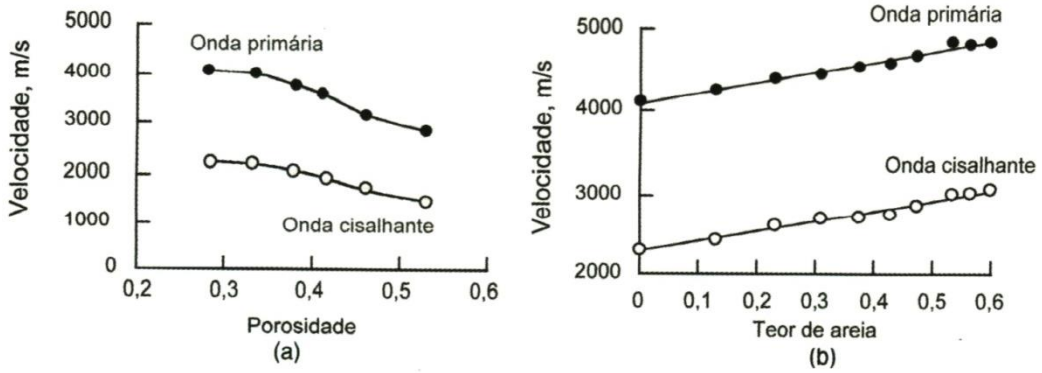

Figura 4-10: Efeito da porosidade (a) e concentração de areia (b) na VPU.
(MEHTA; MONTEIRO, 2014)

A velocidade de propagação da onda ultrassônica também aumenta com a umidade, ou seja, existe correlação positiva entre a umidade do concreto e a VPU (CHUNG; LAW, 1983; OHDAIRA; MASUZAWA, 2000; BERRIMAN et al., 2004 e FERREIRA, 2011). A VPU também pode ser utilizada como parâmetro na avaliação de teores de ar em concretos com ar incorporado, uma vez que é menor na presença de vazios.

4.2.6 Condutividade térmica

Uma propriedade importante dos concretos, diretamente relacionada à incorporação de ar, é o desempenho térmico. A condutividade térmica de concretos convencionais, com massa específica em torno de 2500,00 kg/m^3, é relativamente alta se comparada a outros materiais utilizados nas vedações de edificações (NEVILLE, 2016). Isso faz com que o concreto não seja considerado um bom isolante térmico.

Fatores como teores de ar e de umidade influenciam significativamente a condutividade térmica. Apesar do fato da condutividade térmica do ar ser menor que a da água, ressalta que quanto maior a saturação do concreto no estado endurecido, menor a condutividade térmica. Entretanto, em concretos leves, um aumento de 10% no teor de umidade resulta em aumento da condutividade de aproximadamente 50% (NEVILLE, 2016).

A Tabela 4-7 apresenta os valores da condutividade térmica de alguns materiais de construção civil.

Tabela 4-7: Condutividade térmica de alguns materiais de construção civil.
(LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014)

Material (kg/m^3)	Condutividade térmica (W/m.K)
Concreto convencional (2200 a 2400)	1,750
Tijolo de barro (1000 a 1300)	0,700
Madeira (450 a 600)	0,150
Isopor (25 a 40)	0,035

Um dos principais fatores que influenciam a condutividade térmica de um material, além da umidade, é a temperatura em que se encontra o material (ROSEMANN, 2011). A condutividade térmica do concreto é influenciada também pela massa específica. Quanto maior a massa específica, maior a condutividade térmica do concreto (SACHT; ROSSIGNOLO; SANTOS, 2010). Segundo Demirboga e Gül (2003), a condutividade térmica do concreto está relacionada à sua densidade aparente, pois decorre das diferenças em sua porosidade. A estrutura de poros dos concretos leves com ar incorporado os tornam melhores no isolamento térmico e sonoro, quando comparados com os concretos convencionais, pois a condutividade térmica está diretamente relacionada à quantidade e distribuição dos poros no concreto (KILIÇ et al., 2003 e KREFT et al., 2011).

A norma técnica de desempenho térmico de edificações, ABNT NBR 15220:2005, apresenta valores de condutividade térmica de concretos para determinados intervalos de massa específica (Tabela 4-8).

Tabela 4-8: Condutividade térmica do concreto de acordo com a ABNT NBR 15220:2005.

Massa específica (kg/m^3)	Condutividade térmica (W/m.K)
2200 – 2400	1,75
1600 – 1800	1,05
1400 – 1600	0,85
1200 -1400	0,70
1000 – 1200	0,46

Obs: Consumo de cimento > 300 kg/m^3.

Para utilização do concreto leve com ar incorporado é necessário conhecer suas propriedades térmicas para uma correta aplicação. A incorporação de ar possibilita obtenção de concretos com menor condutividade térmica, cuja aplicação resultará em edificações com melhor conforto térmico (SACHT; ROSSIGNOLO; SANTOS, 2010).

5 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

De forma a atender ao objetivo proposto, este estudo representa uma pesquisa experimental, que contempla ensaios de laboratório, realizada em duas etapas. Na primeira etapa foram feitos ensaios em pastas de cimento e, na segunda, ensaios em concreto, ambos com ar incorporado por meio de aditivo. Todos os ensaios foram realizados sob um rigoroso controle tecnológico com utilização de instrumentos e equipamentos devidamente calibrados, preparados e adequados segundo prescrições das normas técnicas da ABNT. Fatores como umidade relativa e temperatura ambiente dos laboratórios, tipo e período de cura dos corpos de prova, tipos e condições dos materiais utilizados foram mantidos constantes durante os ensaios.

As etapas, ensaios e procedimentos realizados estão relacionados na Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Etapas experimentais e ensaios realizados.

Etapas experimentais			Ensaios / Procedimentos
1	Avaliação da eficiência na incorporação de ar dos aditivos		Produção de pastas de cimento com ar incorporado
			Determinação da massa específica no estado fresco
			Moldagem de corpos de prova
			Determinação da massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios no estado endurecido
			Análise microestrutural Microscopia óptica
2	Avaliação das características físicas e mecânicas dos concretos Traços padrões e modificados	Dosagem e produção dos concretos	Referência (0% de ar incorporado)
			Com ar incorporado (10%, 20% e 30%)*
		Concreto no estado fresco	Abatimento do tronco de cone
			Massa específica
			Teor de ar (método pressométrico)
		Concreto no estado endurecido	Massa específica e absorção de água por imersão
			Resistência à compressão axial
			Módulo de elasticidade
			Velocidade de propagação de onda ultra-sônica - VPU
			Condutividade térmica
	Análise microestrutural dos concretos		Microtomografia computadorizada - MicroCT
	Avaliação da durabilidade dos concretos		Carbonatação acelerada

*valores aproximados

5.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados neste trabalho são comumente empregados em obras de construção civil e foram adquiridos em lojas de materiais de construção na cidade de Uberlândia, com exceção dos aditivos incorporadores de ar, que foram obtidos junto aos respectivos fabricantes.

5.1.1 Aditivos incorporadores de ar

Neste estudo, foram utilizados quatro aditivos incorporadores de ar de diferentes marcas comerciais e composições. A escolha se deu em função de serem produzidos por empresas renomadas e de ampla presença no mercado de materiais de construção.

Os aditivos incorporadores de ar utilizados, suas principais características e dosagens recomendadas pelos fabricantes são apresentados na Tabela 5-2.

Tabela 5-2: Aditivos incorporadores de ar utilizados e respectivas características.

Aditivo	**Características**			
	Composição	**Aparência**	**Densidade** (g/cm^3)	**Dosagem** (%)*
A	Resinas sintéticas	Líquido avermelhado	1,01 a 1,05	0,05 a 1,0
B	Sal de álcool graxo etoxilado sulfatado	Líquido castanho claro	1,00	0,02 a 0,20
C	Alquil-aril-sulfonado	Líquido amarelo claro	1,02	0,04 a 0,12
D	Copolímero acrílico	Líquido branco	1,07	Até 1,00

***** Sobre a massa do cimento.

5.1.2 Cimento

No experimento foi utilizado o cimento CPV ARI (cimento Portland de alta resistência inicial) devido a esse cimento possuir desempenho superior aos cimentos comuns devido ao alto grau de finura, ausência de adições de escórias e pozolanas e à alta resistência inicial e final. Essas características permitem sua aplicação em painéis monolíticos moldados *in loco* e na produção de elementos pré-fabricados e pré-moldados de concreto.

O cimento utilizado apresentou massa específica de 3,12 g/cm^3 determinada de acordo com as prescrições da norma técnica ABNT NBR NM 23:2000. De acordo com o fabricante (InterCement Brasil, 2014), a superfície específica apresentou valor de 545,00 m^2/kg, resistência mecânica aos 28 dias de 50,0 MPa e inicio e fim de pega de 130 e 220 minutos, respectivamente.

5.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo consistiu em areia lavada natural quartzoza, extraída do leito do Rio Grande na divisa dos estados de São Paulo e Minas Gerais. A massa específica, determinada de acordo com os procedimentos prescritos na norma técnica ABNT NBR NM 52:2009, foi de 2,65 g/cm^3. Toda a areia utilizada foi previamente seca em estufa a (105 ± 5) ^{o}C.

A distribuição granulométrica, diâmetro máximo e módulo de finura do agregado miúdo obtidos, de acordo com a norma técnica ABNT NBR NM 248:2003, estão apresentados na Tabela 5-3 e a curva granulométrica na Figura 5-1.

Tabela 5-3: Granulometria do agregado miúdo: areia média (ABNT NBR NM 248:2003).

Peneiras # (mm)	**Porcentagem retida** (%)	**Porcentagem retida acumulada** (%)
9,5	0	0
6,3	0	0
4,8	0	0
2,4	2	3
1,2	7	9
0,6	19	29
0,3	48	77
0,15	20	97
Fundo	3	100
Diâmetro máximo característico (mm)		**2,4**
Módulo de finura		**2,07**

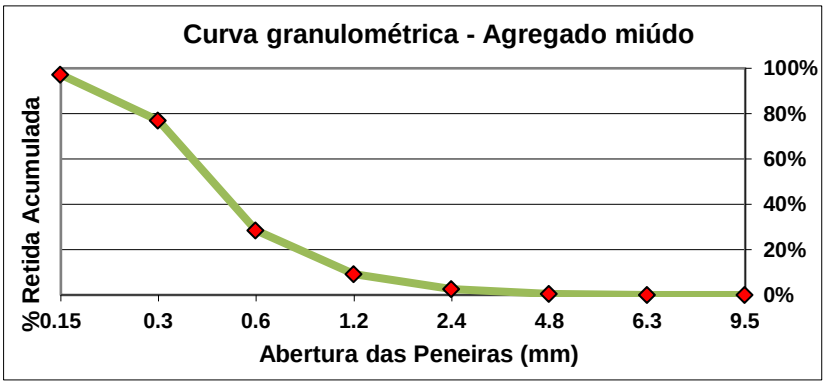

Figura 5-1: Curva granulométrica do agregado miúdo (ABNT NBR NM 248:2003).

5.1.4 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi pedra britada de basalto (brita 1), extraído na região do Triângulo Mineiro em Minas Gerais. A massa específica foi de 2,84 g/cm^3 e a absorção foi de 0,80%, determinadas de acordo com os procedimentos prescritos na norma técnica ABNT NBR NM 53:2009. A massa unitária no estado compactado seco foi de 1635,10 kg/m^3, obtida segundo os procedimentos da ABNT NBR NM 45: 2006. Toda a brita utilizada foi previamente seca em estufa a (105 ± 5)^{o}C. A distribuição granulométrica, diâmetro máximo e módulo de finura do agregado graúdo, obtidos de acordo com a norma técnica ABNT NBR NM 248:2003, estão apresentados na Tabela 5-4 e a curva granulométrica na Figura 5-2.

Tabela 5-4: Granulometria do agregado graúdo: brita 1 (ABNT NBR NM 248:2003).

Peneiras # (mm)	**Porcentagem retida** (%)	**Porcentagem retida acumulada** (%)
25,0	0	0
19,0	3	3
12,5	43	46
9,5	36	82
6,3	12	94
4,8	2	96
2,4	2	98
1,2	1	99
0,6	0	99
0,3	0	99
0,15	0	99
Fundo	1	100
Diâmetro máximo característico (mm)		**19,0**
Módulo de finura		**6,75**

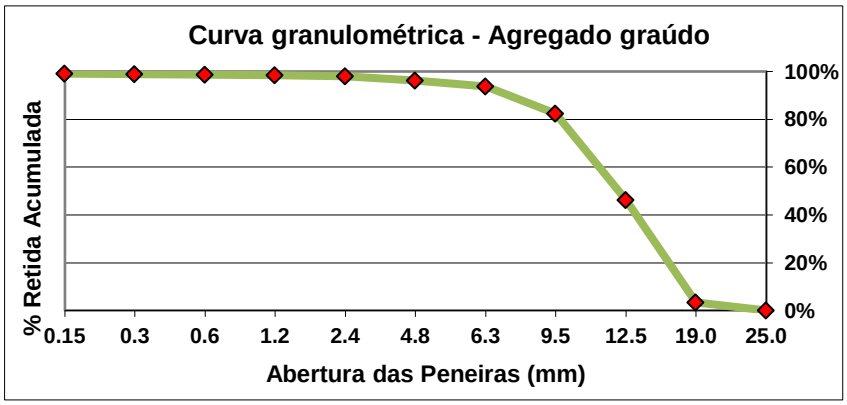

Figura 5-2: Curva granulométrica do agregado graúdo (ABNT NBR NM 248:2003).

5.2 PROCEDIMENTOS

5.2.1 Etapa 1 - Eficiência na incorporação de ar dos aditivos

Nesta fase do programa experimental, foram estudadas pastas de cimento Portland, com composição, condições ambientais ($T_{ambiente}$ = 23°C e UR_{ar} = 48%) e procedimentos de misturas padronizados para os diferentes traços produzidos. As pastas de cimento foram produzidas e ensaiadas no Laboratório de Materiais e Técnicas de Construção Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV – UFU – Uberlândia – MG). Foi avaliada a incorporação de ar por meio de aditivos de diferentes marcas comerciais, tendo como variáveis nos ensaios, o tipo e o teor de aditivo utilizado nas pastas. Foram realizados ensaios para obtenção da massa específica no estado fresco e endurecido e observação da microestrutura das pastas no estado endurecido por meio da microscopia óptica, para as diferentes pastas e teores de ar incorporado.

5.2.1.1 Produção das pastas de cimento

Para produção das pastas foram utilizados os aditivos, cimento Portland tipo CPV-ARI e água proveniente do sistema público de abastecimento da cidade de Uberlândia-MG.

As pastas utilizadas neste trabalho, foram obtidas a partir dos procedimentos prescritos na norma técnica ABNT NBR NM 43:2003. A primeira pasta produzida, sem a incorporação de ar por meio de aditivo, consistiu a pasta “controle” e foi obtida com uma relação água/cimento de 0,50.

A água foi colocada na cuba do misturador parado e em seguida foi adicionado o cimento, permanecendo a mistura em repouso por 30 segundos. Logo após, foi ligado o misturador em velocidade lenta por 30 segundos e desligado por um período de 15 segundos, durante o qual, com o uso de uma espátula de borracha, toda a pasta aderida às paredes da cuba foi removida para o fundo da mesma. Em seguida, a pasta foi misturada em velocidade rápida por um minuto, obtendo-se a pasta controle (traço I).

Utilizando-se os mesmos procedimentos e a mesma relação água/cimento (0,50), foram dosados e produzidos quatro traços, II, III, IV e V, de pastas com ar incorporado por meio dos aditivos A e B com 50%, 75%, 100% e 125% dos teores máximos recomendados. O aditivo foi adicionado em parte da água de amassamento de cada traço no período final da mistura por um minuto. Devido à pequena quantidade de aditivo utilizado, não foram consideradas as porções sólidas dos mesmos.

A pasta produzida sem adição de incorporador de ar consistiu a pasta controle: traço I. As quantidades de materiais e os teores de aditivo utilizados (sobre a massa do cimento) são apresentados na Tabela 5-5.

Tabela 5-5: Materiais utilizados na produção das pastas de cimento: aditivos A e B.

		Materiais		
Traço (% teor máximo)	**Aditivo**	**Aditivo** (g)	**Cimento** (g)	**Água** (g)
I (0)	**-**	0,00	2000,00	1000,00
II (50)	**A**	10,00	2000,00	990,00
	B	2,00	2000,00	998,00
III (75)	**A**	15,00	2000,00	985,00
	B	3,00	2000,00	997,00
IV (100)	**A**	20,00	2000,00	980,00
	B	4,00	2000,00	996,00
V (125)	**A**	25,00	2000,00	975,00
	B	5,00	2000,00	995,00
Teor máximo	**A**	**1,00 %**		
	B	**0,20 %**		

Após a obtenção dos resultados dos aditivos A e B, com o intuito de investigar possíveis alterações apenas nos tamanhos e distribuição das bolhas de ar, foram testados os aditivos C e D. Neste caso foram utilizados os teores máximos (sobre a massa do cimento) recomendados pelos fabricantes (Tabela 5-6).

Tabela 5-6: Materiais utilizados na produção das pastas de cimento: aditivos C e D.

		Materiais		
Traço (% teor máximo)	**Aditivo**	**Aditivo** (g)	**Cimento** (g)	**Água** (g)
IV (100)	**C**	2,40	2000,00	997,60
	D	20,00	2000,00	980,00
Teor máximo	**C**	**0,12 %**		
	D	**1,00 %**		

5.2.1.2 Massa específica no estado fresco

Imediatamente após a produção das pastas, foram realizados os ensaios para a determinação das massas específicas no estado fresco. Em uma bancada foi colocado um recipiente plástico de massa e volume conhecidos e, com uma concha plástica, as pastas foram devidamente colocadas dentro do recipiente e após o total preenchimento, com o auxílio de uma espátula, foi retirado o excesso. Em seguida, em uma balança de precisão, as massas do recipiente com a pastas foram obtidas.

As massas específicas foram determinadas segundo as prescrições para argamassas e concretos da norma técnica ABNT NBR 9833:2008, dividindo-se as massas das pastas pelo volume do recipiente (Figura 5-3).

Figura 5-3: Determinação da massa específica da pasta de cimento no estado fresco.

5.2.1.3 Moldagem dos corpos de prova

Em seguida à determinação das massas específicas das pastas no estado fresco, foram moldados corpos de prova para determinação, no estado endurecido, das massas específicas, absorção de água por imersão, índice de vazios e análise microscópica. Por não haver normas específicas para moldagem e cura dos corpos de prova de pastas de cimento, foram seguidas as prescrições das normas técnicas ABNT NBR 7215:1996 e da ABNT NBR 5738:2003.

Foram moldados três corpos de prova cilíndricos de dimensões 5,0 cm de diâmetro x 10,0 cm de altura para cada traço de pasta produzido. Moldes metálicos, previamente lubrificados internamente com óleo mineral, foram preenchidos com a pasta por meio de uma bisnaga plástica. O preenchimento se deu em quatro camadas, sendo que após cada uma das camadas, foi realizada acomodação da pasta no interior do molde com o uso de uma haste metálica, com intuito de promover um leve adensamento (trinta golpes leves). Em seguida, com espátula metálica, foi feito nivelamento do topo dos moldes e colocação de placa de vidro sobre os mesmos. Os corpos de prova foram desmoldados no dia seguinte à moldagem e colocados em uma caixa com água saturada em hidróxido de cálcio para cura até o momento dos ensaios.

Para as análises microscópicas das pastas, foram moldados três corpos de prova cilíndricos para cada traço de pasta produzido. Os moldes utilizados consistiram em cilindros de pvc (19,9mm de diâmetro e 40mm de comprimento) fixados sobre uma placa de acrílico (Figura 5-4).

Figura 5-4: Moldes dos corpos de prova das pastas de cimento: microscopia.

Após a lubrificação interna dos moldes com óleo mineral, esses foram preenchidos com a pasta por meio de uma bisnaga plástica. O preenchimento se deu em duas

camadas com acomodação da pasta, a cada camada, com o uso de pequena haste metálica com o intuito de promover leve adensamento. Em seguida, com espátula metálica foi feito o nivelamento do topo dos moldes. Após o preenchimento, os moldes foram levados à câmara úmida para cura e desmoldados no dia permanecendo na câmara úmida por sete dias.

5.2.1.4 Massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios no estado endurecido

A determinação das massas específicas, absorção de água por imersão e índices de vazios das pastas produzidas, seguiu as prescrições da norma técnica ABNT NBR 9778:2009. As massas dos corpos de prova utilizadas na realização dos ensaios foram obtidas utilizando-se uma balança de precisão 0,01g na sequência e condições das amostras apresentadas na Tabela 5-7.

Tabela 5-7: Determinação das massas dos corpos de prova utilizadas nos cálculos de massa específica, absorção e índice de vazios das pastas de cimento no estado endurecido.

Sequência	Massa: Condições das amostras	Identificação*
1º	Secas: ao ar	M
2º	Secas: após secagem em estufa à temperatura de (105 ± 5) ^{o}C por períodos de 24hs até que a diferença entre duas medidas sucessivas fosse inferior a 0,5% da menor massa	A
3º	Resfriadas ao ar: a uma temperatura de 22°C	M1
4º	Saturadas com superfície seca: após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) ^{o}C. As massas foram verificadas em intervalos de 24hs até que a diferença entre duas medidas sucessivas fosse inferior a 0,5% da menor massa. Inicialmente as amostras foram mantidas com 1/3 de seus volumes imersos nas primeiras 4 horas, 2/3 nas 4 horas subsequentes e completamente imersas após 8 horas	B
5º	Saturadas com superfície seca após saturação em água e ebulição por um período de 5hs no autoclave	C
6º	Imersas em água após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) ^{o}C em balança hidrostática	D
7º	Imersas em água após saturação em água e ebulição por um período de 5hs no autoclave em balança hidrostática	E

* Identificação estabelecida para a média das massas obtidas dos 3 corpos de prova moldados para cada traço.

Após a obtenção das massas dos corpos de prova foram realizados os cálculos utilizando a média das medidas das massas dos três corpos de prova moldados para cada traço de pasta. As grandezas calculadas foram a massa específica (da amostra seca, após saturação e real), absorção (após imersão em água à temperatura de 22°C e após imersão e fervura) e índice de vazios (após saturação em água e após saturação e fervura). Foram utilizadas as fórmulas da norma técnica ABNT NBR 9778:2009 (Tabela 5-8).

Tabela 5-8: Fórmulas utilizadas nos cálculos de massa específica, absorção e índice de vazios das pastas de cimento (ABNT NBR 9778:2009).

Grandeza calculada (unidade)	**Fórmula**
Absorção após imersão em água à temperatura de 22°C (%)	[(B-A) / A] x 100
Absorção após imersão e fervura (%)	[(C-A) / A] x 100
Índice de vazios após saturação em água (%)	[(B-A) / (B-D)] x 100
Índice de vazios após saturação e fervura (%)	[(C-A) / (C-E)] x 100
Massa específica da amostra seca (g/cm^3)	[A / (C-D)]
Massa específica da amostra após saturação (g/cm^3)	[B / (C-D)]
Massa específica real (g/cm^3)	[A / (A-D)]

* Onde A, B, C, D e E representam as médias das massas dos corpos de prova conforme estabelecido na Tabela 5-7.

5.2.1.5 Análise microestrutural – Microscopia óptica

As análises microscópicas das pastas de cimento produzidas foram feitas por meio de microscopia óptica. Os corpos de prova cilíndricos moldados foram cortados transversalmente em sua região central (meio) com discos de corte abrasivo, em máquina de corte Discotom Struers (Figura 5-5). As superfícies de análise obtidas foram submetidas à lixamento em lixadeira metalográfica Struers, utilizando seis granulometrias de lixas, com granas entre 320 e 4000 mesh (número de aberturas por polegada linear), para garantir perfeita planicidade. Ao final do processo de lixamento, foi realizado polimento a seco com feltro para remoção de todas as impurezas das superfícies para análise.

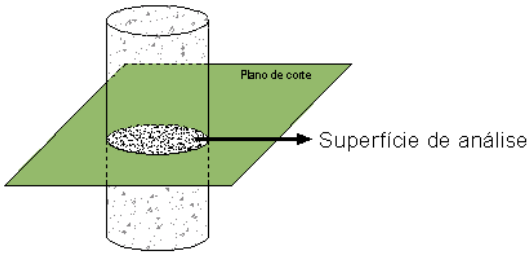

Figura 5-5: Esquema de corte dos corpos de prova das pastas de cimento.

Para análise microscópica das superfícies foi utilizado microscópio óptico Olympus BX41M e as imagens foram capturadas utilizando o software Image Pro Express. Para cada superfície de análise, foram obtidas quatro imagens de área padrão em regiões escolhidas aleatoriamente, sendo doze imagens para cada traço de pasta produzido (Figura 5-6).

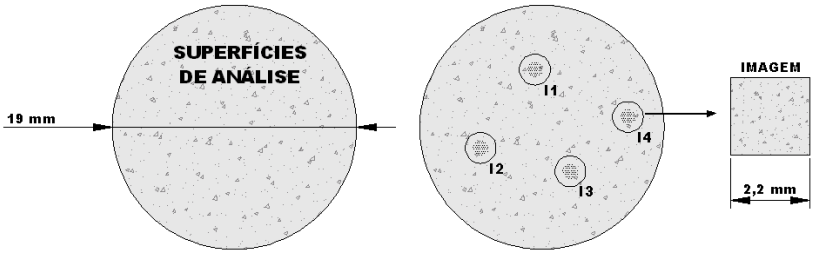

Figura 5-6: Esquema de corte transversal do corpo de prova da pasta de cimento, mostrando as áreas de obtenção das imagens.

Foi utilizada ampliação de 50X, permitindo a observação nítida das bolhas de ar incorporadas nos traços com aditivo. Em cada imagem, as bolhas de ar foram delimitadas, utilizando uma ferramenta do software Pro Image Express (Figura 5-7), para o dimensionamento (tamanho e quantidade) das mesmas.

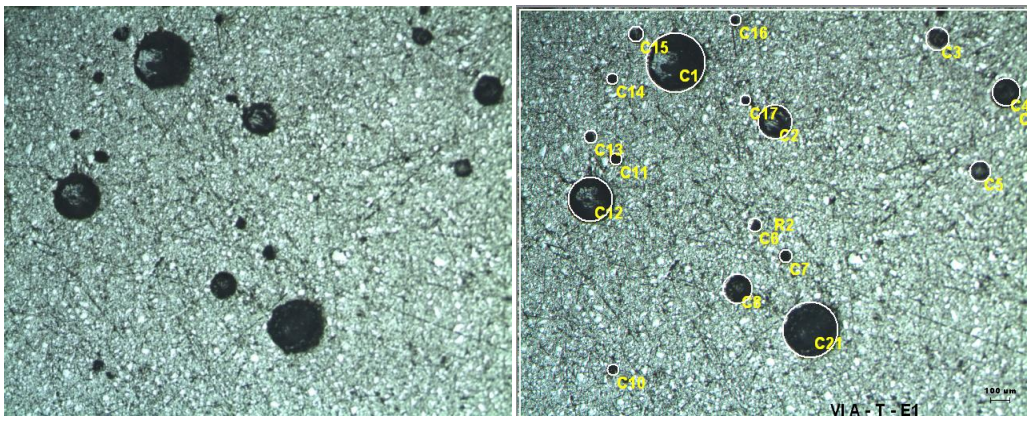

Figura 5-7: Micrografias: método de identificação e dimensionamento das bolhas de ar presentes nas pastas de cimento.

Os raios e áreas dessas circunferências, bem como as áreas das imagens, foram registrados em tabelas geradas pelo próprio programa. Esses dados foram transcritos para planilhas do software Excell, utilizado para obtenção e análises dos resultados.

5.2.2 Etapa 2 - Características físicas e mecânicas dos concretos

Nesta etapa do estudo, foram produzidos sete diferentes traços de concreto. Inicialmente, foi realizado estudo de dosagem para determinação do traço do concreto referência sem adição de incorporador de ar (Traço 0). A esse concreto foram adicionados três diferentes teores de aditivo IA resultando em três traços de concreto com ar incorporado (Traços I, II e III), considerados nesta etapa traços padrões. A partir desses, retirando-se agregados miúdo e graúdo em substituição ao ar incorporado aferido no estado fresco quando da sua produção, resultou na obtenção dos traços modificados IM, IIM e IIIM. O objetivo desse procedimento foi a obtenção de concretos (modificados) com diferentes relações agregados/cimento e teores de ar próximos aos inicialmente produzidos (padrões).

O incorporador de ar utilizado foi o aditivo A, à base de resinas sintéticas, considerado mais eficiente nas análises realizadas na etapa 1 desta pesquisa. Na dosagem dos concretos com ar incorporado foi considerado o teor de sólidos do aditivo de 17%, fornecido pelo fabricante.

Os concretos foram produzidos e ensaiados no Laboratório de Materiais e Técnicas de Construção Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV – UFU – Uberlândia – MG). Os ensaios de condutividade térmica e de carbonatação acelerada foram realizados no Laboratório de Construções e Ambiência do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (ZEB – FZEA – USP – Pirassununga – SP). A análise microestrutural foi realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LCT – POLI – USP – São Paulo – SP).

A avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos concretos foi feita por meio de ensaios normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

Foram realizados ensaios nos concretos no estado fresco, logo após sua produção e no estado endurecido, utilizando corpos de prova moldados, curados e adequadamente preparados para cada ensaio.

5.2.2.1 Dosagem e produção dos concretos

O concreto referência ou Traço 0 (sem aditivo IA) foi dosado e produzido a partir do método experimental de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Trata-se de um método adaptado da American Concrete Institute (ACI). O traço em massa para o concreto referência foi 1:1,31:2,62:0,42 (cimento:areia:brita:água). As características do concreto, materiais e consumos são apresentados na Tabela 5-9.

Tabela 5-9: Características e grandezas utilizadas na dosagem do concreto referência: Traço 0.

Grandeza calculada	**Valor** (unidade)
Resistência de dosagem do concreto - f_{ck}	40,00 MPa
Desvio padrão – S_d	4,00 MPa
Consistência desejada no estado fresco – *slump*	50 ± 10 mm
Relação água cimento - a/c	0,42
Resistência mínima do cimento* (7 dias) – f_{ck}	34,00 MPa
Consumo de água – $C_{água}$	195,00 l/m^3
Consumo de cimento – C_c	454,72 kg/m^3
Diâmetro máximo agregado graúdo – $D_{máx}$	19,00 mm
Módulo de finura da areia – MF_a	2,07
Volume de agregado graúdo seco por m^3 de concreto – V_b	0,743
Massa unitária compactada do agregado graúdo – Um	1635,10 kg/m^3
Massa específica do cimento – ρ_c	3120,00 kg/m^3
Massa específica da brita – ρ_b	2840,00 kg/m^3
Massa específica da areia – ρ_a	2650,00 kg/m^3
Massa específica da água – $\gamma_{água}$	1000,00 kg/m^3
Consumo de brita – C_b	1214,88 kg/m^3
Consumo de agregado miúdo – C_a	605,29 kg/m^3
Traço do concreto em massa – cimento : areia : brita : a/c	**1 - 1,31 : 2,62 : 0,42**

* ABNT NBR 5733:1991

Inicialmente, foi produzido o concreto referência (Traço 0) sem aditivo e em seguida os concretos com ar incorporado denominados padrão (Traços I, II e III).

A partir do concreto referência (Traço 0) foram dosados os concretos com ar incorporado com adição de 1%, 3% e 7% de aditivo sobre a massa do cimento obtendo-se os traços padrão I, II e III, respectivamente. Os teores de aditivo foram definidos a partir de ensaios preliminares realizados para obtenção de teores distintos de ar (10%, 20% e 30%) em concretos no estado fresco. Os traços em massa dos concretos com ar incorporado padrões são apresentados na Tabela 5-10.

Tabela 5-10: Traços em massa dos concretos com ar incorporado: Traços padrões I, II e III.

Traço	Cimento	Areia	Brita	A/C	Aditivo
I	1,00	1,31	2,62	0,42	0,01
II	1,00	1,31	2,62	0,42	0,03
III	1,00	1,31	2,62	0,42	0,07

Os concretos foram produzidos utilizando os mesmos procedimentos, sequência e tempo de mistura. Os materiais cimento, areia e brita foram previamente pesados em balança de precisão de 50g e a água e aditivo em balança de precisão de 1,0g. Todos foram separados em recipientes plásticos. Para a mistura foi utilizada uma betoneira estacionária de eixo inclinado com capacidade nominal de 320 litros. Anteriormente a mistura de cada traço, o interior da betoneira foi umedecido e realizada a imprimação com um concreto de traço em massa 1:2:3:0,6 (cimento:areia:brita:água). Após o descarte do concreto utilizado na imprimação, iniciou-se a mistura com a colocação do agregado graúdo seguido do cimento, parte da água (50%), agregado miúdo e o restante da água contendo o aditivo no caso dos concretos com ar incorporado (Figura 5-8).

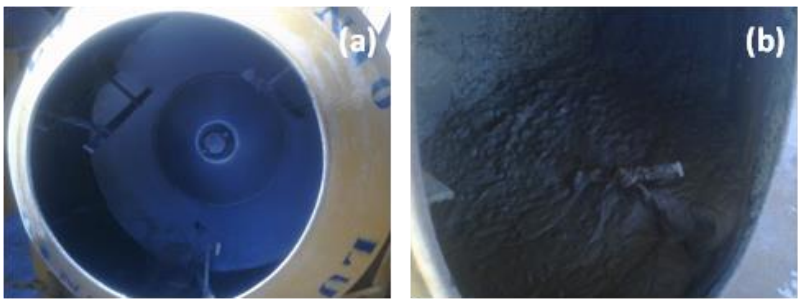

Figura 5-8: Produção dos concretos: betoneira (a) e concreto após mistura (b).

Após a produção dos concretos padrões (Traços I, II e III) e a medição dos teores de ar incorporado no seu estado fresco pelo método pressométrico, foram dosados os concretos considerados modificados (Traços IM, IIM e IIIM). A partir do volume de concreto produzido e do teor de ar, foi determinado o volume de ar dos traços I, II e

III. Esse volume foi convertido em volumes de agregados graúdo e miúdo proporcionalmente a cada traço e retirados dos traços I, II e III resultando na obtenção dos concretos modificados: IM, IIM e IIIM. Os traços em massa desses concretos com ar incorporado são apresentados na Tabela 5-11.

Tabela 5-11: Traços dos concretos com ar incorporado: Traços modificados IM, IIM e IIIM.

Traço	Cimento	Areia	Brita	A/C	Aditivo
IM	1,00	1,08	2,17	0,42	0,01
IIM	1,00	0,90	1,80	0,42	0,03
IIIM	1,00	0,51	1,02	0,42	0,07

Posteriormente, foram produzidos os concretos considerados modificados (Traços IM, IIM e IIIM) utilizando-se as mesmas quantidades de cimento e água e mesmos teores de aditivo dos concretos padrões. Entretanto, retirando agregados graúdo e miúdo na proporção do teor de ar incorporado aferido pelo método pressométrico na ocasião da produção dos concretos I, II e III. A quantidade de água utilizada nos concretos com ar incorporado incluiu a porção líquida do aditivo desconsiderando sua porção de sólidos. O tempo de mistura para todos os traços produzidos foi de 4 minutos após a colocação do último volume de água. Este tempo foi definido como adequado à completa homogeneização da mistura contendo o aditivo a partir de ensaios preliminares com variados tempos. As quantidades de materiais utilizados na produção dos concretos são mostrados na Tabela 5-12.

Tabela 5-12: Materiais utilizados na produção dos concretos: Traços referência, padrões e modificados.

Traço	Materiais					
	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	Aditivo	
					(kg)	(% smc*)
0 – Ref.	40,000	52,400	104,800	16,800	-	-
I	40,000	52,400	104,800	16,470	0,400	1
II	40,000	52,400	104,800	15,804	1,200	3
III	40,000	52,400	104,800	14,476	2,800	7
IM	40,000	43,330	86,660	16,470	0,400	1
IIM	40,000	36,030	72,050	15,804	1,200	3
IIIM	40,000	20,460	40,910	14,476	2,800	7

* sobre a massa do cimento.

Finalizadas as misturas, os concretos foram colocados em um recipiente metálico em forma de bandeja onde foi feita uma breve homogeneização de sua distribuição antes da moldagem de corpos de prova, realizada concomitantemente com os ensaios dos concretos no estado fresco.

5.2.2.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

A moldagem e cura dos corpos de prova destinados à realização dos ensaios dos concretos no estado endurecido seguiram as prescrições da norma técnica ABNT NBR 5738:2003. Foram moldados 32 corpos de prova cilíndricos com dimensões 10cm x 20cm (diâmetro x altura) de cada concreto em formas metálicas previamente lubrificadas internamente com óleo mineral. O preenchimento das formas foi feito com a colocação em duas camadas do concreto adensadas com 25 golpes verticais com haste de adensamento, logo após a produção dos concretos. As formas preenchidas foram colocadas em câmara úmida por 24 horas até a desforma.

Os corpos de prova foram colocados em tanque de cura com água saturada de hidróxido de cálcio a temperaturas entre 19°C e 29ºC, onde permaneceram até o momento dos ensaios. As quantidades e períodos de cura dos corpos de prova respectivos aos ensaios realizados são mostrados na Tabela 5-13 e a Figura 5-9 mostra o preenchimento das formas e os corpos de prova desmoldados.

Tabela 5-13: Quantidades e períodos de cura dos corpos de prova dos concretos produzidos.

Ensaio	**Corpos de Prova 10cm x 20cm** (quantidade)	**Cura** (dias)
Ensaio de resistência à compressão	6	28
	6	91
Módulo estático de elasticidade à compressão	3	28
	6	91
Massa específica e absorção de água por imersão*	3	28
Velocidade de propagação de onda ultrassônica*		
Carbonatação acelerada	4 (12)**	91
Condutividade térmica	1 (1)**	91
Microtomografia computadorizada	1 (1)**	91

***** para ambos ensaios foram utilizados os mesmos corpos de prova.

****** quantidades de cp`s obtidos após preparação a partir dos corpos de prova cilíndricos 10cm x 20cm.

Figura 5-9: Moldagem (a) e desforma (b) dos corpos de prova de concreto.

5.2.2.3 Concreto no estado fresco

Os ensaios realizados nos concretos no estado fresco e respectivas normas técnicas aplicadas são mostrados na Tabela 5-14.

Tabela 5-14: Ensaios realizados nos concretos no estado fresco.

Ensaio	Norma Técnica
Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone	ABNT NM 67:1996
Determinação da massa específica	ABNT NBR 9833:2008
Determinação do teor de ar – método pressométrico	ABNT NM 47:2002

5.2.2.3.1 Consistência dos concretos

O ensaio para determinação da consistência do concreto no estado fresco foi realizado após o término das misturas dos concretos, segundo as prescrições da norma técnica ABNT NM 67:1996. Foi utilizado como molde um cone metálico com 300 mm de altura e diâmetros de base inferior de 200 mm e de base superior de 100 mm. Também foram utilizados haste de adensamento, placa de base, concha e régua metálicas.

Inicialmente foi realizado umedecimento do molde e da placa de base e em seguida a colocação do concreto no molde com o auxílio da concha. O preenchimento se deu em três camadas, sendo cada uma delas compactada com 25 golpes da haste de adensamento. A retirada do molde foi feita em seguida com movimento constante e imediatamente após foi medido o abatimento do concreto com o uso de régua metálica milimetrada. O abatimento foi determinado pela diferença entre a altura do molde e a altura média do concreto desmoldado, com aproximação de 5 mm (Figura 5-10).

Figura 5-10: Consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone.

5.2.2.3.2 Massa específica

A determinação da massa específica dos concretos foi realizada em conformidade com a norma técnica ABNT NBR 9833:2008. Foram utilizados balança com precisão de 50g, haste de adensamento, placa de vidro com espessura de 6 mm, martelo de borracha e recipiente metálico de forma cilíndrica de dimensões internas de altura 240mm e diâmetro 200mm com volume 7,65 l e massa 3,95kg. O procedimento consistiu no preenchimento do recipiente metálico em três camadas de concretos com adensamento manual por meio da haste de adensamento em 25 golpes por camada. O rasamento da superfície do concreto no recipiente foi feito com a placa de vidro, em movimentos de vai e vem, colocada exercendo pressão sobre o concreto. Em seguida, foi obtida a massa do recipiente com o concreto e subtraída a massa do recipiente, determinando a massa do concreto. A massa específica foi obtida pela divisão da massa do concreto pelo volume do recipiente.

5.2.2.3.3 Teor de ar – método pressométrico

A determinação do teor de ar no concreto fresco foi realizada pelo método pressométrico, segundo a norma técnica ABNT NBR NM 47:2002. O medidor utilizado foi um recipiente metálico de forma cilíndrica com fechamento hermético por meio de tampa provida de válvulas de ar, chaves para injeção e saída de água e manômetro para medição de pressão. O procedimento consistiu no preenchimento do recipiente de medição com o concreto em três camadas adensadas manualmente com haste de adensamento aplicando-se 25 golpes por camada correspondendo a 14 golpes a cada 10000 mm^2 de superfície. Após o preenchimento foi feito o rasamento deslizando uma régua acrílica de 3 mm de espessura sobre a borda do recipiente em movimentos de vai e vem. Em seguida, foi colocada a tampa e

injetada água em uma das chaves até sua saída na chave oposta. Fechadas as chaves de entrada e saída de água e a válvula de sangramento de ar, injetou-se ar por meio de uma bomba manual até a linha de pressão inicial indicada no manômetro. A porcentagem de ar no concreto foi obtida em leitura direta no manômetro abrindo-se a válvula de ar principal (Figura 5-11).

Figura 5-11: Medidor para determinação do teor de ar no concreto fresco: método pressométrico.

5.2.2.4 Concreto no estado endurecido

Os ensaios realizados nos concretos no estado endurecido e respectivas normas técnicas aplicadas são mostrados na Tabela 5-15.

Tabela 5-15: Ensaios realizados nos concretos no estado endurecido.

Ensaio	Norma Técnica
Determinação da resistência à compressão axial	ABNT NBR 5739:2007
Determinação módulo estático de elasticidade	ABNT NBR 8522:2008
Determinação da massa específica e absorção de água por imersão	ABNT NBR 9778:2009
Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica	ABNT NBR 8802:2013
Determinação da frente de carbonatação – Carbonatação acelerada	-
Determinação da condutividade térmica	ASTM E1530-11
Análise microestrutural – Microtomografia computadorizada	-

5.2.2.4.1 Massa específica e absorção de água por imersão

A determinação das massas específicas e absorção de água por imersão dos concretos seguiu as prescrições da norma técnica ABNT NBR 9778:2009. Foram utilizados três corpos de prova cilíndricos (10cm diâmetro x 20cm altura) cujas

massas foram obtidas utilizando-se balança de precisão 0,01g na sequência e condições das amostras apresentadas na Tabela 5-16.

Tabela 5-16: Determinação das massas dos corpos de prova utilizadas nos cálculos de massa específica e absorção de água por imersão dos concretos.

Sequência	Massa: Condições das amostras	Identificação*
1º	Secas: ao ar	M
2º	Secas: após secagem em estufa à temperatura de (105 ± 5) ^{o}C por períodos de 24hs até que a diferença entre duas medidas sucessivas fosse inferior a 0,5% da menor massa	A
3º	Resfriadas ao ar: a uma temperatura de 22°C	M1
4º	Saturadas com superfície seca: após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) ^{o}C. As massas foram verificadas em intervalos de 24hs até que a diferença entre duas medidas sucessivas fosse inferior a 0,5% da menor massa. Inicialmente as amostras foram mantidas com 1/3 de seus volumes imersos nas primeiras 4 horas, 2/3 nas 4 horas subsequentes e completamente imersas após 8 horas	B
5º	Saturadas com superfície seca após saturação em água e ebulição por um período de 5hs no autoclave	C
6º	Imersas em água após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) ^{o}C em balança hidrostática	D
7º	Imersas em água após saturação em água e ebulição por um período de 5hs no autoclave em balança hidrostática	E

* Identificação estabelecida para a média das massas obtidas dos 3 corpos de prova moldados para cada traço.

Foram calculadas as massas específicas (da amostra seca, após saturação e real) e absorção (após imersão em água à temperatura de 22°C e após imersão e fervura) de todos os concretos produzidos. A Figura 5-12 mostra os equipamentos utilizados nos ensaios.

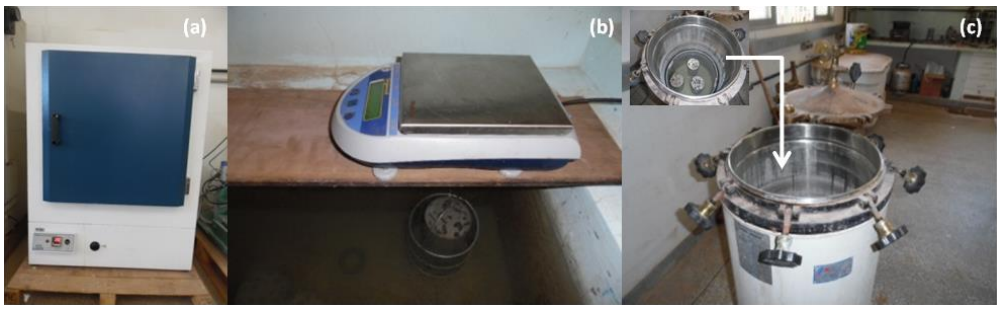

Figura 5-12: Determinação da massa específica e absorção de água por imersão dos concretos: estufa (a), balança hidrostática (b) e autoclave (c).

As fórmulas utilizadas nos cálculos constam na norma técnica ABNT – NBR 9778:2009 (Tabela 5-17).

Tabela 5-17: Fórmulas utilizadas nos cálculos de massa específica e absorção de água por imersão dos concretos (ABNT NBR 9778:2009).

Grandeza calculada (unidade)	**Fórmula**
Absorção após imersão em água à temperatura de 22ºC (%)	[(B-A) / A] x 100
Absorção após imersão e fervura (%)	[(C-A) / A] x 100
Massa específica da amostra seca (g/cm³)	[A / (C-D)]
Massa específica da amostra após saturação (g/cm³)	[B / (C-D)]
Massa específica real (g/cm³)	[A / (A-D)]

5.2.2.4.2 Compressão axial e módulo de elasticidade

Os ensaios para determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos foram realizados segundo os procedimentos da ABNT NBR 5739:2007 e ABNT NBR 8522:2008, respectivamente. Foram ensaiados corpos de prova cilíndricos de dimensões 10cm x 20cm (diâmetro x altura), retificados em suas bases por meio de retificadora de eixo horizontal. Posteriormente, foram realizadas as medições de massas, diâmetros e alturas dos corpos de prova (Figura 5-13).

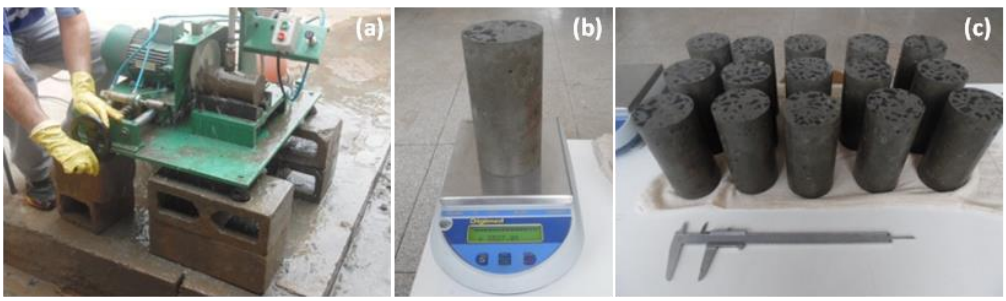

Figura 5-13: Preparação e caracterização dos corpos de prova de concreto: retificação das bases e topos (a), pesagem (b) e medição das alturas e diâmetros (c).

Para o ensaio de compressão foi utilizada prensa hidráulica microprocessada EMIC DL60000 com capacidade de 600 Kn aplicando-se carga de ensaio contínua e sem choques, com taxa de carregamento de 3930N/s até a ruptura total dos corpos de prova, para avaliação dos tipos de rupturas segundo o anexo A da ABNT NBR 5739:2007. Nos ensaios para determinação do módulo de elasticidade as

deformações nos corpos de prova foram medidas por meio de extensômetros (*clip* gage) fixados em suas faces laterais. A Figura 5-14 mostra os ensaios de compressão e módulo de elasticidade.

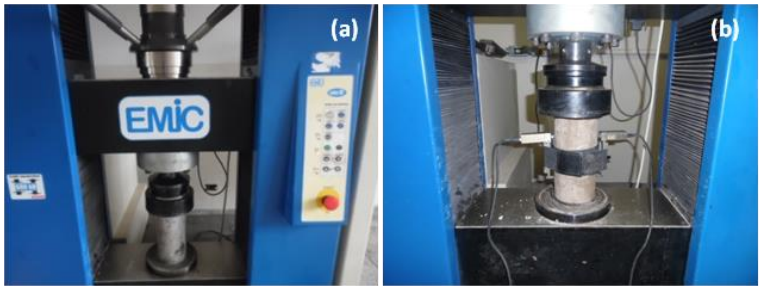

Figura 5-14: Ensaios de resistência à compressão (a) e módulo de elasticidade (b) dos concretos.

As tensões à compressão, módulos estáticos de elasticidade, deformações e curvas tensão deformação foram obtidos e/ou calculados por meio do software de automação de ensaios Tesc. Foram realizados ensaios em concretos nas idades de 28 e 91 dias, respeitando-se as tolerâncias estabelecidas na norma técnica ABNT NBR 5739:2007 (Tabela 5-18).

Tabela 5-18: Quantidades e idades dos corpos de prova de concreto utilizados nos ensaios de compressão e módulo de elasticidade.

Ensaio	Corpos de Prova (quantidade)	Idade
Ensaio de resistência à compressão	6	28
	6	91
Módulo estático de elasticidade à compressão	3	28
	6	91

5.2.2.4.3 Velocidade de propagação da onda ultrassônica

A determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica nos concretos foi realizada segundo a norma técnica ABNT NBR 8802:2013. Para tanto, foi utilizado o equipamento Control 58-E48 com transdutores (receptor e transmissor) de 50mm de diâmetro e frequência de 54kHz para obtenção do tempo de propagação da onda ultrassônica. Foram ensaiados corpos de prova cilíndricos de dimensões 10cm x 20cm (diâmetro x altura) com suas bases previamente retificadas para garantir perfeita planicidade das superfícies. Foi utilizado o método direto de posicionamento dos transdutores nas bases dos corpos de prova com aplicação de fina camada de gel como acoplante, proporcionando melhor contato com a superfície do concreto (Figura 5-15).

Figura 5-15: Ensaio para determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica nos concretos.

Os ensaios foram realizados nos mesmos corpos de prova utilizados nos ensaios para determinação das massas específicas e absorção (3 corpos de prova de cada concreto), nas condições de umidade secos em estufa à temperatura de (105 ± 5)^{o}C e saturados em água e submetidos a fervura em autoclave por um período de 5hs. Anteriormente aos ensaios, os corpos de prova secos em estufa ficaram em temperatura ambiente por um período de uma hora e por mesmo período após a saturação em água em ebulição, para possibilitar seu manuseio.

Após a calibração do equipamento segundo recomendações do fabricante, foram feitas três medições do tempo de propagação da onda ultrassônica em cada corpo de prova ensaiado, adotando-se para cada leitura o menor valor apresentado no painel do equipamento, após a estabilização dos valores dentro de uma variação de ± 1%. As velocidades de propagação da onda ultrassônica foram determinadas pela divisão das alturas dos corpos de prova (distância entre os condutores) pelas médias dos três tempos obtidos no equipamento (tempo de percurso da onda).

5.2.2.4.4 Profundidade de carbonatação – carbonatação acelerada

Os ensaios para determinação da profundidade da frente de carbonatação dos concretos produzidos foram realizados em câmara de carbonatação acelerada com umidade de 70%, temperatura de 25°C e teor de CO_2 de 10% controlados e mantidos durante o período dos ensaios (Figura 5-16).

Figura 5-16: Câmara de carbonatação acelerada utilizada.

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 10cm x 7cm (diâmetro x altura) obtidos de corpos de prova 10cm x 20cm (diâmetro x altura) moldados na ocasião da produção dos concretos e submetidos a cura por imersão em solução saturada de hidróxido de cálcio por período de 91 dias (Figura 5-17).

Figura 5-17: Corpos de prova dos concretos utilizados nos ensaios de carbonatação acelerada.

A preparação dos corpos de prova iniciou-se com um período de sazonamento para equilíbrio da umidade interna mantendo-os por sete dias em estufa ventilada a temperaturas entre 50°C e 60°C. Em seguida, foram resfriados a temperatura ambiente e preparados com aplicação de verniz para concreto nas superfícies, exceto em uma superfície da seção transversal escolhida para exposição ao CO_2. Os corpos de prova foram mantidos envelopados em filme plástico e acondicionados em sacos plásticos, para manutenção da umidade, até o início dos ensaios de carbonatação acelerada (Figura 5-18).

Figura 5-18: Preparação dos corpos de prova de concreto utilizados nos ensaios de carbonatação acelerada.

A evolução da profundidade de carbonatação foi acompanhada nos períodos de 1, 3, 7 e 14 dias de exposição ao CO_2. Ao término de cada período foi retirado um corpo de prova de cada traço e submetido à ruptura longitudinal por meio de prensa hidráulica. A visualização das áreas carbonatadas nas superfícies de ruptura foi possibilitada pela aspersão de solução de fenoftaleina a 1%. A profundidade de carbonatação de cada concreto foi determinada pela média de três medidas em uma das superfícies de ruptura (corte longitudinal) utilizando paquímetro (Figura 5-19).

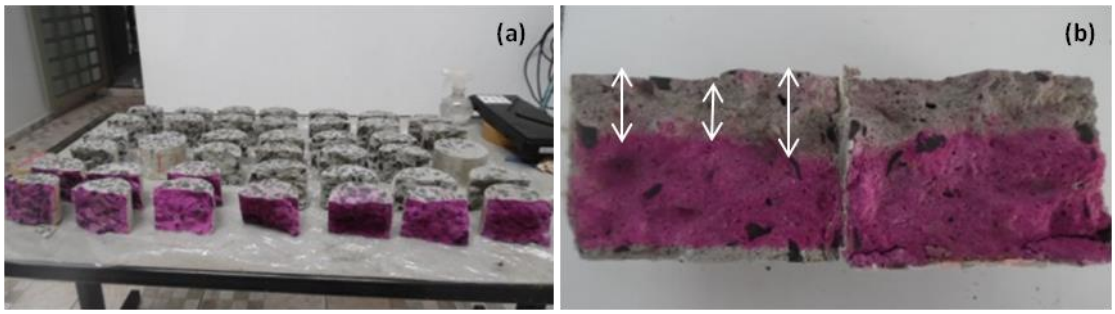

Figura 5-19: Ação da solução de fenoftaleina (a) e profundidades de carbonatação (b) nos corpos de prova de concreto.

Para cada traço ensaiado, um corpo de prova foi utilizado na determinação da umidade do concreto no momento de início da exposição ao CO_2. Essa umidade foi obtida a partir da diferença de massa no inicio dos ensaios e após a secagem em estufa à temperatura de (105 ± 2) ^{o}C.

5.2.2.4.5 Condutividade térmica

A norma técnica empregada na determinação da condutividade térmica dos concretos foi a ASTM E1530-11 e o equipamento utilizado foi o DTC-300 da TA Instruments.

Foi ensaiado um corpo de prova cilíndrico de 5cm x 2,4cm (diâmetro x altura) de cada traço de concreto extraído por meio de broca circular diamantada de corpos de prova 10cm x 20cm (diâmetro x altura) moldados na ocasião da produção dos concretos e após cura de 91 dias. Os corpos de prova extraídos permaneceram em estufa ventilada a temperaturas entre 50°C e 60°C por um período de 14 dias para estabilização de sua umidade interna e posteriormente acondicionados em embalagens plásticas até o momento dos ensaios.

A preparação para os ensaios consistiu na aplicação de um transdutor de fluxo de calor (Heat Flux Transducer – HFT) na forma pastosa nas faces transversais dos corpos de prova, visto que o processo de extração garantiu a planicidade e paralelismo das faces transversais dos mesmos (Figura 5-20).

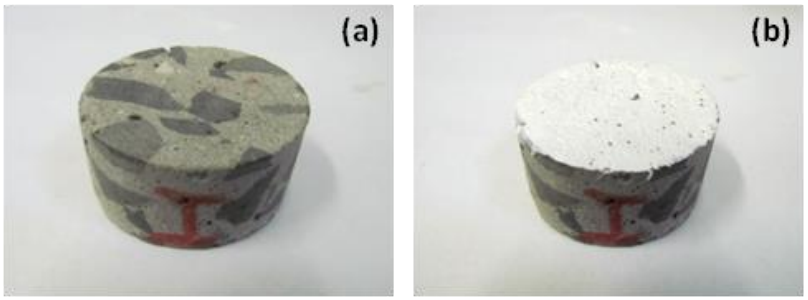

Figura 5-20: Corpos de prova utilizados nos ensaios de condutividade térmica dos concretos: sem HFT (a) e com HFT (b).

Os corpos de prova foram posicionados no equipamento e pressionados entre duas placas a temperatura de 30°C proporcionando um fluxo de calor. A condutividade térmica foi determinada a partir desse fluxo de calor, que atravessou o corpo de prova, medido por meio de sensores de temperatura nas superfícies das placas (Figura 5-21).

Figura 5-21: Ensaio de condutividade térmica dos concretos.

5.2.2.4.6 Análise microestrutural – MicroCT

Para dimensionamento, quantificação e análise da distribuição das bolhas de ar incorporadas nos concretos estudados, foi empregada a tecnologia de microtomografia computadorizada de raios X – MicroCT. O equipamento utilizado foi o Xradia Versa XRM-510 da marca Zeiss (Figura 5-22).

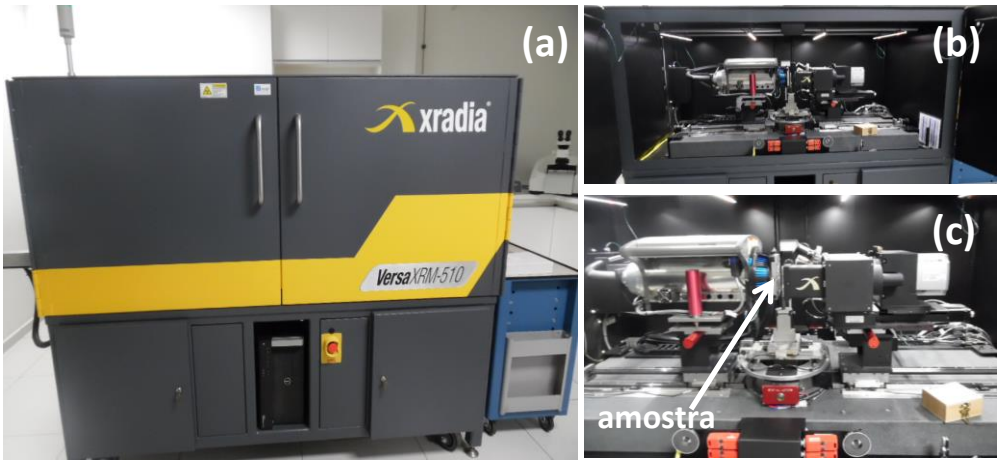

Figura 5-22: Equipamento de MicroCT: vista externa (a), vista interna (b) e posicionamento da amostra (c).

As amostras utilizadas possuíam dimensões de 2,4cm x 5,0cm (diâmetro x altura) e foram extraídas por meio de broca circular diamantada de corpos de prova 10cm x 20cm (diâmetro x altura) mantidos em cura por imersão em solução saturada de hidróxido de cálcio por período de 91 dias.

Foi utilizada uma amostra de cada concreto e o volume cilíndrico analisado foi de 16mm x 20mm (diâmetro x altura). A preparação das amostras consistiu, após extração, em secagem em estufa ventilada a temperaturas entre 50°C e 60°C por um período de 14 dias para estabilização de sua umidade interna e posteriormente acondicionados em embalagens plásticas até o momento dos ensaios.

A partir das microtomografias obtidas foi possível a obtenção de imagens bidimensionais e tridimensionais das amostras analisadas. A análise dessas imagens, por meio do *software* de processamento de imagens FEI Avizo 9.0, permitiu, inicialmente, a obtenção dos volumes de concreto, argamassa, vazios e porosidades das argamassas dos concretos, além das quantidades e dimensões de poros (vazios) presentes nas amostras. Todos dados foram registrados em planilhas geradas pelo próprio software.

Os parâmetros utilizados na aquisição das microtomografias são mostrados na Tabela 5-19 e o fluxograma simplificado do processamento de imagens no software Avizo 9.0 é mostrado na Figura 5-23.

Tabela 5-19: Parâmetros utilizados na aquisição das microtomografias dos concretos.

Parâmetros de aquisição das microtomografias	
Volume analisado - diâmetro x altura	16 x 20 mm
Tempo de aquisição	00h45m
Lente objetiva	0.39X
Condições da fonte	120kV-10W
Resolução - voxel size	20 µm
Nº de projeções	1000
Tempo de exposição	2 s
Resol. Detector	1024x1024 px
Campo de visão - FOV	21 x 21 mm
Transmissão	23%
Filtro	Sem filtro
Dist. Fonte-amostra	40 mm
Dist. Amostra-detector	95 mm

* a transmissão para o traço 0 foi 23% e para o traço III foi 26%; para os demais 30%.

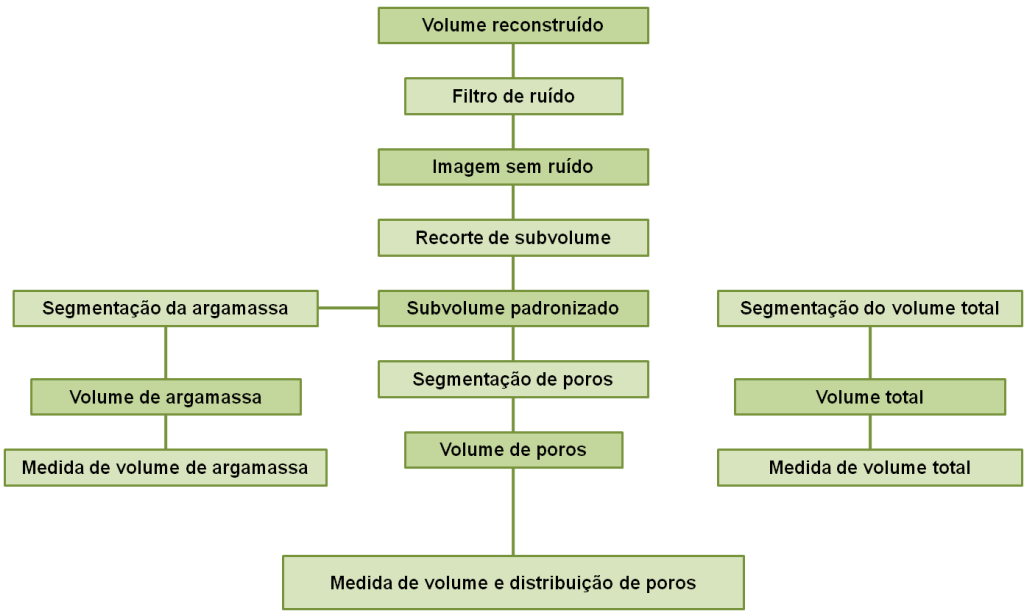

Figura 5-23: Fluxograma do processamento de imagens no software Avizo 9.0.

As principais etapas do processamento das imagens consistiram em:

1. Suavização de ruído na imagem – filtro Non-local Means;
2. Recorte de subvolume padronizado para todas as amostras, desprezando as bordas com eventuais artefatos (defeitos) de imagem;
3. Segmentação por limiares com base no contraste de atenuação de raios X, discretizando os volumes de poros, argamassa e agregados graúdos (Figura 5-24);
4. Determinação do volume de poros, distribuição de tamanho (diâmetro de esfera equivalente) e esfericidade dos mesmos;
5. Determinação do volume de argamassa.

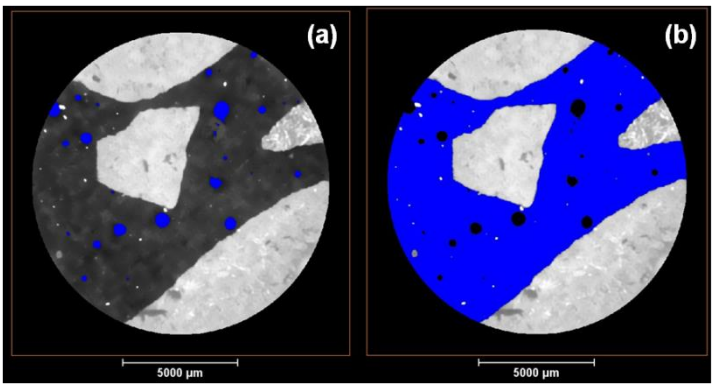

Figura 5-24: Exemplo de discretização de poros (a) e argamassa (b).

Para o dimensionamento e determinação das formas dos poros presentes nas argamassas dos concretos foram utilizadas as grandezas Diâmetro Equivalente (D_{eq}.), que se refere ao diâmetro de uma esfera de igual volume do poro e Esfericidade (Φ), que mede o afastamento da forma do poro da forma esférica. Alguns poros, visualmente esféricos, foram selecionados para identificação das bolhas de ar incorporadas pelo aditivo. Esses poros com esfericidades entre 0,95 e 1 foram considerados bolhas de ar incorporadas (Figura 5-25). A partir das quantidades e dimensões dessas bolhas, foram realizadas análises e correlações dos valores encontrados com as demais propriedades dos concretos.

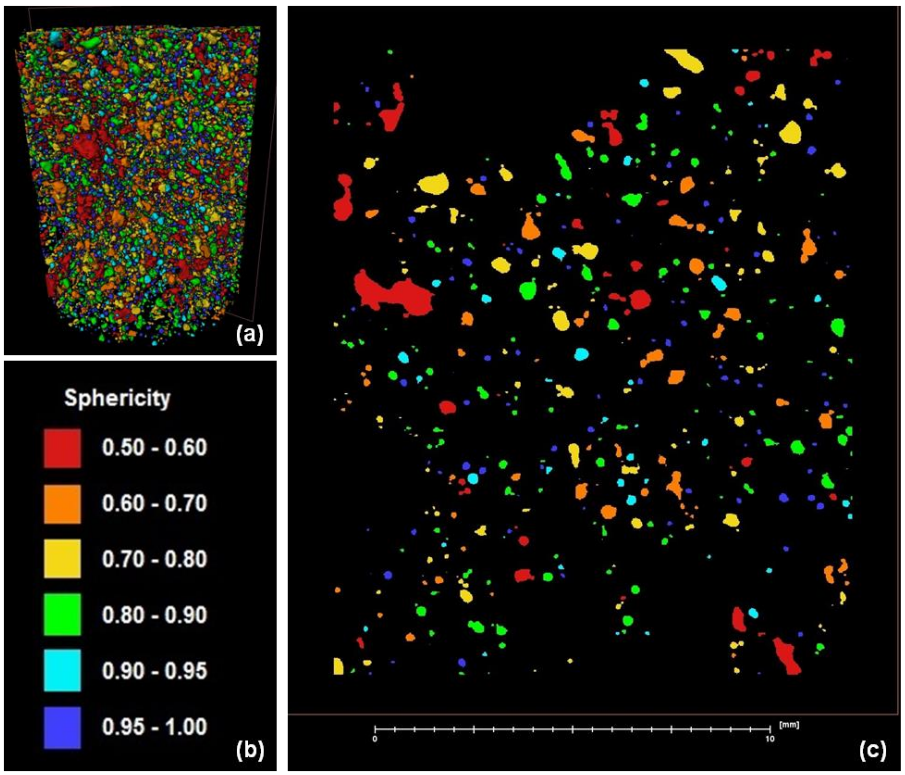

Figura 5-25: Poros (a), esfericidades (b) e identificação das bolhas (c).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 ETAPA 1 - EFICIÊNCIA NA INCORPORAÇÃO DE AR DOS ADITIVOS

Neste tópico são apresentados os resultados e análises obtidos dos ensaios realizados para avaliação dos aditivos quanto à eficiência na incorporação de ar em pastas de cimento: determinação da massa específica, absorção e índice de vazios das pastas e quantificação e dimensionamento das bolhas de ar (quantidades e dimensões) por meio de microscopia óptica.

6.1.1 Determinação da massa específica – estado fresco

A utilização dos teores máximos dos aditivos (traço IV) recomendados pelos fabricantes resultou na incorporação de ar às misturas reduzindo suas massas específicas em comparação à mistura controle. As pastas com aditivos B, C e D obtiveram valores de suas massas específicas muito próximos ao concreto controle (traço 0). O aditivo A foi o que proporcionou maior redução nos valores das massas específicas das pastas de cimento (Figura 6-1).

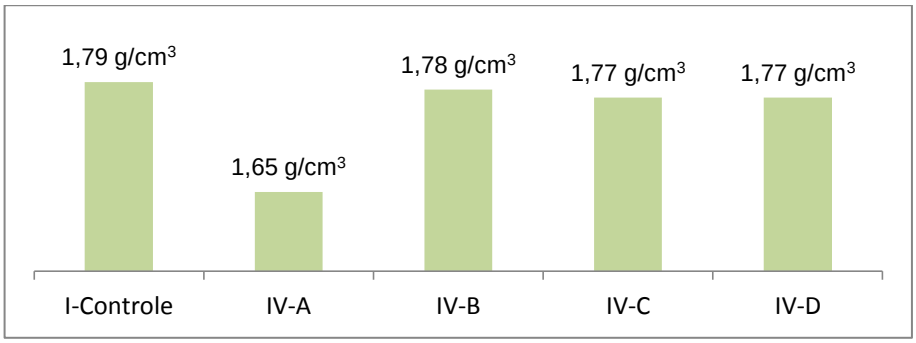

Figura 6-1: Massas específicas das pastas de cimentono estado fresco: Traços I e IV.

As massas específicas das pastas com variação de teor dos aditivos A e B apresentaram valores menores que a pasta controle. Para ambos aditivos, os valores determinados apresentaram pequena variação entre os teores utilizados e constante redução das massas específicas à medida que se aumentou o teor de aditivo. A massa específica da pasta com o teor máximo do aditivo A foi um pouco maior em relação aos demais teores. O aditivo B não apresentou diferença significativa de massa específica no estado fresco em comparação à pasta controle.

O aditivo A proporcionou maior incorporação de ar às misturas nos teores utilizados. (Figura 6-2).

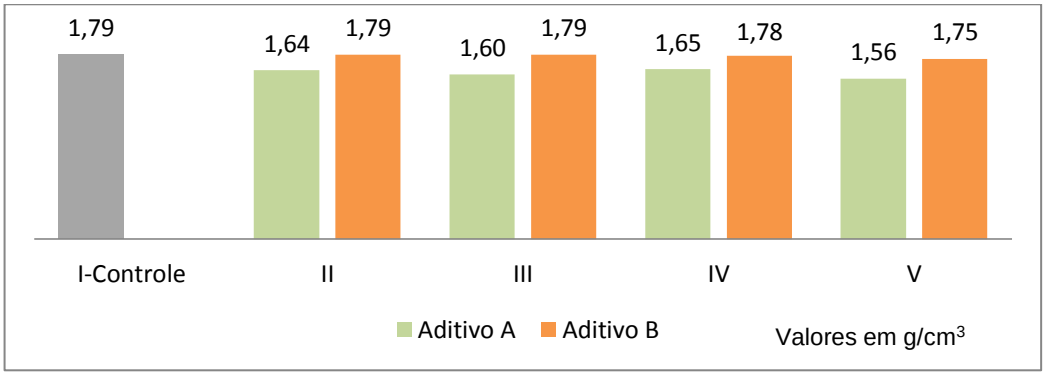

Figura 6-2: Massa específica das pastas de cimento no estado fresco: aditivos A e B.

6.1.2 Determinação da massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios – estado endurecido

As variações dos valores obtidos para a massa específica da amostra seca e da amostra após saturação, das pastas as quais foi adicionado o teor máximo dos aditivos, apresentaram-se proporcionais para todos os aditivos. Pode-se observar uma redução maior dos valores para as pastas dosadas com o aditivo A em relação à pasta controle, nas três propriedades determinadas (Figuras 6-3 e 6-4).

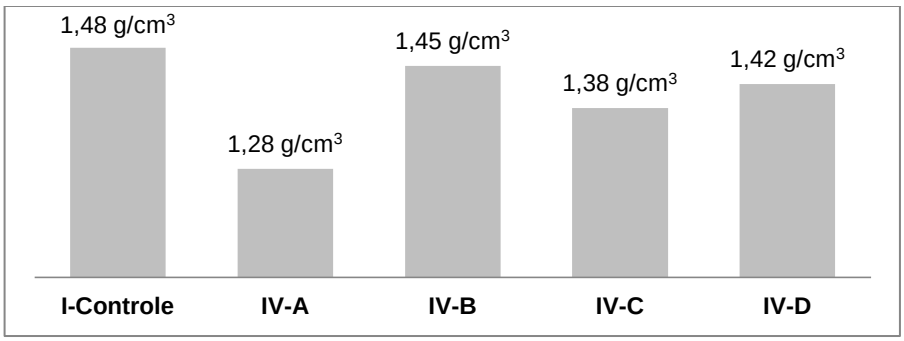

Figura 6-3: Massa específica das pastas de cimento no estado endurecido: amostra seca.

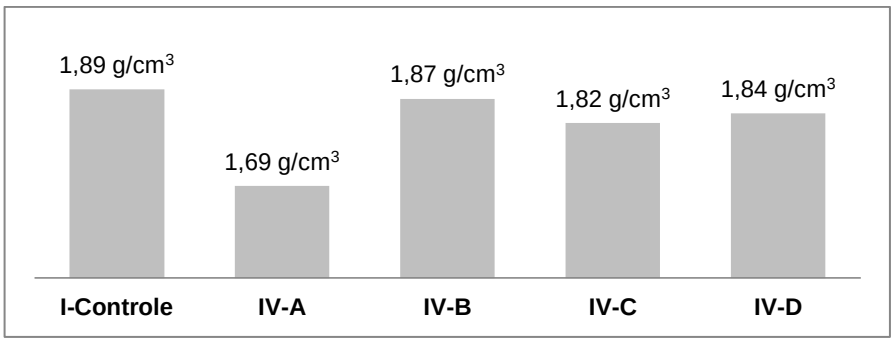

Figura 6-4: Massa específica das pastas de cimento no estado endurecido: amostra após saturação.

Na comparação das massas específicas da amostra seca e da amostra após saturação, das pastas controle e com variação dos teores de aditivos A e B, foi observado que a variação dos valores manteve-se proporcional para os dois aditivos. A pasta com o aditivo A apresentou valores de massas específicas menores (Figuras 6-5 e 6-6).

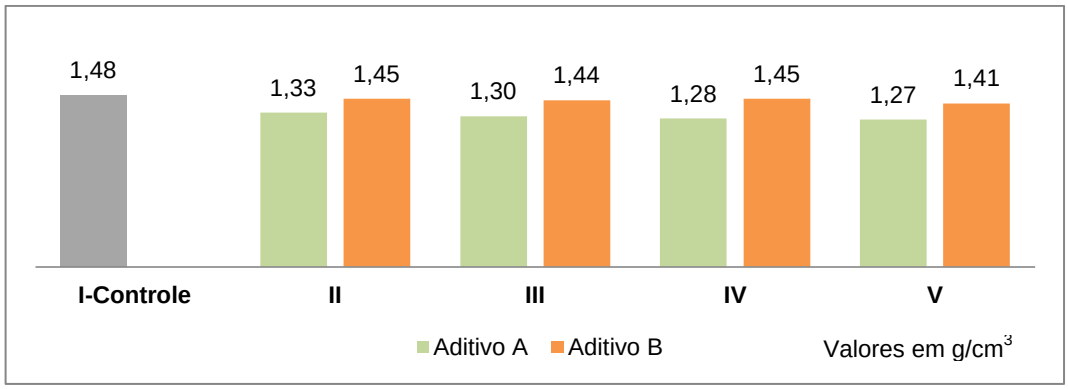

Figura 6-5: Massa específica das pastas de cimento no estado endurecido: amostra seca - aditivos A e B.

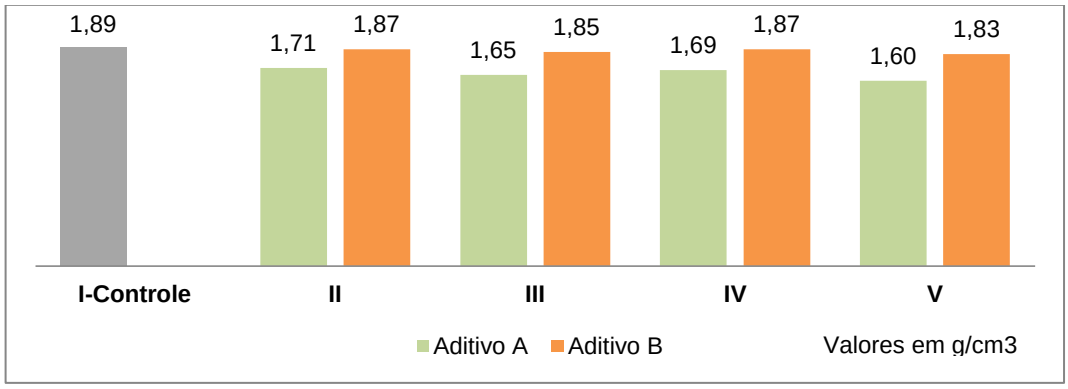

Figura 6-6: Massa específica das pastas de cimento no estado endurecido: amostra após saturação - aditivos A e B.

Os valores de absorção de água por imersão, obtidos para as pastas com o teor máximo de aditivo A e C, foram maiores quando comparados com a pasta controle e as pastas com o teor máximo dos aditivos B e D (Figura 6-7). A pasta com aditivo C apresentou maior índice de vazios (Figura 6-8).

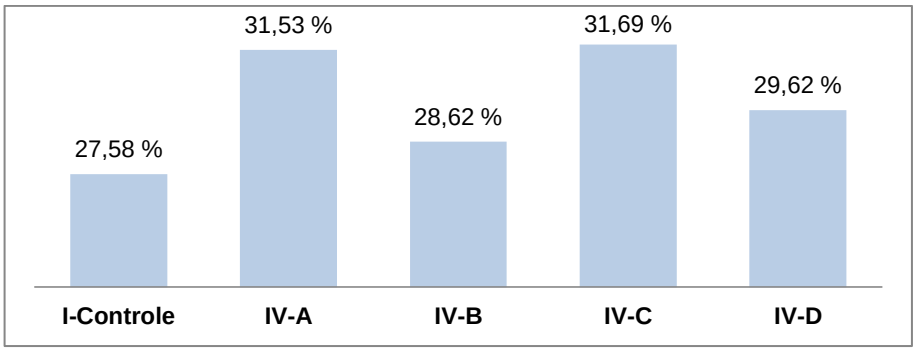

Figura 6-7: Absorção de água das pastas de cimento no estado endurecido.

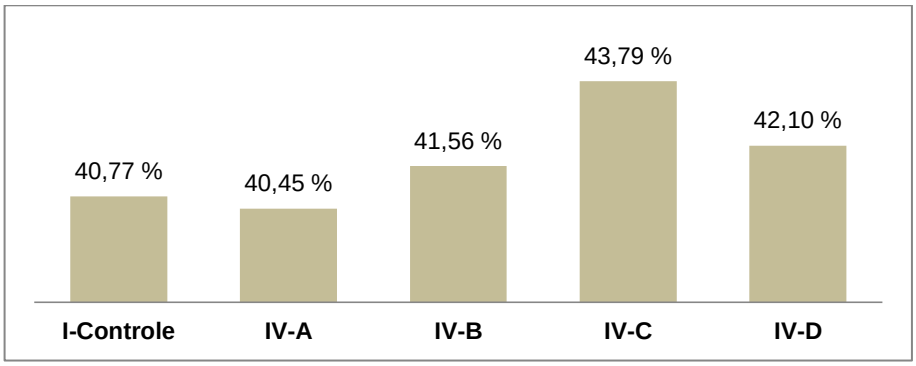

Figura 6-8: Índice de vazios das pastas de cimento no estado endurecido.

Na comparação entre a absorção de água por imersão obtida para as pastas com os aditivos A e B, observou-se que as pastas com aditivo A apresentaram valores menores em relação à pasta controle e aquelas com o aditivo B. Os valores da absorção obtidos após imersão e posterior fervura mostraram-se muito próximos, indicando eficiência no procedimento de saturação dos corpos de prova (Figuras 6-9 e 6-10).

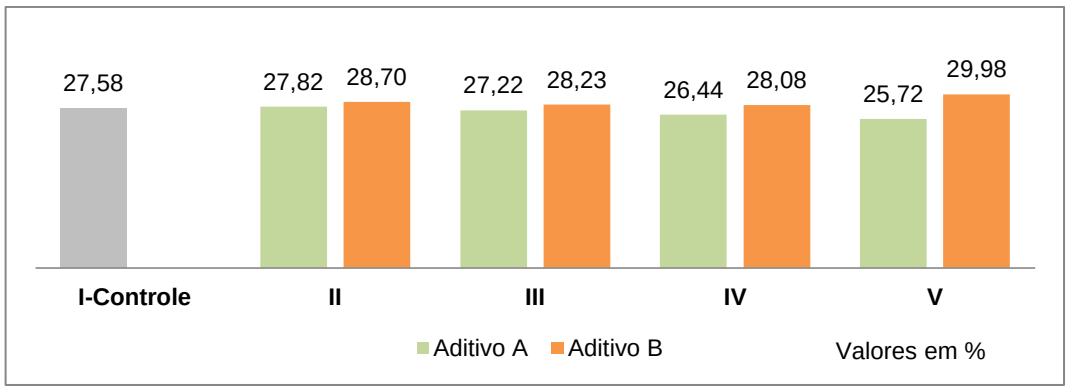

Figura 6-9: Absorção de água das pastas de cimento no estado endurecido: amostra após imersão - aditivos A e B.

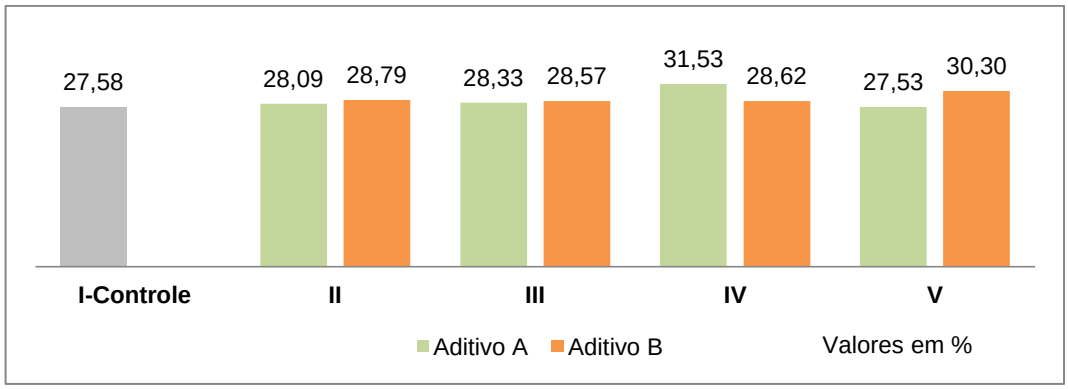

Figura 6-10: Absorção de água das pastas de cimento no estado endurecido:amostra após imersão e fervura - aditivos A e B.

Os valores dos índices de vazios das pastas com os aditivos A e B obtidos para as amostras após saturação e posterior fervura, apresentaram pequena variação. As pastas com o aditivo A apresentaram índices de vazios menores do que a pasta controle e as pastas com o aditivo B (Figuras 6-11 e 6-12).

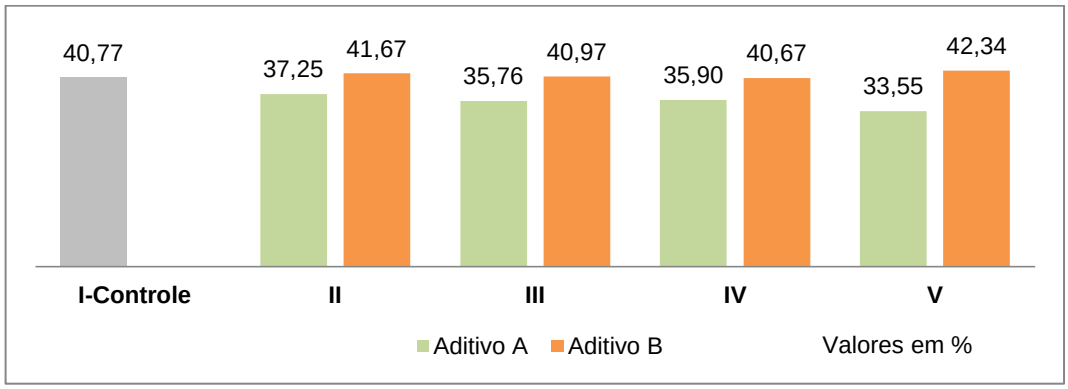

Figura 6-11: Índice e vazios das pastas de cimento no estado endurecido: amostra após saturação - aditivos A e B.

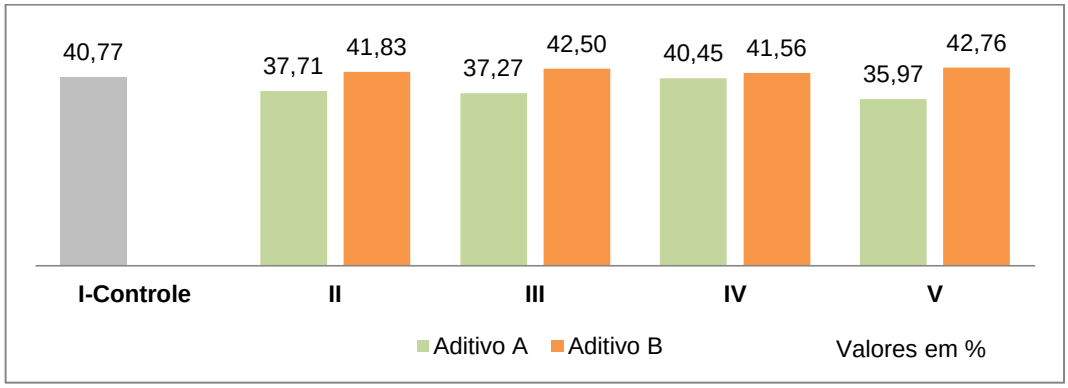

Figura 6-12: Índice de vazios das pastas de cimento no estado endurecido: amostra após saturação e fervura - aditivos A e B.

6.1.3 Análise microestrutural – Microscopia óptica

A Tabela 6-1 mostra as quantidades e medidas (tamanhos) das bolhas (poros) de ar observadas nas micrografias das amostras das pastas controle e com os teores máximos dos aditivos A e B. A Figura 6-13 mostra o comparativo da quantidade total de bolhas de ar incorporadas às pastas utilizando os teores máximos dos aditivos A e B.

Tabela 6-1: Tamanhos e quantidades de bolhas de ar observadas nas amostras das pastas de cimento dos traços controle e IV: aditivos A e B.

PASTAS ADITIVO / TRAÇO	DIÂMETRO DAS BOLHAS (µm)						
	0-100	100 - 200	200 - 300	300 - 400	400 - 500	> 500	Total
Controle - I	10	4	4	0	0	0	18
A – IV	691	503	76	2	2	0	1274
B – IV	140	52	5	4	0	0	201

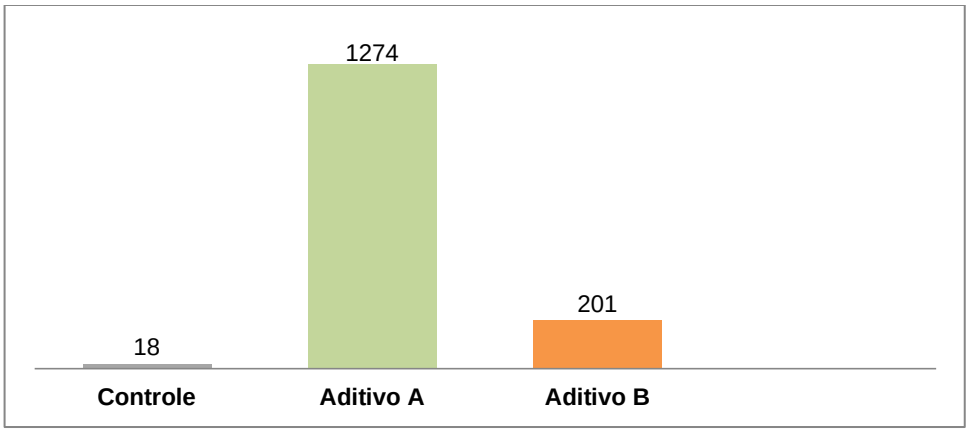

Figura 6-13: Quantidade total de bolhas de ar observadas nas amostras das pastas de cimento dos traços controle e IV: aditivos A e B.

A partir dos resultados observa-se que há acréscimo na quantidade de bolhas à medida que se incorpora o aditivo às misturas. No caso do aditivo B, há diminuição da quantidade de bolhas a partir do teor máximo (traço IV) recomendado pelo fabricante.

Os tamanhos e quantidades de bolhas de ar observadas nas imagens obtidas das pastas controle e as pastas com os aditivos A e B são mostrados na Tabela 6-2.

Tabela 6-2: Tamanhos e quantidades de bolhas de ar observadas nas amostras das pastas de cimento dos traços controle, II, III, IV e V: aditivos A e B.

PASTAS ADITIVO / TRAÇO	DIÂMETRO DAS BOLHAS (µm)						
	0-100	100 - 200	200 - 300	300 - 400	400 - 500	> 500	Total
Controle - I	10	4	4	0	0	0	18
A – II	293	284	52	7	2	0	638
B – II	147	75	8	6	3	1	240
A – III	622	532	95	1	1	0	1251
B – III	156	63	9	4	0	0	232
A – IV	691	503	76	2	2	0	1274
B – IV	140	52	5	4	0	0	201
A – V	608	641	109	3	0	0	1361
B – V	109	30	10	8	10	0	167

As Figuras 6-14, 6-15, 6-16 e 6-17 mostram as comparações de tamanhos e quantidades de bolhas entre os aditivos A e B para os teores de aditivos utilizados.

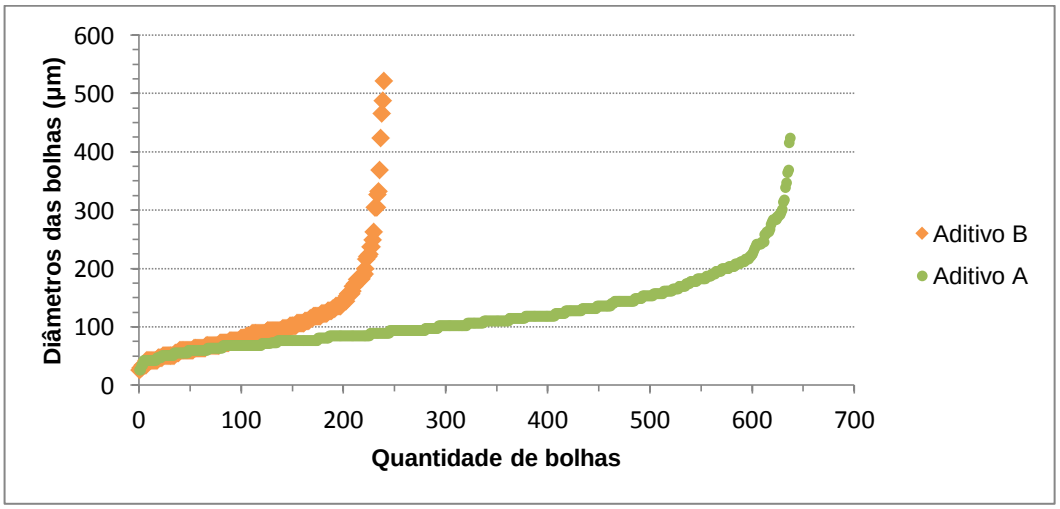

Figura 6-14: Tamanhos e quantidades de bolhas de ar observadas na amostra da pasta de cimento do traço II: aditivos A e B.

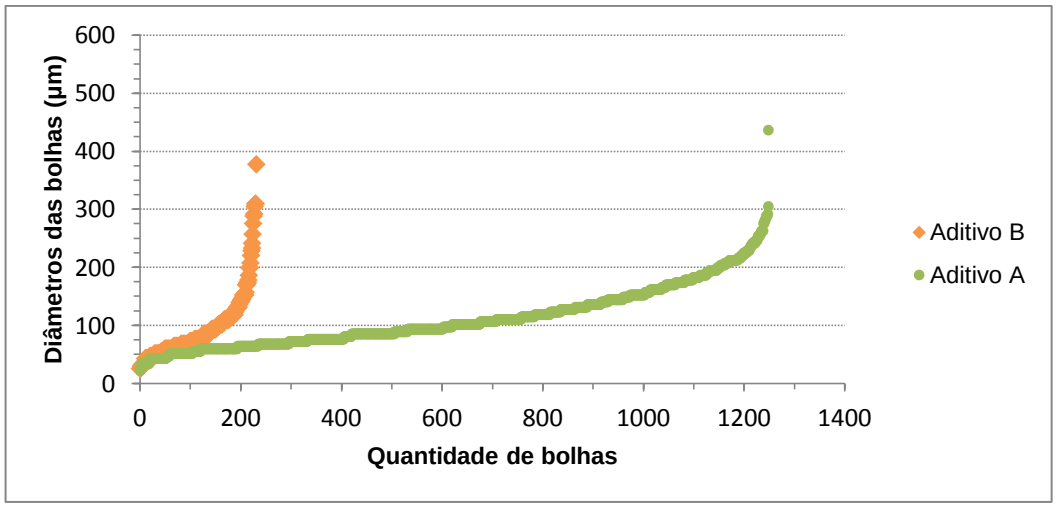

Figura 6-15: Tamanhos e quantidades de bolhas de ar observadas na amostra da pasta de cimento do traço III: aditivos A e B.

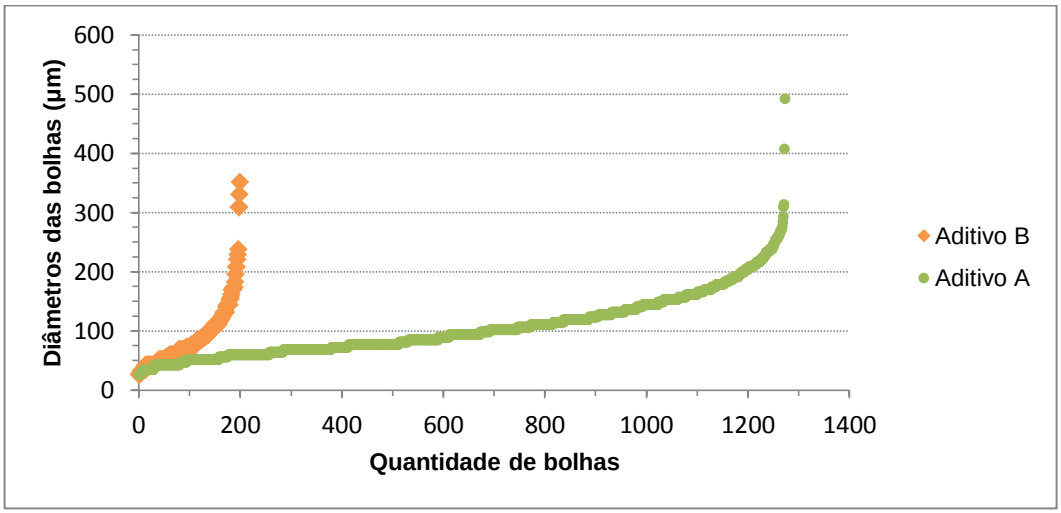

Figura 6-16: Tamanhos e quantidades de bolhas de ar observadas na amostra da pasta de cimento do traço IV: aditivos A e B.

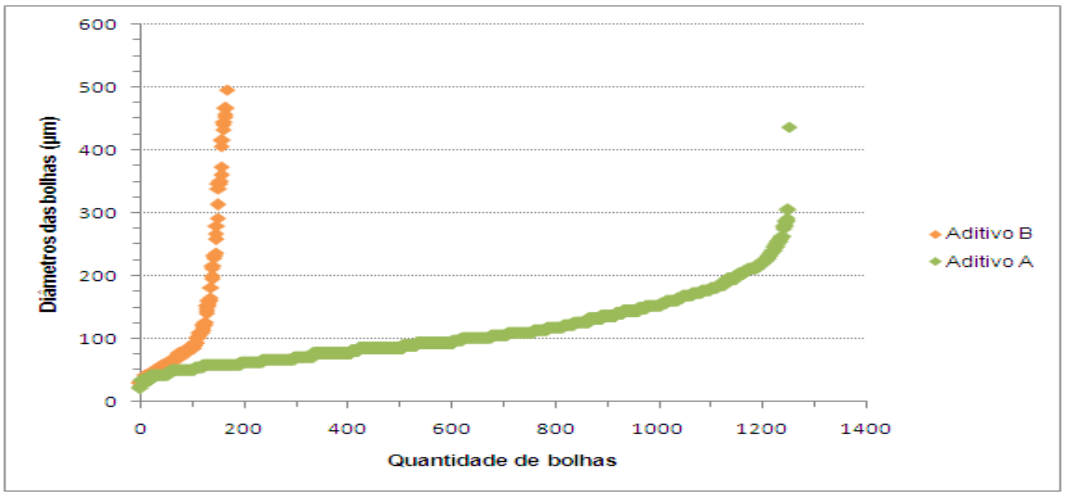

Figura 6-17: Tamanhos e quantidades de bolhas de ar observadas na amostra da pasta de cimento do traço V: aditivos A e B.

A análise microscópica mostrou aumento evidente na quantidade de bolhas de ar no grupo de pastas com aditivo, em comparação com a pasta sem aditivo. Não foi observada diferença no padrão de morfologia e distribuição das bolhas nas superfícies de análise das amostras estudadas. Todas as bolhas observadas apresentaram aspecto esférico regular, com uma concentração maior de bolhas com diâmetros até 200 μm. A quantidade de bolhas de dimensões acima de 200 μm para cada traço foi relativamente pequena se comparada à quantidade total de bolhas por traço.

Na análise das micrografias das pastas com o teor máximo dos aditivos C e D, não foram observadas alterações nas dimensões e distribuição das bolhas de ar incorporadas. Nas imagens analisadas não foi observada concentração maior de determinado tamanho de bolhas para um aditivo, especificamente. As dimensões das bolhas encontram-se na mesma faixa de tamanho para os aditivos analisados. Nas imagens obtidas, observou-se coalescência de bolhas, principalmente nas pastas com o aditivo A. O aditivo **A,** a base de resinas sintéticas, proporcionou maior incorporação de bolhas de ar às misturas em relação aos demais aditivos analisados (Figura 6-18). Esse foi o aditivo escolhido para utilização na etapa seguinte deste trabalho.

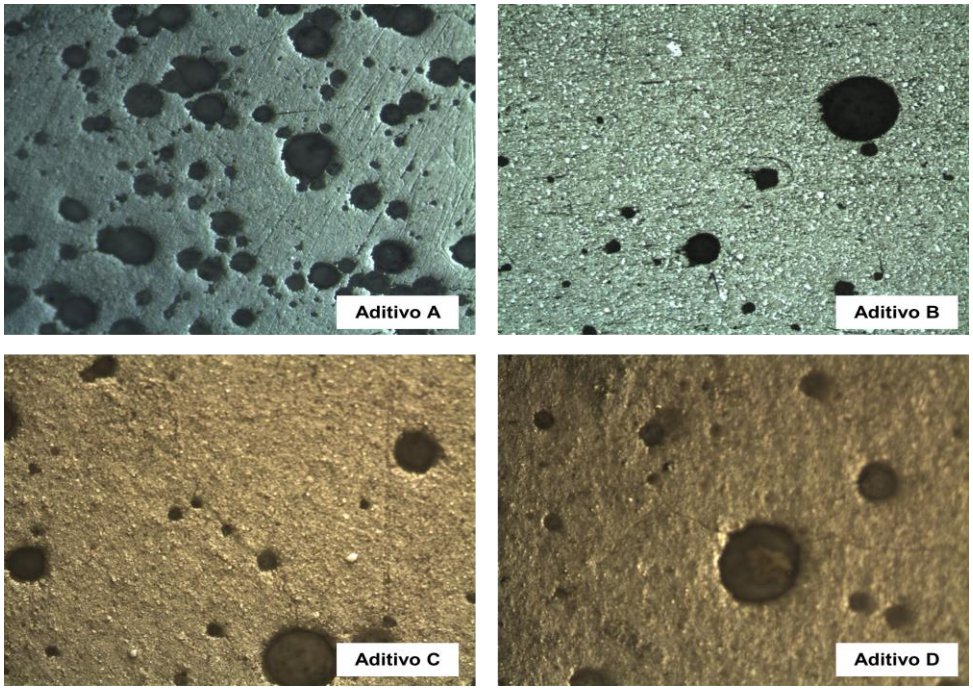

Figura 6-18: Micrografias das pastas de cimento do traço IV obtidas por meio de Microscopia óptica (50X): aditivos A, B, C e D.

6.2 ETAPA 2 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DOS CONCRETOS

6.2.1 Dosagem e produção dos concretos

A Tabela 6-3 mostra os traços dosados e produzidos com respectivos consumos de cimento e teores de agregados e sólidos. Todos concretos apresentaram consumos de cimento e teores de agregados e sólidos diferentes, com exceção dos concretos referência e padrões que apresentaram teores de agregados iguais.

A Figura 6-19 mostra que nos concretos modificados houve diminuição dos teores de agregados à medida que se aumentou o teor de aditivo. Os teores de sólidos diminuíram à medida que se aumentou o teor de aditivo, tanto nos concretos padrões quanto os modificados (Figura 6-20).

Tabela 6-3: Traços, consumos de cimento e teores de agregados e sólidos dos concretos.

Traço	**Traços** (cimento : areia : brita : água : aditivo)		**Consumo de cimento** (kg/m^3)	**Teor de agregados** (%)*	**Teor de sólidos** (%)**
	Massa	**Volume**			
0	1,00 : 1,31 : 2,62 : 0,42 : 0,00	1,00 :1,54 : 2,88 : 1,31 : 0,00	454,72	65,7	79,0
I	1,00 : 1,31 : 2,62 : 0,42 : 0,01	1,00 :1,54 : 2,88 : 1,31 : 0,03	416,23	65,7	72,3
II	1,00 : 1,31 : 2,62 : 0,42 : 0,03	1,00 :1,54 : 2,88 : 1,31 : 0,09	384,72	65,7	66,8
III	1,00 : 1,31 : 2,62 : 0,42 : 0,07	1,00 :1,54 : 2,88 : 1,31 : 0,21	331,42	65,7	57,6
I M	1,00 : 1,08 : 2,17 : 0,42 : 0,01	1,00 : 1,28 : 2,38 : 1,31 : 0,03	457,58	61,3	68,3
II M	1,00 : 0,90 : 1,80 : 0,42 : 0,03	1,00 : 1 06 : 1,98 : 1,31 : 0,09	472,39	56,8	61,2
III M	1,00 : 0,51 : 1,02 : 0,42 : 0,07	1,00 : 0,60 ; 1,12 ; 1,31 ; 0,21	556,56	42,7	48,6

* % em relação ao volume total dos materiais utilizados na mistura
* % em relação ao volume total da mistura

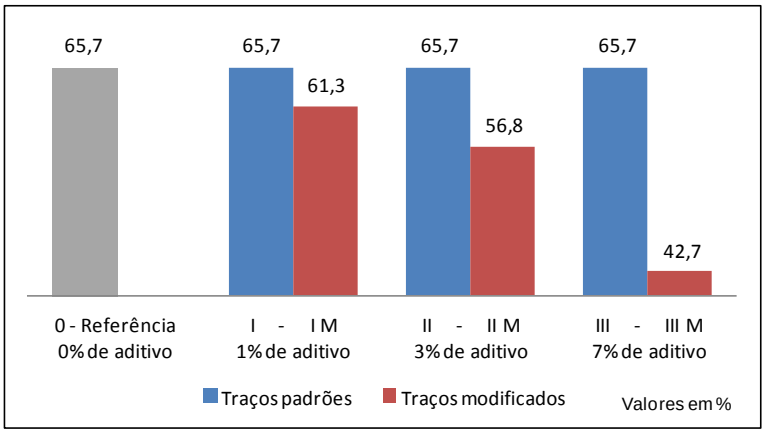

Figura 6-19: Teor de agregados dos concretos.

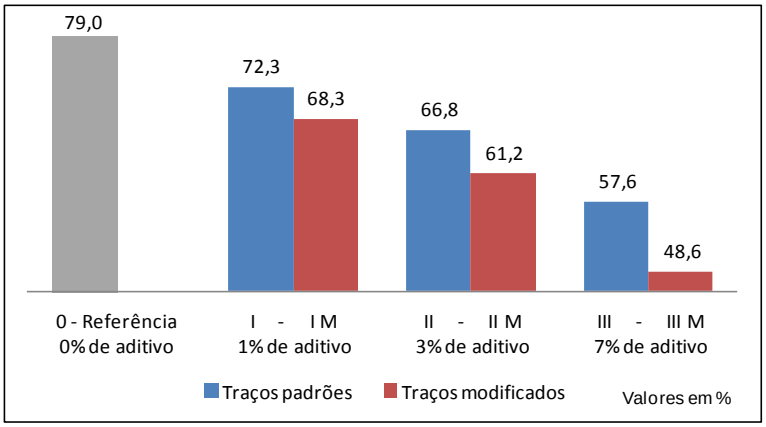

Figura 6-20: Teor de sólidos dos concretos.

Nos traços padrões, ao aumentar o teor de aditivo houve, por consequência, a redução do consumo de cimento por metro cúbico. As reduções do consumo de cimento observadas entre os traços padrões são devidas ao aumento do volume em decorrência do acréscimo de aditivo IA. Nos concretos modificados os aumentos do consumo de cimento são devidos não só ao aumento de aditivo IA, mas também pela redução significativa dos teores de agregados nas misturas (Figura 6-21).

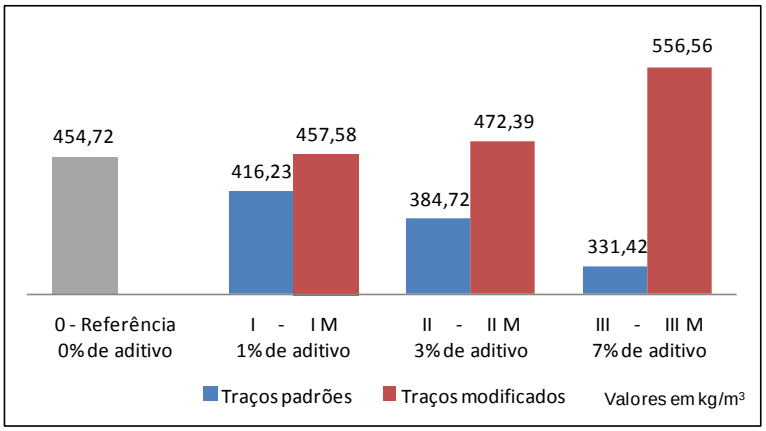

Figura 6-21: Consumo de cimento dos concretos (por m^3 de concreto).

6.2.2 Concreto no estado fresco

Os resultados obtidos nos ensaios de teor de ar pelo método pressométrico, massa específica e consistência pelo abatimento do tronco de cone (Slump Test) realizados nos concretos no estado fresco, são mostrados na Tabela 6-4.

Tabela 6-4: Resultados obtidos nos ensaios realizados nos concretos no estado fresco.

CONCRETO		ENSAIOS		
Traço	**% Aditivo**	**Teor de ar** (%)	**Massa específica** (kg/m^3)	**Abatimento** (mm)
0	0	1,9	2490,20	36
I	1	10,2	2300,65	40
II	3	17,0	2150,33	133
III	7	28,5	1915,03	133
IM	1	12,5	2196,08	49
IIM	3	19,0	2039,22	150
IIIM	7	28,0	1836,60	>200

Os teores de ar dos concretos com ar incorporado foram maiores do que o concreto referência, diretamente proporcionais aos teores de aditivo utilizados e muito próximos para os traços com os mesmos teores de aditivo (Figura 6-22).

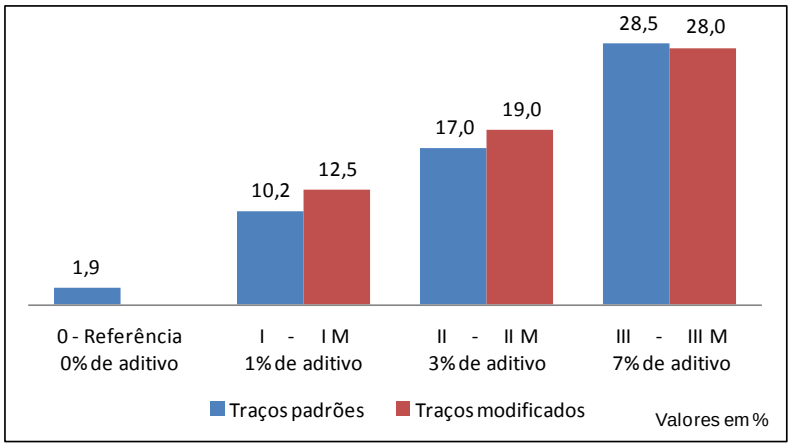

Figura 6-22: Resultados dos teores de ar.

Tanto os traços padrões como os modificados apresentaram aumento do teor de ar à medida que se aumentou o teor de aditivo conforme também observaram Agnesini (1998) e Neville (2016). Entretanto, não foi possível no presente estudo verificar o ponto a partir do qual a quantidade de aditivo não influencia a quantidade de vazios

incorporados. A tendência entre os teores de aditivo e ar pode ser observada na Figura 6-23.

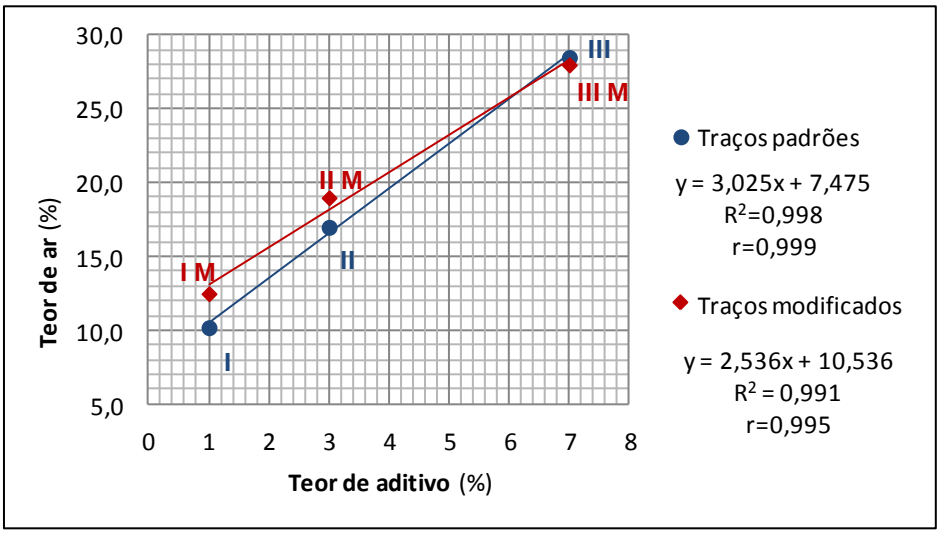

Figura 6-23: Teor de aditivo x Teor de ar: traços padrões e modificados.

Nos traços padrões, como esperado, o aumento do teor de ar promoveu, por consequência, a redução do consumo de cimento por metro cúbico, enquanto nos traços modificados, a diminuição do teor de agregados além do aumento do teor de ar geraram aumento no consumo de cimento por metro cúbico (Tabela 6-5).

Tabela 6-5: Consumos de cimento e teores de agregados e ar dos concretos.

Traço	Consumo de cimento (kg/m^3)	Teor de agregados (%)*	Teor de ar (%)
0	454,72	65,7	1,9
I	416,23	65,7	10,2
II	384,72	65,7	17,0
III	331,42	65,7	28,5
I M	457,58	61,3	12,5
II M	472,39	56,8	19,0
III M	556,56	42,7	28,0

* % em relação ao volume total dos materiais utilizados na mistura

Entretanto, a tendência do teor de ar continuou seguindo o teor de aditivo, indicando que o consumo de cimento, individualmente, não mantém uma relação direta com o teor de ar (Figura 6-24).

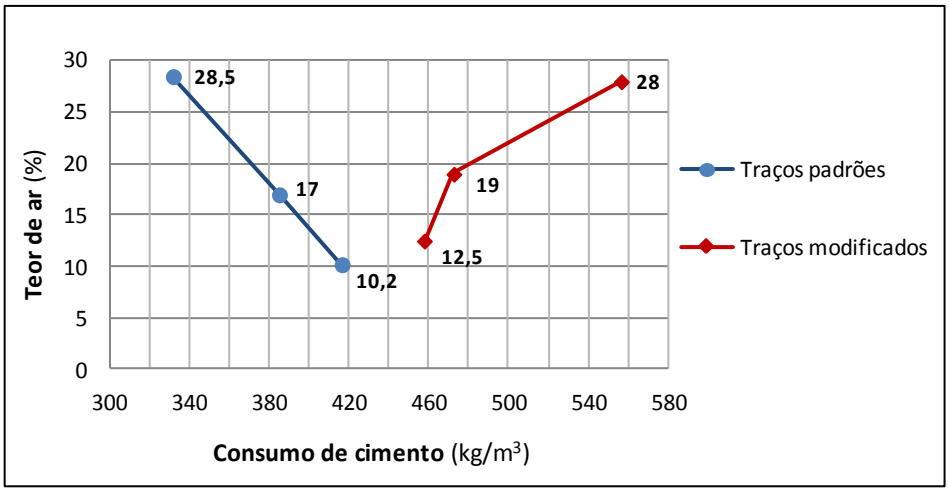

Figura 6-24: Consumo de cimento x Teor de ar: traços padrões e modificados.

Os ensaios para determinação das massas específicas dos concretos mostraram eficiência do aditivo utilizado, resultando na diminuição das mesmas. As massas específicas dos concretos diminuíram à medida que se aumentou o teor de aditivo, nos concretos padrões e modificados (Figura 6-25). Os concretos modificados, com menores teores de agregados, apresentaram massas específicas menores em relação aos concretos padrões.

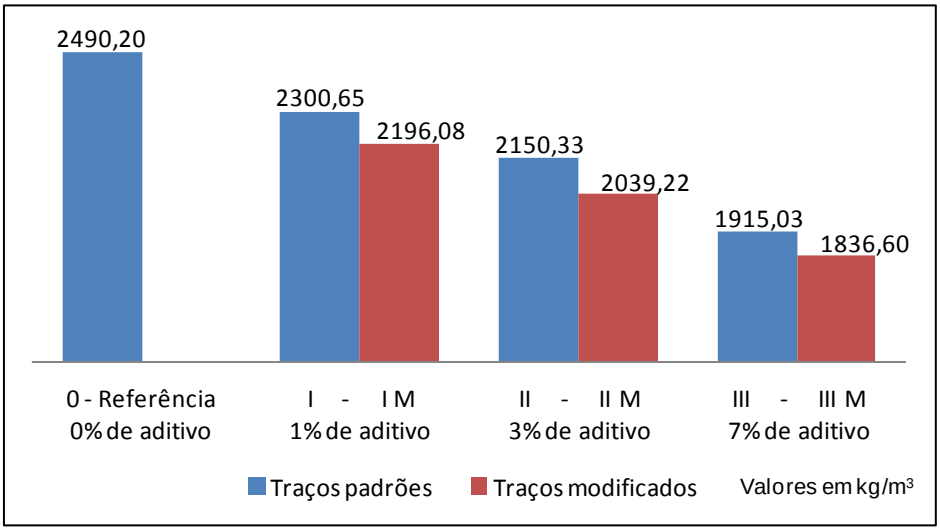

Figura 6-25: Resultados das massas específicas dos concretos no estado fresco.

A Figura 6-26 mostra forte correlação negativa existente entre o teor de ar e massa específica dos concretos com ar incorporado.

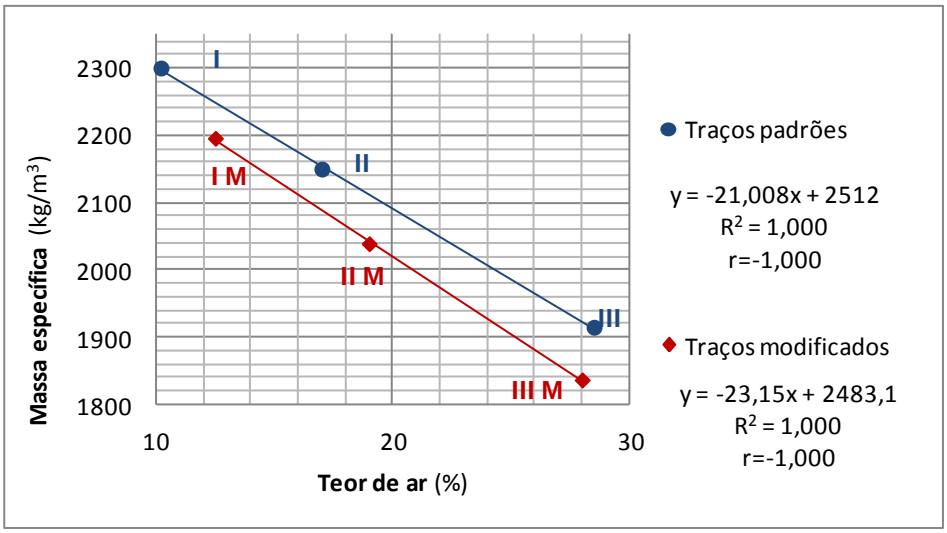

Figura 6-26: Teor de ar x Massa específica: traços padrões e modificados.

Os concretos com ar incorporado apresentaram abatimentos maiores em relação ao concreto referência e aumentaram na medida em que foi aumentado o teor de aditivo. Isso demonstra a ação do aditivo incorporador de ar na melhoria da trabalhabilidade, corroborando com os resultados de Aïtcan (2000), Barfield e Ghafoori (2012) e Neville e Brooks (2013). Os concretos modificados, com menores teores de agregados, apresentaram abatimentos maiores em relação aos concretos padrões (Figura 6-27). Em todos concretos com ar incorporado, o abatimento foi diretamente proporcional ao teor de ar dos mesmos, e a correlação pode ser observada na Figura 6-28.

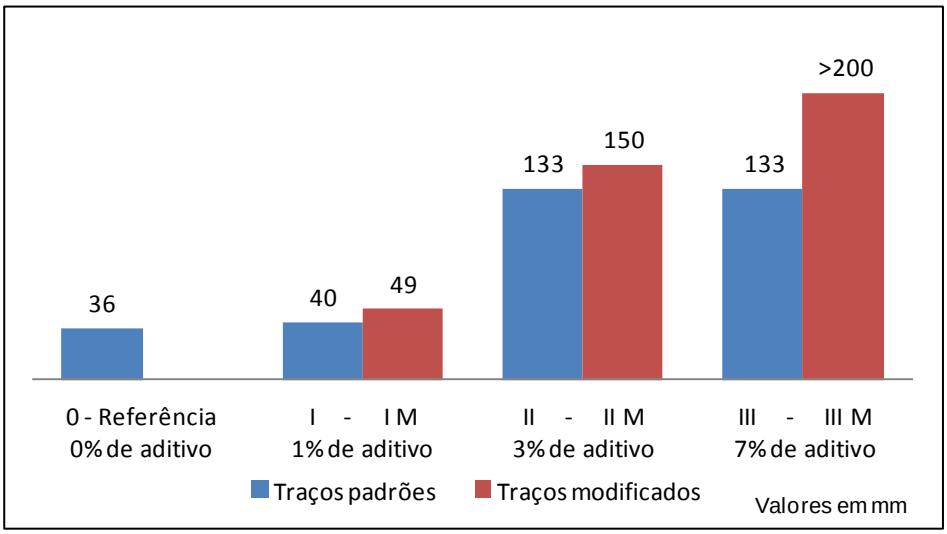

Figura 6-27: Resultados do abatimento do tronco de cone dos concretos.

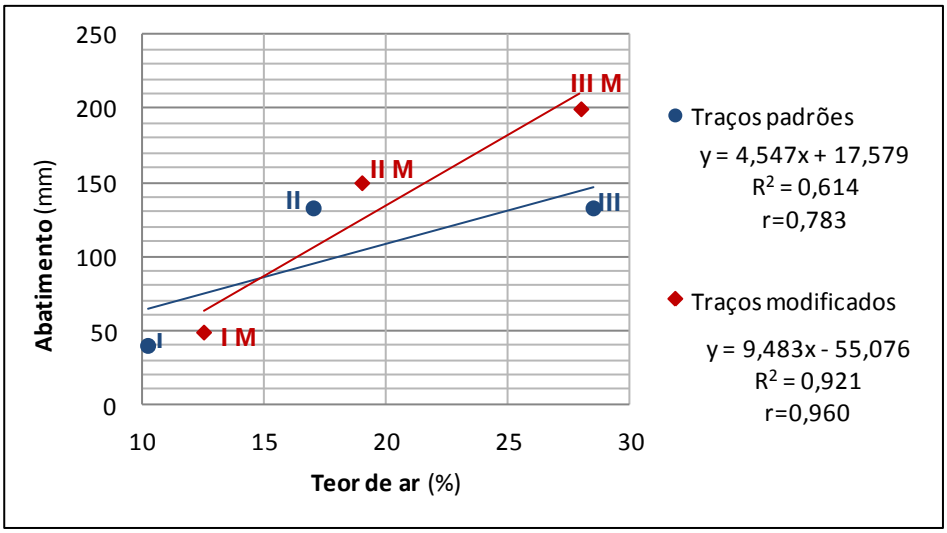

Figura 6-28: Teor de ar x Abatimento: traços padrões e modificados.

6.2.3 Concreto no estado endurecido

6.2.3.1 Análise microestrutural – MicroCT

O processamento das imagens obtidas pela microtomografia computadorizada de raios-X, MicroCT, permitiu a visualização nítida das amostras, dos poros e argamassa. As imagens resultantes são mostradas na Figura 6-29. A partir das imagens foi possível observar evidente incorporação de poros com quantidades consideravelmente maiores nos concretos com ar incorporado em relação ao concreto referência. Grande quantidade desses vazios apresentaram diferentes morfologias. Nos concretos com menores teores de ar (traços I e I M) a quantidade de poros foi maior em relação aos demais teores. Os concretos com teores de ar intermediários (traços II e II M) apresentaram a menor quantidade de poros em relação ao concreto referência (traço 0). As quantidades de poros presentes nas amostras e os acréscimos em relação à quantidade de poros do concreto referência são mostradas na Tabela 6-6.

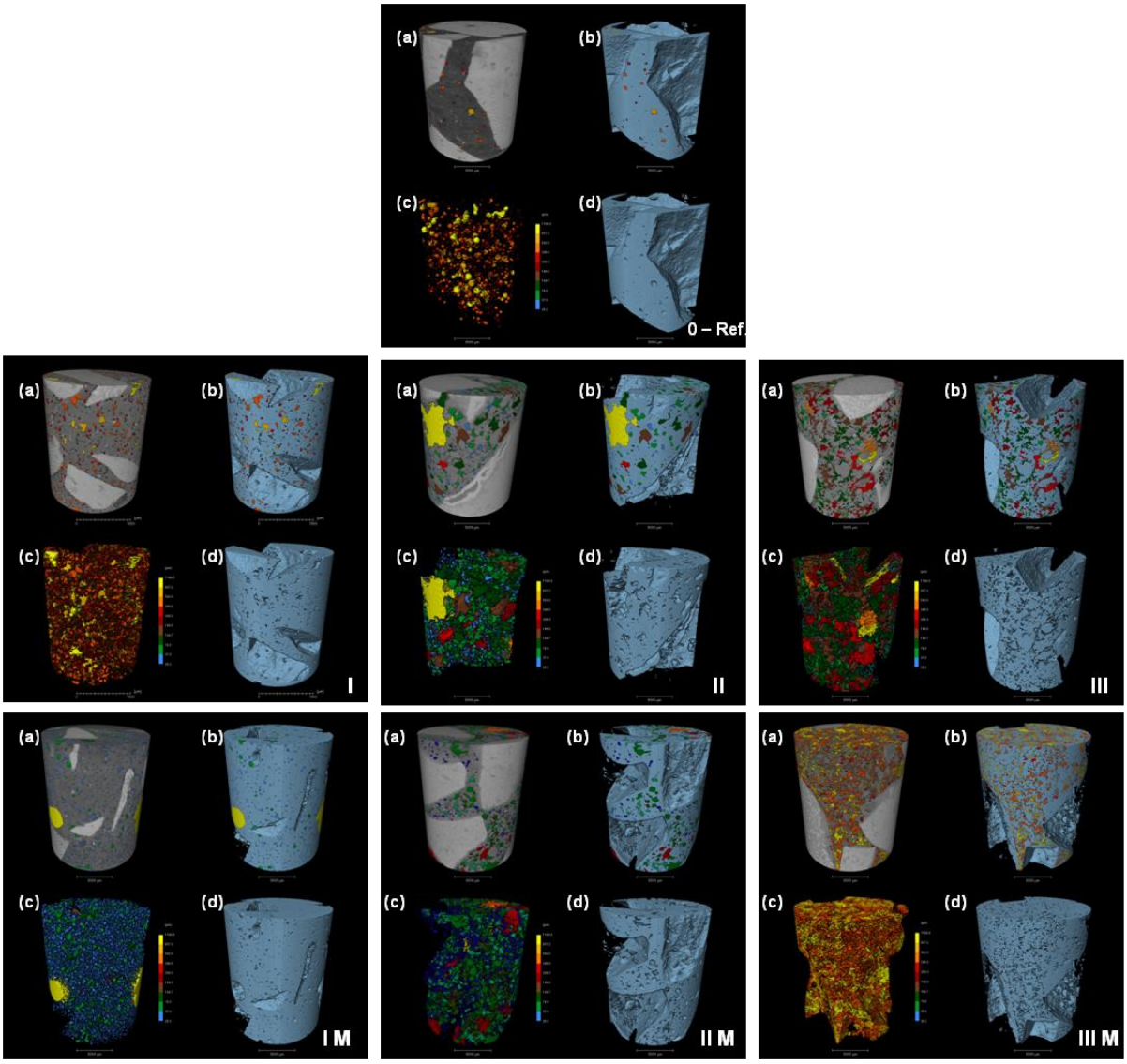

Figura 6-29: Visualização das amostras de concreto (a), volume da argamassa sem agregados graúdos com discretização dos poros (b), poros (c) e volume da argamassa (d): traços referência (0), padrões (I, II e III) e modificados (I M, II M e III M).

Tabela 6-6: Quantidade de poros existentes nas amostras dos concretos e acréscimos de quantidade em relação ao concreto referência.

Amostra/Traço		**Quantidade de poros**	**Acréscimo** (%)
Referência	**0**	1640	-
Padrões	**I**	16970	1388,60
	II	4535	297,81
	III	6176	441,75
Modificados	**I M**	14560	1177,19
	II M	5216	357,54
	III M	7922	594,91

Todos os concretos apresentaram maior concentração de poros com diâmetros equivalentes entre 50 e 400 µm. Os concretos com menores teores de ar incorporado (traços I e I M) apresentaram maior concentração de poros com diâmetros equivalentes entre 50 e 300 µm. Nos traços com maiores teores de ar (traços III e III M) houve grande incidência de poros com diâmetros equivalentes superiores a 400 µm, sendo que no traço III M a ocorrência de poros com diâmetros equivalentes entre 400 e 800 µm foi consideravelmente maior. A Tabela 6-7 mostra as quantidades e dimensões dos poros presentes nas amostras e a Figura 6-30 mostra as concentrações e dimensões dos poros dos concretos.

Tabela 6-7: Quantidades e dimensões dos poros presentes nas amostras dos concretos.

TRAÇO	**DIÂMETRO EQUIVALENTE*** (Deq.) **DOS POROS** (µm)											
	0 a 50	**50 a 100**	**100 a 200**	**200 a 300**	**300 a 400**	**400 a 500**	**500 a 600**	**600 a 700**	**700 a 800**	**800 a 900**	**900 a 1000**	**> 1000**
Ref. - 0	0	205	435	234	112	55	51	21	8	8	5	6
I	5	2648	9160	3224	1116	421	207	87	55	22	13	12
II	0	852	2135	560	236	163	161	108	85	62	51	122
III	5	1605	2307	436	294	343	370	290	212	132	79	103
I M	10	2415	8063	2741	803	293	124	54	30	9	6	12
II M	6	1329	2315	565	229	186	134	128	90	67	48	119
III M	11	1150	936	512	1204	1453	1193	778	426	178	49	32

* D_{eq}. do poro é o diâmetro de uma esfera de igual volume do poro.

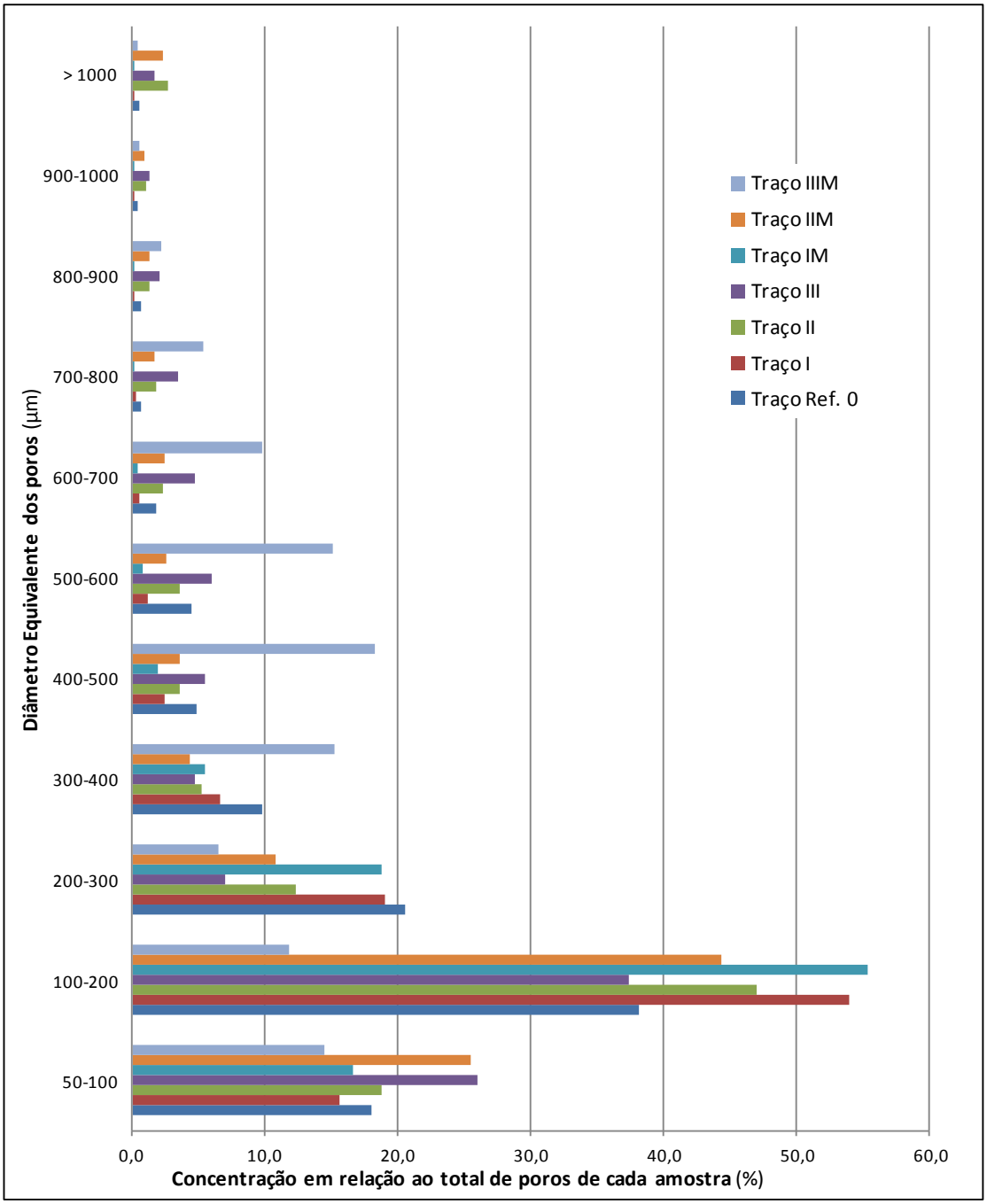

Figura 6-30: Concentração e diâmetros equivalentes dos poros presentes nas amostras dos concretos.

De forma geral, houve tendência de ocorrência de poros com maiores diâmetros equivalentes nos concretos com maiores teores de ar. Tal fato deve-se, provavelmente, à coalescência de poros, evidenciada em todos os concretos com ar incorporado (Figura 6-31). Essa coalescência de poros ocorreu em diferentes regiões da argamassa sem indicar qualquer tendência de quantidade e tamanhos dos poros que coalesceram. Não foi observada conectividade entre poros isolados ou coalescentes.

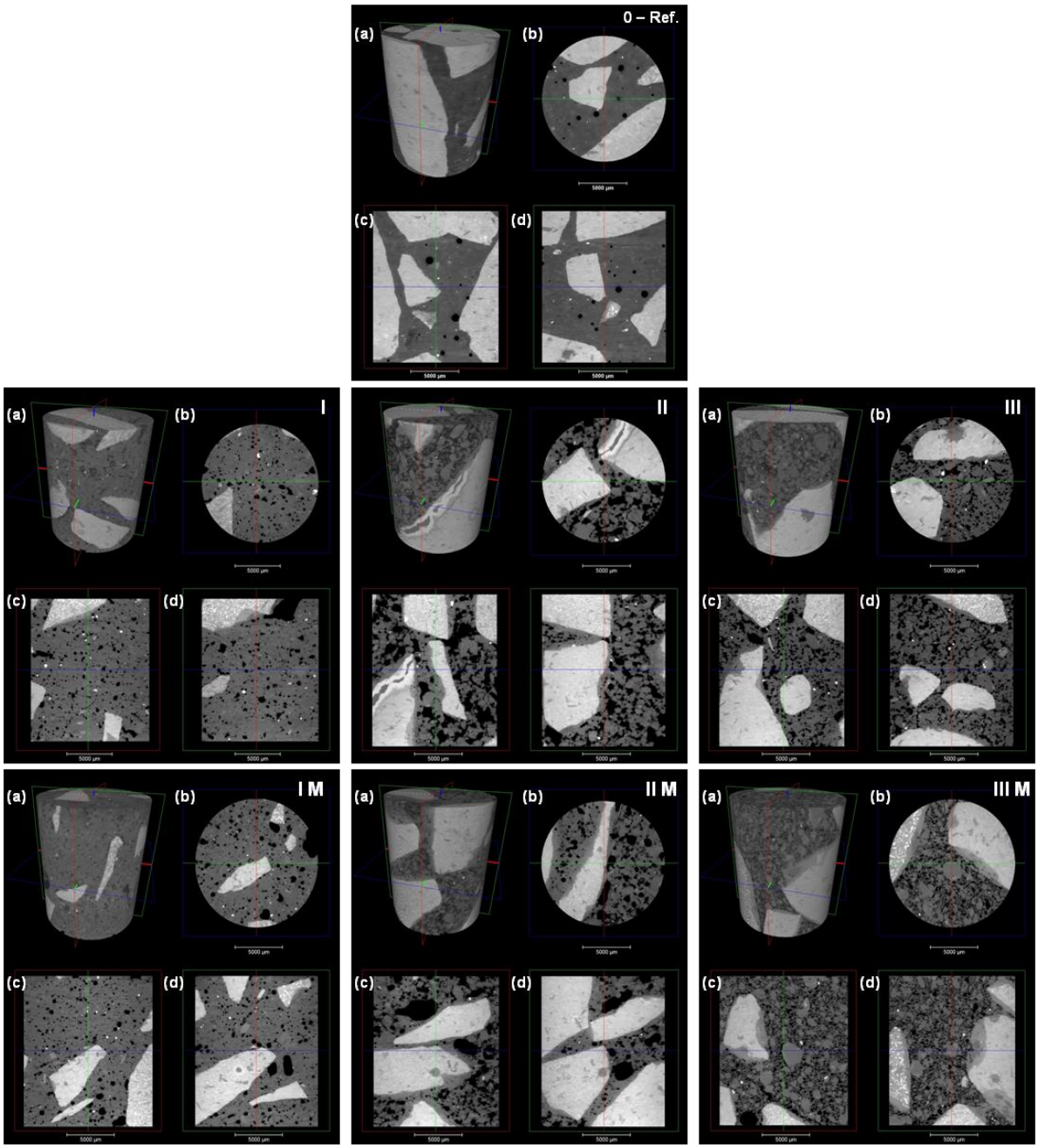

Figura 6-31: Amostras dos concretos analisadas (a) e respectivas seções transversais (b) e longitudinais (c e d): traços referência (0), padrões (I, II e III) e modificados (I M, II M e III M).

Quanto às formas dos poros incorporados os valores de esfericidades indicaram grande quantidade de poros não esféricos ($\Phi < 0,95$) em todos os concretos. Entretanto, a quantidade de poros considerados esféricos ($0,95 \leq \Phi \leq 1$) foi superior em comparação às quantidades de poros de esfericidades inferiores, com exceção dos traços III e III M que apresentaram maiores quantidades de poros com esfericidades entre 0 e 0,7. A grande quantidade de poros considerados esféricos ($0,95 \leq \Phi \leq 1$) não reflete a proporção dos volumes de vazios. O maior volume de vazios deve-se aos poros não esféricos ($\Phi < 0,95$). A Tabela 6-8 mostra as

esfericidades dos poros, volumes e proporção em relação ao volume total de vazios de cada amostra analisada e a Figura 6-32 mostra as concentrações e esfericidades dos poros dos concretos. A Tabela 6-8 mostra as quantidades de poros e respectivas esfericidades e volumes e a Figura 6-32 mostra as concentrações e esfericidades dos poros dos concretos.

Tabela 6-8: Quantidades, esfericidades e volumes dos poros presentes nas amostras dos concretos.

TRAÇO	ESFERICIDADE* (Φ)	QUANTIDADE	VOLUME (cm^3)	% VOL TOTAL**
TRAÇO 0 – Referência	0,95 a 1	693,00	0,009	32,45
	0,9 a 0,95	134,00	0,004	15,10
	0,8 a 0,9	139,00	0,003	11,54
	0,7 a 0,8	114,00	0,005	17,17
	0,6 a 0,7	30,00	0,001	3,99
	0,5 a 0,6	19,00	0.003	10,38
	0 a 0,5	11,00	0,003	9,38
	Total	**1140,00**	**0,027**	**100,00**
TRAÇO I	0,95 a 1	6738,00	0,012	8,27
	0,9 a 0,95	2485,00	0,009	5,96
	0,8 a 0,9	4255,00	0,024	15,82
	0,7 a 0,8	2188,00	0,028	18,66
	0,6 a 0,7	912,00	0,033	21,78
	0,5 a 0,6	322,00	0,031	20,38
	0 a 0,5	70,00	0,014	9,13
	Total	**16970,00**	**0,150**	**100,00**
TRAÇO II	0,95 a 1	1675,00	0,002	0,82
	0,9 a 0,95	645,00	0,002	0,67
	0,8 a 0,9	902,00	0,006	2,28
	0,7 a 0,8	535,00	0,013	4,78
	0,6 a 0,7	335,00	0,029	10,70
	0,5 a 0,6	250,00	0,065	24,00
	0 a 0,5	193,00	0,154	56,74
	Total	**4535,00**	**0,271**	**100,00**

TRAÇO III	0,95 a 1	1752,00	0,001	0,41
	0,9 a 0,95	843,00	0,001	0,30
	0,8 a 0,9	1106,00	0,003	0,86
	0,7 a 0,8	571,00	0,004	1,30
	0,6 a 0,7	454,00	0,014	4,29
	0,5 a 0,6	502,00	0,044	13,33
	0 a 0,5	948,00	0,261	79,51
	Total	**6176,00**	**0,328**	**100,00**
TRAÇO IM	0,95 a 1	6150,00	0,015	13,51
	0,9 a 0,95	2297,00	0,010	8,77
	0,8 a 0,9	3861,00	0,026	22,68
	0,7 a 0,8	1661,00	0,029	25,41
	0,6 a 0,7	480,00	0,021	18,65
	0,5 a 0,6	98,00	0,009	7,70
	0 a 0,5	13,00	0,004	3,29
	Total	**14560,00**	**0,114**	**100,00**
TRAÇO IIM	0,95 a 1	1774,00	0,002	0,85
	0,9 a 0,95	736,00	0,002	0,54
	0,8 a 0,9	1105,00	0,004	1,41
	0,7 a 0,8	668,00	0,009	3,25
	0,6 a 0,7	320,00	0,017	5,91
	0,5 a 0,6	256,00	0,043	15,17
	0 a 0,5	357,00	0,206	72,86
	Total	**5216,00**	**0,282**	**100,00**
TRAÇO IIIM	0,95 a 1	732,00	0,000	0,08
	0,9 a 0,95	474,00	0,000	0,08
	0,8 a 0,9	728,00	0,001	0,25
	0,7 a 0,8	522,00	0,005	0,88
	0,6 a 0,7	775,00	0,017	3,23
	0,5 a 0,6	1369,00	0,060	11,61
	0 a 0,5	3322,00	0,436	83,88
	Total	**7922,00**	**0,519**	**100,00**

***** A esfericidade Φ mede o afastamento da forma esférica: Φ = 1 para um poro esférico e Φ < 1 para qualquer outra forma.
****** Volume total de poros da amostra.

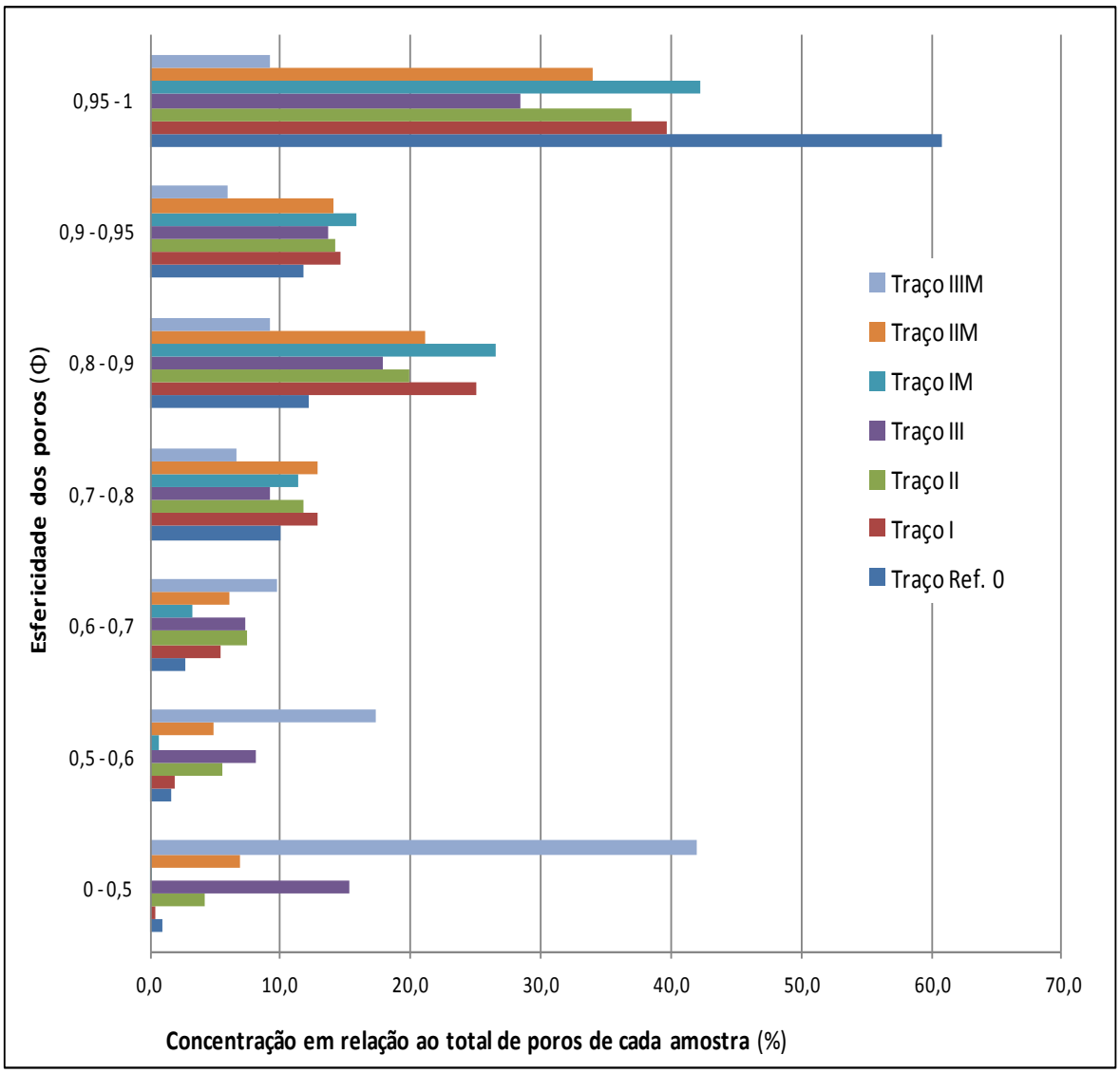

Figura 6-32: Concentrações e esfericidades de poros presentes nas amostras dos concretos.

A elevada concentração de poros com diâmetros equivalentes entre 50 e 500 µm e esfericidades entre 0,95 e 1, indica que o ar incorporado pelo aditivo ocorre por meio de bolhas esféricas (MARTIN, 2005; MEHTA e MONTEIRO, 2014; ARAUJO et al., 2014). A maioria dessas bolhas de ar incorporadas (poros com esfericidades $0,95 \leq \Phi \leq 1$) apresentaram diâmetros até 200 µm, com maior concentração entre 100 e 200 µm, confirmando os resultados da primeira etapa desta pesquisa. Exceto os concretos III e III M que apresentaram maior concentração de bolhas de diâmetros entre 50 e 100 µm. A Tabela 6-9 mostra as quantidades e diâmetros das bolhas de ar incorporadas ($0,95 \leq \Phi \leq 1$) e a Figura 6-33 mostra as concentrações dessas bolhas dos concretos analisados.

Tabela 6-9: Quantidades e diâmetros das bolhas de ar (0,95 ≤ Φ ≤ 1) incorporadas presentes nas amostras dos concretos.

TRAÇO	Diâmetros das bolhas* (µm)						TOTAL
	0 a 50	50 a 100	100 a 200	200 a 300	300 a 400	> 400	
Ref. - 0	0	123	256	175	74	65	**693**
I	5	1566	4533	598	35	1	**6738**
II	0	542	1063	67	4	0	**1675**
III	5	955	764	27	1	0	**1752**
I M	10	1341	3880	783	121	15	**6150**
II M	6	732	928	98	8	2	**1774**
III M	11	475	238	8	0	0	**732**

***** Poros considerados esféricos: 0,95 ≤ Φ ≤ 1.

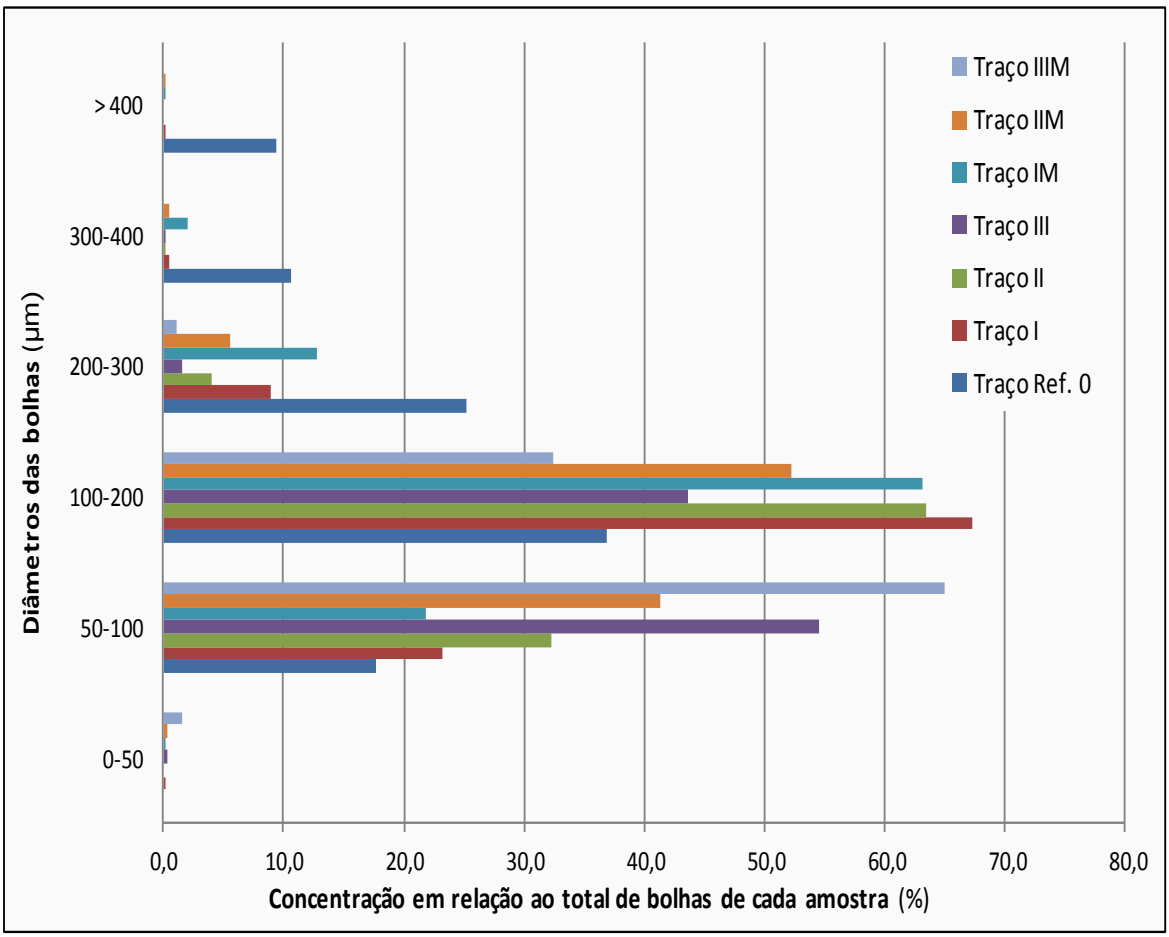

Figura 6-33: Concentrações e diâmetros das bolhas de ar (0 ≤ Φ < 0,95) presentes nas amostras dos concretos.

Quanto maior o teor de ar dos concretos, maior a incidência de poros de formas irregulares, ou seja, formas mais distanciadas da forma esférica ($0 \leq \Phi < 0,95$), resultantes, possivelmente, da coalescência de poros, implicando em queda na concentração de poros esféricos ($0,95 \leq \Phi \leq 1$). Para teores menores de ar há maior incidência de poros esféricos (bolhas de ar). Houve proporcionalidade entre a quantidade total de poros e a quantidade de poros considerados esféricos (bolhas) (Figura 6-34). Apesar dessa proporcionalidade de quantidade, os volumes relativos aos poros não esféricos ($\Phi < 0,95$) aumentaram consideravelmente em relação aos volumes dos poros esféricos ($0,95 \leq \Phi \leq 1$) na medida que aumentou o teor de ar dos concretos (Tabela 6-10).

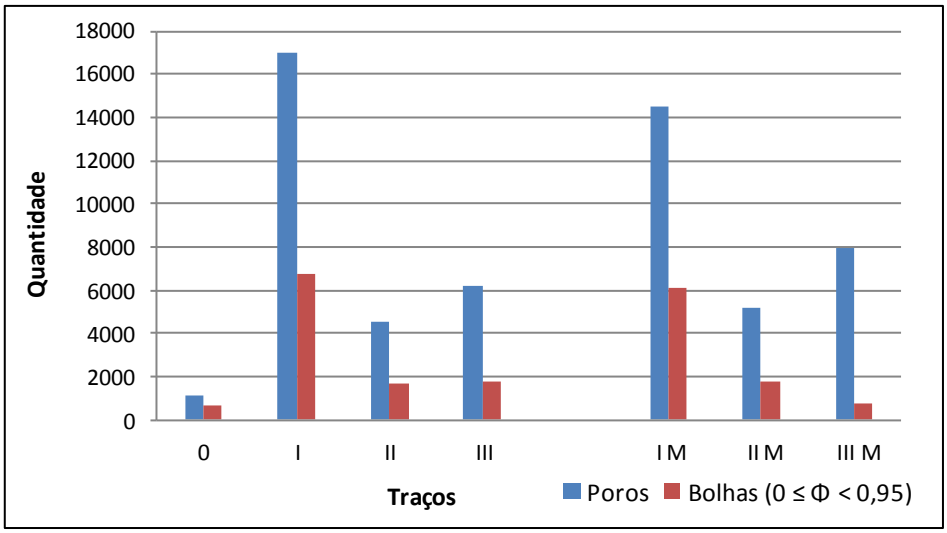

Figura 6-34: Comparativo entre quantidades de poros e bolhas ($0 \leq \Phi < 0,95$) presentes nas amostras dos concretos.

Tabela 6-10: Volumes e concentrações dos poros esféricos ($0,95 \leq \Phi \leq 1$) e não esféricos ($\Phi < 0,95$) existentes nas amostras dos concretos.

TRAÇO	Teor de ar (%)	Volume dos poros (cm^3)				
		Não esféricos ($\Phi < 0,95$)	%*	Esféricos ($0,95 \leq \Phi \leq 1$)	%*	TOTAL
Ref. - 0	1,9	0,018	67,6	0,009	32,4	0,027
I	10,2	0,138	91,7	0,012	8,3	0,150
II	17,0	0,269	99,2	0,002	0,8	0,271
III	28,5	0,327	99,6	0,001	0,4	0,328
I M	12,5	0,099	86,5	0,015	13,5	0,114
II M	19,0	0,280	99,1	0,002	0,9	0,282
III M	28,0	0,519	99,9	0,000	0,1	0,519

* % sobre o volume total dos poros.

Quanto à porosidade, os volumes das amostras analisadas e suas dimensões, volumes de vazios e argamassa e porosidades das argamassas dos concretos, são mostrados na Tabela 6-11. A Figura 6-35 mostra porosidades das argamassas dos concretos com ar incorporado maiores que o concreto referência (traço 0) e o aumento da porosidade à medida que se aumentou o teor de aditivo.

Tabela 6-11: Volumes de concreto, vazios e argamassa das amostras (cilindros) de concreto analisadas e porosidade da argamassa.

Amostra/Traço		**Cilindro analisado**					**Porosidade** (%)
		Dimensões (mm)		**Volume** (cm^3)			
		Diâmetro	**Altura**	**Total**	**Argamassa**	**Vazios** (poros)	
Referência	**0**	15,9	20,4	2,111	1,127	0,027	2,4
Padrões	**I**	15,9	20,4	2,111	1,601	1,150	8,6
	II	16,0	20,5	2,127	0,943	0,271	22,3
	III	16,0	20,5	2,128	0,863	0,328	27,5
Modificados	**I M**	16,2	20,6	2,206	1,492	0,114	7,1
	II M	15,9	20,4	2,111	0,820	0,282	25,6
	III M	16,2	20,7	2,245	1,095	0,519	32,2

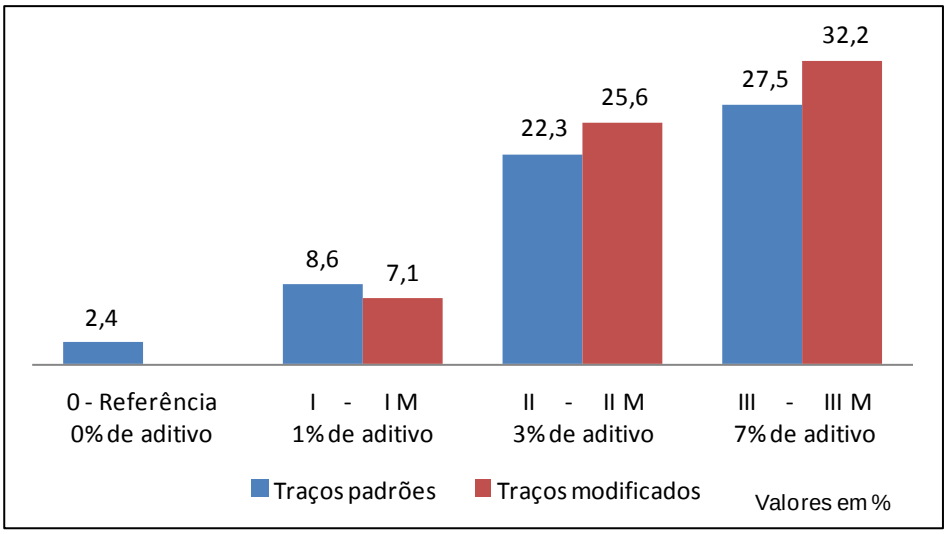

Figura 6-35: Porosidade das argamassas dos concretos analisados.

As porosidades das argamassas dos concretos foram proporcionais aos teores de ar incorporado. Entretanto, até um determinado teor de ar, os concretos modificados,

com maiores consumos de cimento e menores teores de agregados, apresentaram uma taxa de aumento da porosidade maior em relação aos concretos padrões. A partir desse teor de ar, os concretos padrões e modificados apresentaram taxa de aumento da porosidade constante (Figura 6-36).

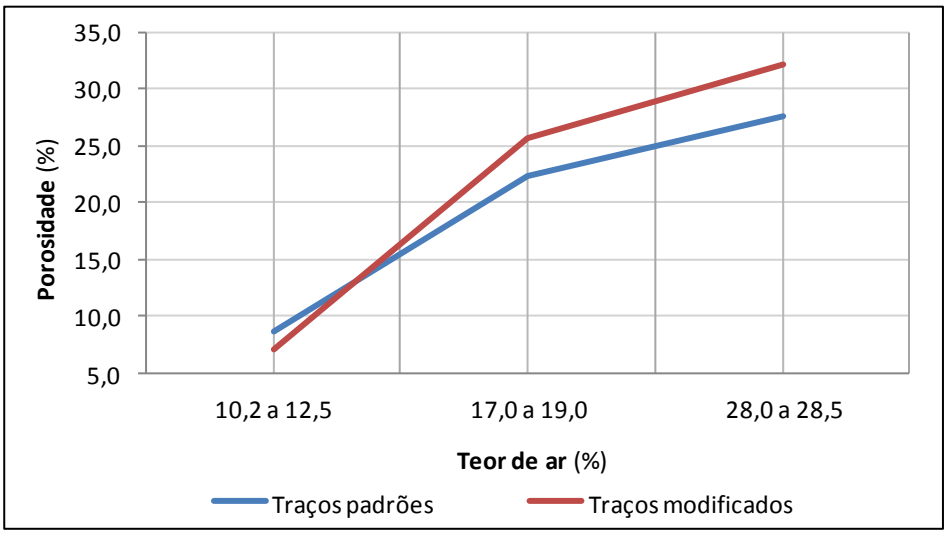

Figura 6-36: Teor de ar x Porosidade: traços padrões e modificados.

Apesar dos concretos com teor de ar intermediário (traços II e II M) apresentarem quantidades de poros menores do que os demais concretos com ar incorporado (traços I, III, I M e III M), suas porosidades foram proporcionais aos teores de ar. Tal fato deve-se, provavelmente, à maior concentração de poros de volumes maiores, com diâmetros equivalentes acima de 1000 µm, resultantes da coalescência de poros, evidenciada em todos os concretos com ar incorporado, ou do ar aprisionado durante o processo de adensamento da mistura.

6.2.3.2 Massa específica e absorção de água por imersão

Nas três condições de ensaio realizadas (amostra seca, após saturação e após saturação e fervura), as massas específicas dos concretos com ar incorporado foram menores em relação à do concreto referência. Os resultados obtidos da massa específica dos concretos estudados são mostrados na Tabela 6-12.

Os concretos com maiores teores de ar incorporado apresentaram massas específicas menores (Figura 6-37).

Tabela 6-12: Resultados das massas específicas dos concretos no estado endurecido.

Traço		Massa específica (kg/m^3)		
		Amostra seca	Após saturação	Após saturação e fervura
Referência	0	2335,59	2480,35	2483,13
Padrões	I	2161,12	2289,08	2295,62
	II	1785,58	1896,20	2004,29
	III	1590,85	1715,34	1869,25
Modificados	I M	2107,16	2250,18	2267,17
	II M	1612,23	1721,93	1862,64
	III M	1387,59	1496,53	1692,84

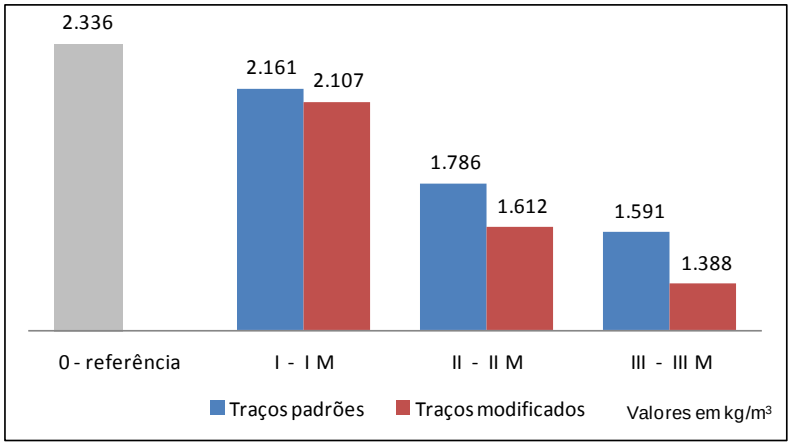

Figura 6-37: Resultados das massas específicas dos concretos no estado endurecido: amostra seca.

Os concretos obtidos, com exceção do concreto padrão traço I, foram considerados concretos leves em relação aos valores de suas massas específicas e classificação estabelecida por Mehta e Monteiro (2014), Neville (2016) e ABNT NBR 8953:2015. Os concretos modificados, independentemente dos teores de ar, apresentaram massas específicas menores que os concretos padrões. A massa específica dos concretos com ar incorporado, independentemente dos consumos de cimento e teor de agregados, apresentou uma forte correlação negativa com o teor de ar, mostrada na Figura 6-38.

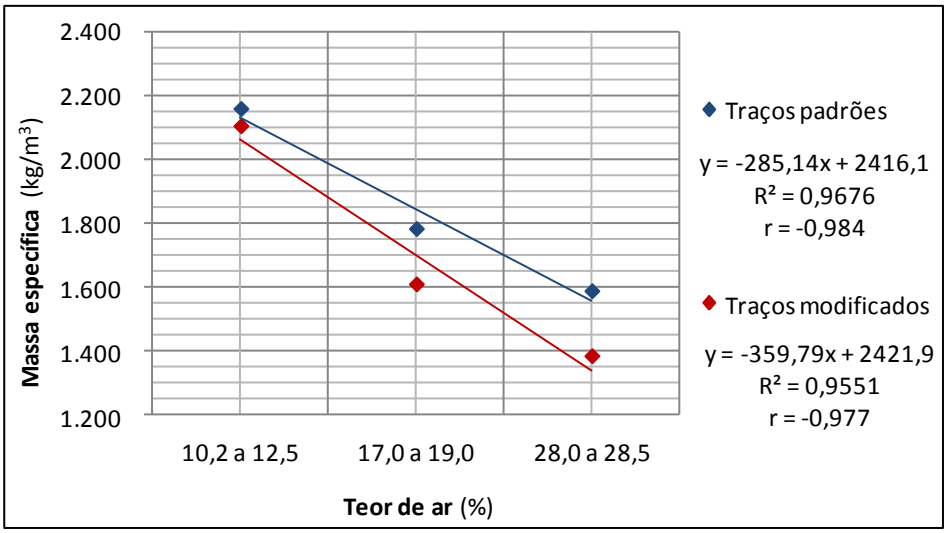

Figura 6-38: Teor de ar x Massa específica: concreto estado endurecido - amostra seca - traços padrões e modificados.

Os valores obtidos nos ensaios de absorção por imersão dos concretos estudados nas condições após imersão e após imersão e fervura, e o acréscimo no valor da absorção ocasionado pelo processo de fervura são mostrados na Tabela 6-13.

Tabela 6-13: Resultados de absorção de água por imersão dos concretos.

Traço		**Teor de ar** (%)	**Absorção** (%)		**Acréscimo** (%)
			Após imersão	**Após imersão e fervura**	
Referência	**0**	1,9	6,20	6,32	1,9
Padrões	**I**	10,2	5,92	6,22	5,1
	II	17,0	6,19	12,32	99,0
	III	28,5	7,85	17,54	123,4
Modificados	**I M**	12,5	6,79	7,59	11,8
	II M	19,0	6,81	15,56	128,5
	III M	28,0	7,86	22,01	180,0

Os concretos ensaiados após fervura apresentaram valores de absorção maiores que aqueles ensaiados após somente imersão, principalmente aqueles com maiores teores de ar incorporado. Apesar de não se saber exatamente as transformações ocasionadas nos corpos de prova, a fervura dos mesmos certamente explica esse acréscimo acentuado nos índices de absorção. Esse fato indica que o aumento do teor de ar nos concretos, provavelmente, aumenta a suscetibilidade ao aparecimento de microfissuras ocasionadas pela elevação da temperatura.

Os concretos com ar incorporado apresentaram índices de absorção maiores que o concreto referência, com exceção do concreto padrão I, com menor teor de ar incorporado, nas duas condições de saturação ensaiadas. Nos ensaios, após imersão sem fervura dos corpos de prova, o aumento da absorção foi sensível em todos os concretos, indicando que o aumento de ar não promoveu aumento proporcional na absorção de água (Figura 6-39). Entretanto, os concretos modificados apresentaram absorção maior do que os concretos padrões nas duas condições de ensaio. Esse fato, provavelmente, é devido a maior quantidade de matriz cimentícia e consequentemente maior quantidade de poros capilares, aumentando a absorção (Figuras 6-39 e 6-40). Outra explicação pode ser o fato dos concretos modificados apresentarem maior quantidade de poros não regulares, observada na análise da microestrutura.

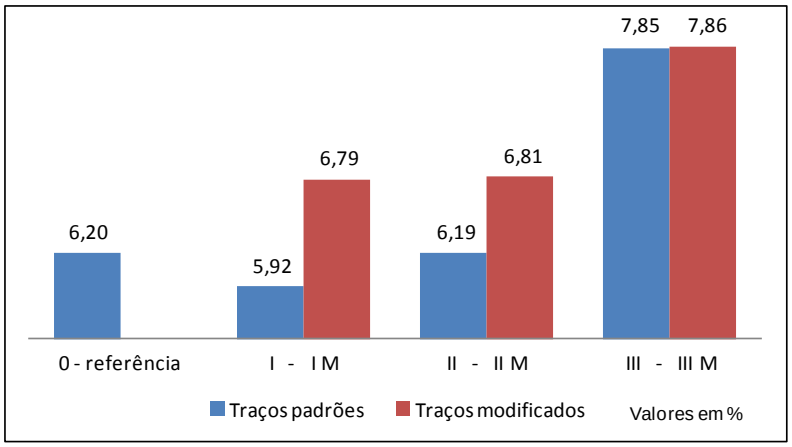

Figura 6-39: Valores da absorção de água dos concretos após imersão.

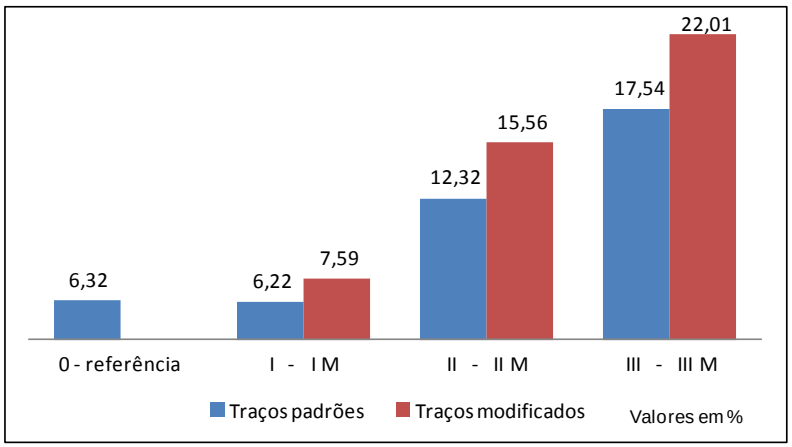

Figura 6-40: Valores da absorção de água dos concretos após imersão e fervura.

Em relação à classificação para concretos estabelecida por Helene e Terzian (1992) de acordo com a absorção de água, os concretos estudados seriam considerados deficientes, por apresentarem índices de absorção próximos ou acima do limite inferior de 6,3% estabelecido pelos autores. Apenas os traços I e I M, com menores teores de ar, seriam considerados bons por apresentarem absorção abaixo de 10%. (NEVILLE, 2016).

As relações entre absorção e os teores de ar para as duas formas de saturação, podem ser observadas na Figura 6-41.

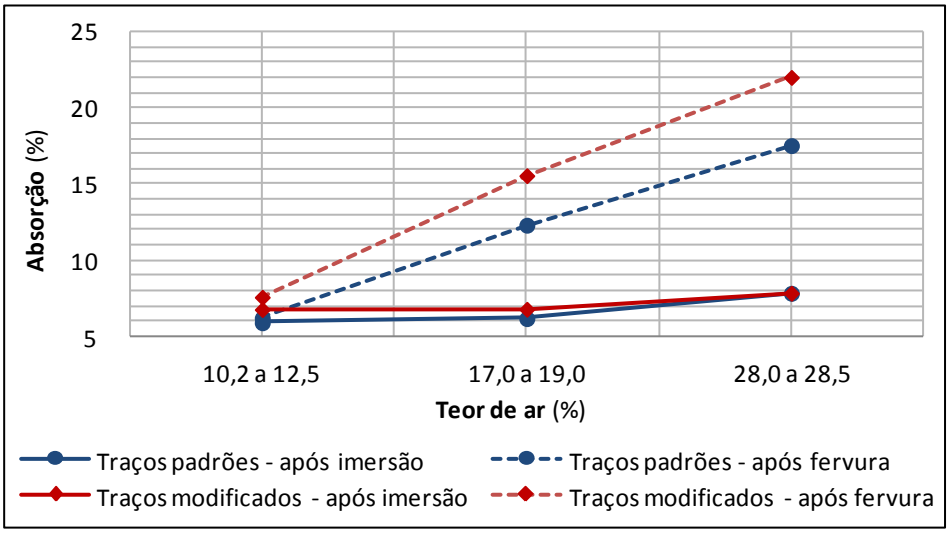

Figura 6-41: Teor de ar x Absorção de água dos concretos: traços padrões e modificados.

6.2.3.3 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade nas idades de 28 e 91 dias dos concretos referência, padrões e modificados são mostrados nas Tabelas 6-14, 6-15 e 6-16.

Tabela 6-14: Resultados: resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto referência.

	Resistência à compressão (MPa)				**Módulo de elasticidade** (GPa)			
	28 dias		91 dias		28 dias		91 dias	
Traço 0 - referência	cp1	44,64	cp1	53,24	cp1	38,9	cp1	41,4
	cp2	43,92	cp2	53,67			cp2	47,4
	cp3	45,23	cp3	55,12	cp2	41,8	cp3	37,3
	cp4	45,81	cp4	47,53			cp4	44,6
	cp5	46,88	cp5	48,38	cp3	35,6	cp5	42,0
	cp6	45,18	cp6	47,77			cp6	41,8

Tabela 6-15: Resultados: resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos padrões.

	Resistência à compressão (MPa)				**Módulo de elasticidade** (GPa)			
	28 dias		91 dias		28 dias		91 dias	
Traço I	cp1	29,79	cp1	40,23	cp1	30,9	cp1	37,3
	cp2	28,07	cp2	37,66			cp2	34,8
	cp3	28,19	cp3	37,57	cp2	30,9	cp3	33,8
	cp4	33,44	cp4	32,63			cp4	33,5
	cp5	36,47	cp5	39,93	cp3	32,9	cp5	30,1
	cp6	30,87	cp6	45,14			cp6	32,1
Traço II	cp1	11,19	cp1	21,14	cp1	22,0	cp1	16,8
	cp2*	7,99	cp2	17,87			cp2	19,8
	cp3	16,38	cp3	11,46	cp2	20,4	cp3	13,2
	cp4	18,92	cp4	15,96			cp4	20,3
	cp5	13,54	cp5	17,46	cp3*	13,4	cp5	14,8
	cp6	17,30	cp6	22,62			cp6	12,8
Traço III	cp1	20,89	cp1	24,11	cp1*	34,4	cp1	15,9
	cp2	17,59	cp2	10,14			cp2	22,3
	cp3	17,93	cp3	22,51	cp2	18,8	cp3	17,9
	cp4*	11,34	cp4	11,75			cp4*	0,1
	cp5	19,80	cp5	13,02	cp3	17,7	cp5	21,0
	cp6	18,63	cp6	28,06			cp6	22,8

***** Corpos de prova com resultados dispersos e fratura tipo F ou G: Anexo A da ABNT NBR 5739:2007.

Tabela 6-16: Resultados: resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos modificados.

	Resistência à compressão (MPa)				**Módulo de elasticidade** (GPa)			
	28 dias		91 dias		28 dias		91 dias	
Traço I M	cp1	27,53	cp1	32,44	cp1	31,2	cp1	28,9
	cp2	31,05	cp2	35,12			cp2	32,0
	cp3	28,43	cp3	32,49	cp2	28,9	cp3	31,5
	cp4	27,00	cp4	29,30			cp4	29,7
	cp5	28,23	cp5	26,85	cp3	27,0	cp5	29,9
	cp6	28,15	cp6	36,51			cp6	36,7
Traço II M	cp1	15,68	cp1	10,29	cp1	18,3	cp1	15,4
	cp2	10,68	cp2	10,20			cp2	20,3
	cp3	14,11	cp3	11,97	cp2	24,6	cp3	18,3
	cp4*	9,98	cp4	11,49			cp4	18,6
	cp5	12,20	cp5	15,55	cp3	22,0	cp5	17,5
	cp6	10,52	cp6	15,01			cp6	16,8
Traço III M	cp1	14,92	cp1	13,78	cp1	15,8	cp1	10,7
	cp2	14,78	cp2	14,37			cp2	15,6
	cp3	16,44	cp3	11,36	cp2	19,1	cp3	14,7
	cp4	12,16	cp4	11,50			cp4	19,9
	cp5	11,39	cp5	12,72	cp3	15,5	cp5	13,9
	cp6	9,29	cp6	16,66			cp6	11,8

***** Corpos de prova que apresentaram resultados dispersos e fratura tipo F ou G de acordo com o Anexo A da ABNT NBR 5739:2007.

Os corpos de prova ensaiados que apresentaram valores de resistência à compressão ou módulo de elasticidade muito dispersos em relação ao seu grupo e fraturas tipos F ou G, características relacionadas a defeitos de moldagem e/ou defeitos nas bases e topos dos corpos de prova de acordo com o anexo A da ABNT NBR 5739:2007, tiverem seus resultados desconsiderados (Figura 6-42).

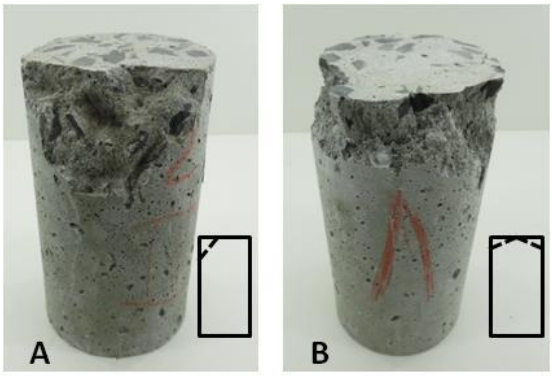

Figura 6-42: Fraturas tipos F (A) e G (B) observadas nas rupturas dos corpos de prova dos concretos.

A Tabela 6-17 mostra os valores médios da resistência à compressão e módulo de elasticidade com os respectivos desvios padrões e coeficientes de variação dos resultados dos ensaios.

Tabela 6-17: Valores da resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos com respectivos desvios padrões e coeficientes de variação.

Traço	Resistência à compressão (MPa)						Módulo de elasticidade (GPa)					
	28 dias			91 dias			28 dias			91 dias		
	f_{cm} (MPa)	σ (MPa)	*Cv* (%)	f_{cm} (MPa)	σ (MPa)	*Cv* (%)	E_c (GPa)	σ (GPa)	*Cv* (%)	E_c (GPa)	σ (GPa)	*Cv* (%)
0	45,28	1,01	2,0	50,95	3,42	7,0	38,77	3,10	8,0	42,42	3,39	8,0
I	31,14	3,28	11,0	38,86	4,11	11,0	31,57	1,15	4,0	33,60	2,44	7,0
II	15,47	3,09	20,0	17,75	3,95	22,0	21,20	1,13	5,0	16,28	3,24	20,0
III	18,97	1,37	7,0	18,27	7,54	41,0	18,25	0,78	4,0	19,98	2,97	15,0
I M	28,4	1,40	5,0	32,12	3,58	11,0	29,03	2,10	7,0	31,45	2,82	9,0
II M	12,64	2,23	18,0	12,42	2,33	19,0	21,63	3,17	15,0	17,82	1,67	9,0
III M	13,16	2,67	20,0	13,40	2,00	15,0	16,80	2,00	12,0	14,43	3,24	22,0

f_{cm} = resistência média; σ = desvio padrão; *Cv* = coeficiente de variação; E_c = módulo de elasticidade médio.

Os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos padrões e modificados apresentaram grande variabilidade em relação à média dos resultados de acordo com os valores dos coeficientes de variação calculados. Com exceção dos resultados de resistência à compressão dos concretos III aos 28 dias, IIIM aos 91 dias e de módulo de elasticidade dos concretos III e IIIM aos 28 dias e III

aos 91 dias, observou-se que os concretos com maiores teores de ar, nas faixas de 20% e 30% de ar, apresentaram uma variabilidade dos resultados em relação à média superior àqueles com menores teores de ar. Essa variabilidade dos resultados, possivelmente deve-se ao aditivo, que favorece a coalescência de bolhas formando poros de grandes dimensões.

Os traços modificados, apesar do aumento do consumo de cimento, tiveram desempenho em relação à resistência à compressão e módulo de elasticidade inferior aos concretos padrões. Portanto, a retirada de agregados com consequente aumento do consumo de cimento não apresentou eficácia na melhoria da resistência mecânica.

De maneira geral, os concretos com menores teores de ar incorporado tendem a apresentar conjuntos de resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade mais homogêneos, independentemente dos consumos de cimento e teores de agregados. As figuras 6-43 e 6-44 mostram os comparativos entre os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos aos 28 e 91 dias.

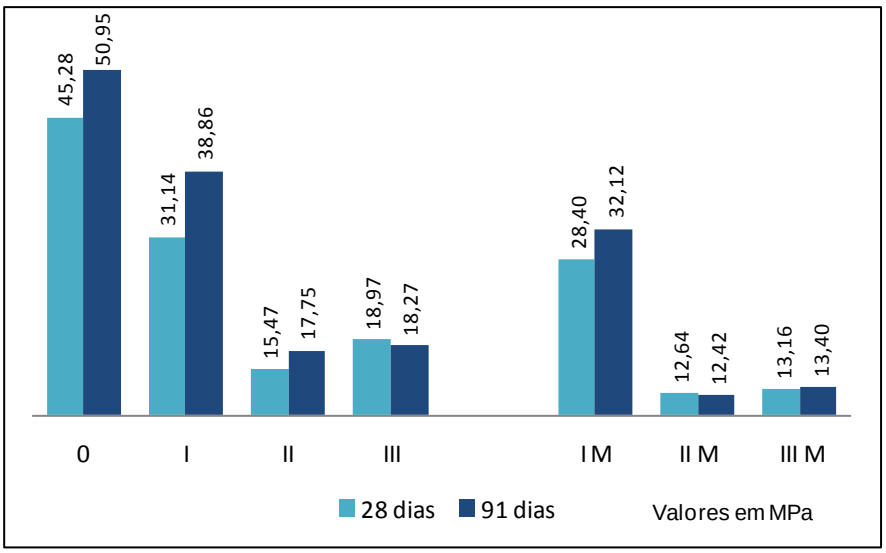

Figura 6-43: Valores da resistência à compressão dos concretos aos 28 e 91 dias.

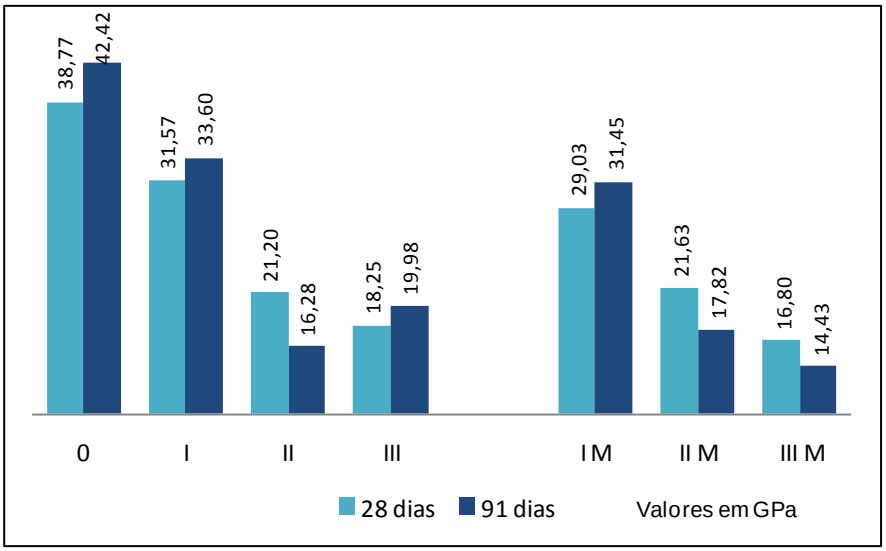

Figura 6-44: Valores do módulo de elasticidade dos concretos aos 28 e 91 dias.

Como esperado, os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos com ar incorporado foram inferiores aos do concreto referência. Foi possível observar que concretos com maiores teores de ar incorporado independentemente dos consumos de cimento e teores de agregados, apresentam menores resistências à compressão e módulos de elasticidade, como constataram Fausto e Moser (2011). A Figura 6-45 mostra o comparativo das resistências à compressão entre os concretos padrões e modificados e suas variações em relação aos teores de ar.

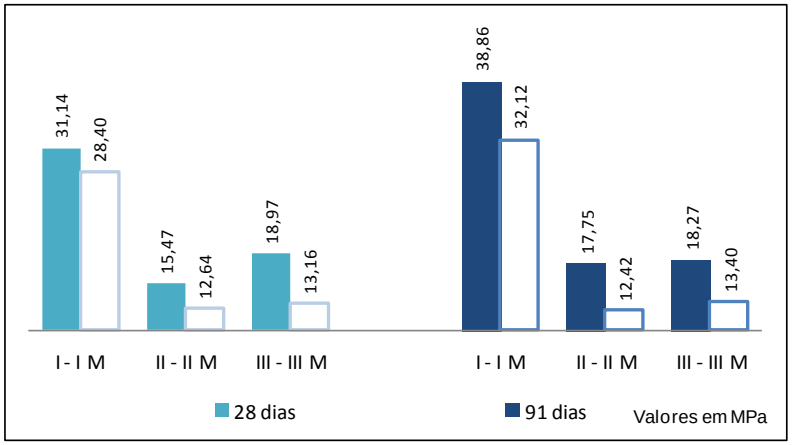

Figura 6-45: Comparação dos valores da resistência à compressão dos concretos padrões e modificados.

As resistências dos concretos modificados foram menores que as dos concretos padrões nas duas idades ensaiadas, com exceção do concreto modificado II M, que apresentou resistência aos 28 dias superior à dos 91 dias. As resistências à

compressão dos concretos com ar incorporado aos 91 dias foram maiores que as obtidas aos 28 dias, com exceção dos concretos com maiores teores de ar (Traços III e III M). É possível observar tendência de queda de resistência para concretos com maiores teores de ar, acima de 10%, independentemente dos consumos de cimento e teores de agregados. Os concretos com teores de ar nas faixas de 20% e 30% obtiveram desempenhos semelhantes em relação à resistência mecânica (Figura 6-46).

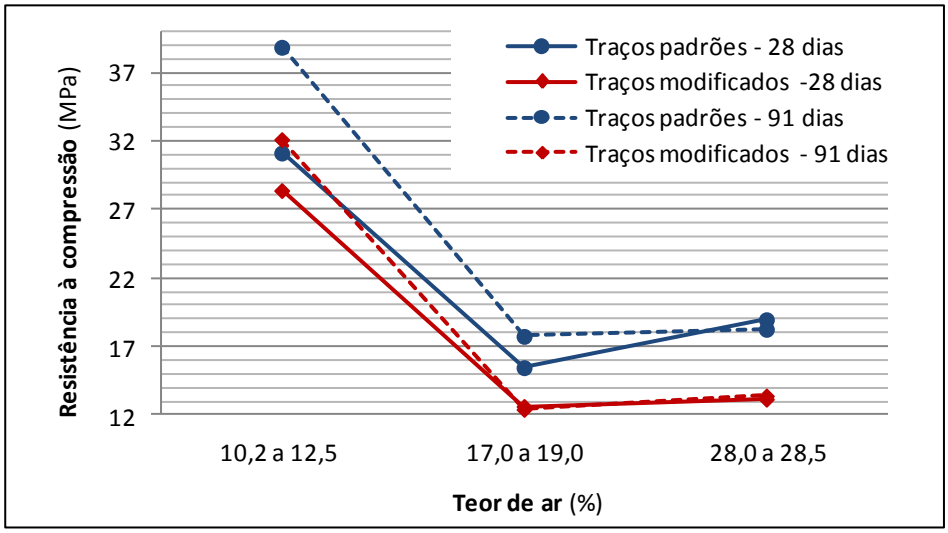

Figura 6-46: Resistência à compressão x Teor de ar dos concretos padrões e modificados.

A Figura 6-47 mostra o comparativo dos módulos de elasticidade entre os concretos padrões e modificados.

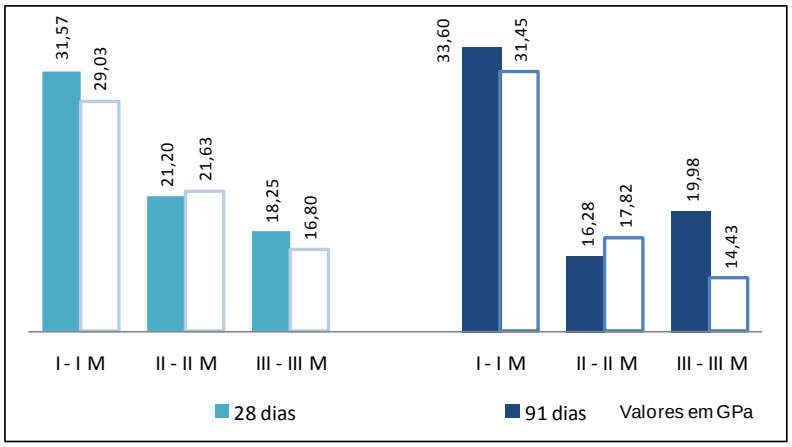

Figura 6-47: Comparação dos valores do módulo de elasticidade dos concretos padrões e modificados.

Os módulos de elasticidade dos concretos com menores e maiores teores de ar incorporado foram maiores aos 91 dias em relação aos obtidos aos 28 dias, com exceção do concreto modificado III M que apresentou módulo de elasticidade menor aos 91 dias. Foi possível observar tendência de diminuição do módulo de elasticidade dos concretos com maiores teores de ar até um determinado teor, a partir do qual o decréscimo do módulo não é tão acentuado (Figura 6-48).

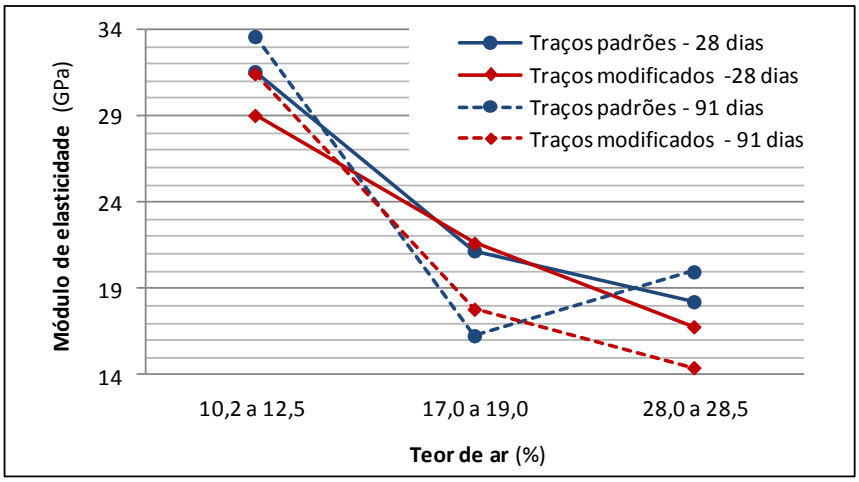

Figura 6-48: Módulo de elasticidade x Teor de ar dos concretos padrões e modificados.

6.2.3.4 Velocidade de propagação da onda ultrassônica

Os resultados obtidos nos ensaios para determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica realizados nos concretos, nas condições de umidade secos e saturados após fervura, são mostrados na Tabela 6-18. A Figura 6-49 mostra que as VPU`s em todos os concretos com ar incorporado diminuíram à medida que aumentou o teor de ar, e foram menores nos concretos padrões em relação aos modificados, nas duas condições de umidade analisadas.

Tabela 6-18: Resultados da velocidade de propagação da onda ultrassônica nos concretos.

Traço		**Velocidade de propagação da onda ultrassônica** (m/s)	
		Estado seco	**Estado saturado**
Referência	**0**	3935,34	4495,18
Padrões	**I**	3672,51	4146,16
	II	3282,39	3686,79
	III	2627,65	3371,78
Modificados	**I M**	3606,76	4076,88
	II M	2977,28	3596,69
	III M	2523,88	3298,27

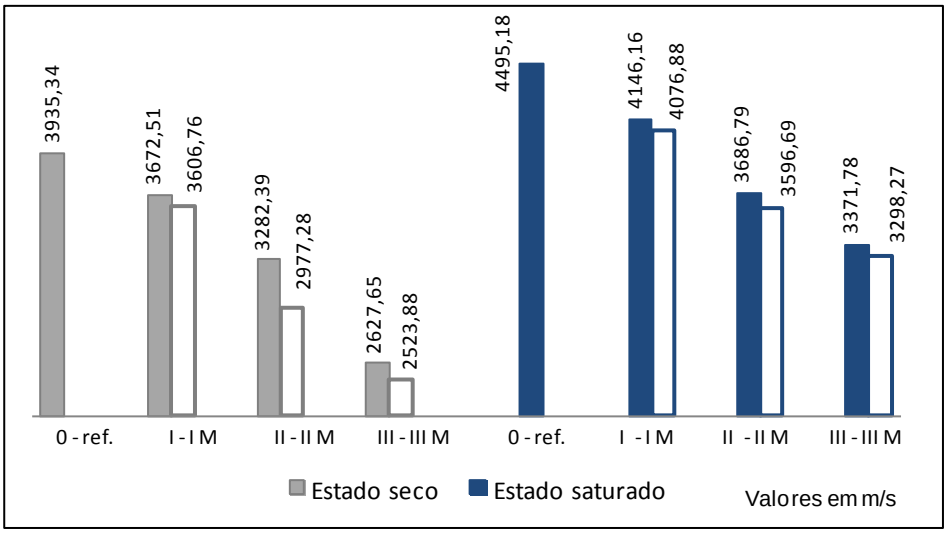

Figura 6-49: Comparativo das velocidades de propagação da onda ultrassônica dos concretos.

As VPU`s dos concretos padrões, na condição de umidade secos, apresentaram valores abaixo da faixa sugerida por Naik, Malhotra e Popovics (2004) para concretos convencionais na condição secos. Os demais concretos ficaram abaixo do limite inferior (3700 m/s). Apenas o concreto com teor de ar na faixa de 10% (traço I M) foi considerado como de qualidade ótima na escala de Cánovas (1998) para concretos na condição secos e os demais situaram nas faixas de qualidade bom e regular. A diferença entre a condição saturada e seca ficou entre 12% e 31%, portanto, superior ao mencionado por Naik, Malhotra e Popovics (2004), em torno de 5%. Embora não comprovado, o fato da fervura e a secagem ter sido em estufa, pode ser a explicação da diferença. A fervura, provavelmente, ocasionou o surgimento de microfissuras interligando poros não conectados, resultando em maior saturação dos concretos.

Tanto os concretos padrões como os modificados apresentaram velocidade de propagação da onda ultrassônica maiores na condição saturados, corroborando os resultados de Chung e Law (1983), Ohdaira e Masuzawa (2000), Berriman et al. (2004), Ferreira (2011) e Mehta e Monteiro (2014). A umidade em concretos com ar incorporado apresentou maior influência na velocidade de propagação da onda ultrassônica em comparação a relação agregados/cimento. Há tendência de diminuição da VPU em relação ao aumento do teor de ar, independentemente dos consumos de cimento e teores de agregados (Figura 6-50).

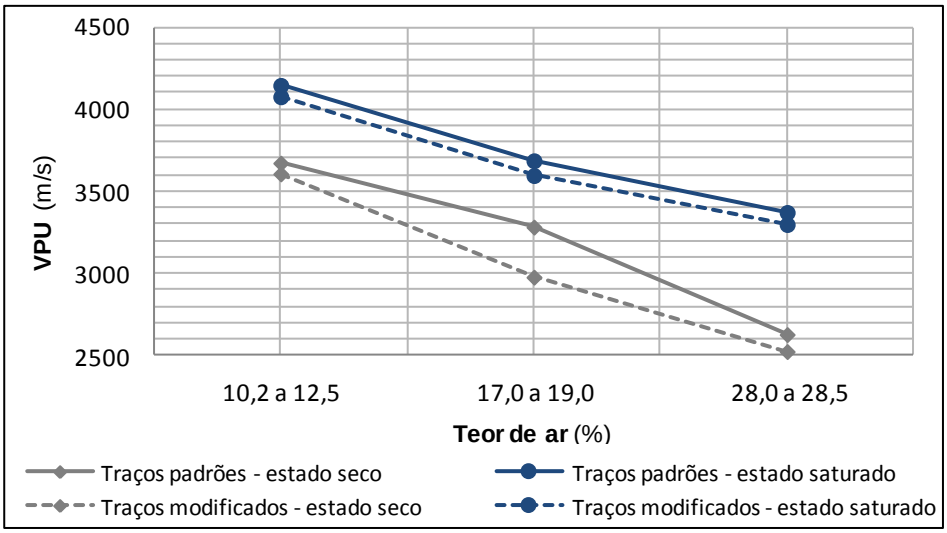

Figura 6-50: Teor de ar x VPU dos concretos.

Apesar da diminuição de agregados dos concretos para mesmo teor de ar e nas duas condições de umidade estudadas não influenciar significativamente a VPU, observou-se que os traços modificados, com menores teores de sólidos, apresentaram menores valores de VPU. Essa tendência de diminuição da VPU em relação ao teor de sólidos é mostrada na Figura 6-51.

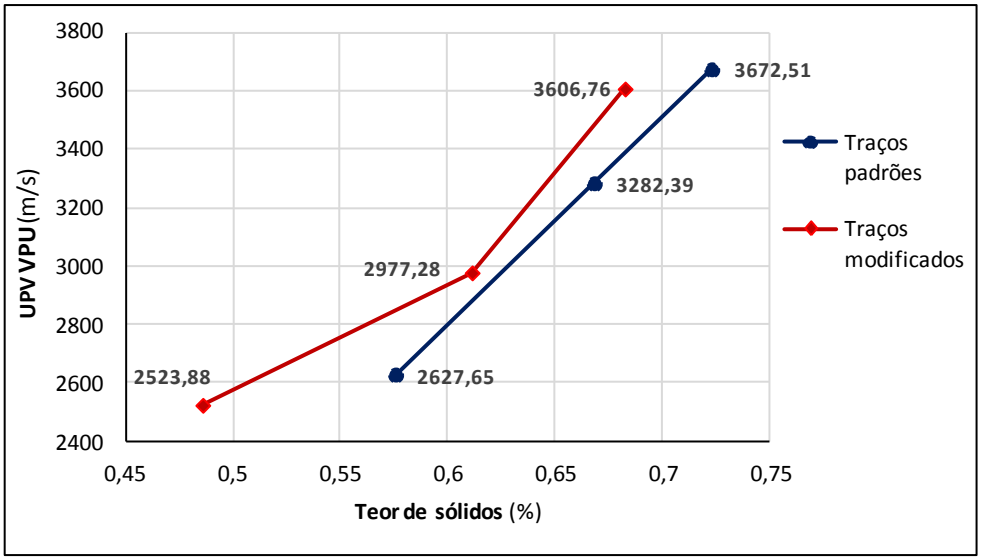

Figura 6-51: Teor de sólidos x VPU dos concretos na condição seco.

As análises relativas às VPU`s dos concretos padrões e modificados, indicam não haver interferência ou restrições ao uso dessa técnica na avaliação de concretos com ar incorporado, independentemente dos teores incorporados.

6.2.3.5 Carbonatação acelerada

A carbonatação dos concretos iniciou-se a partir do terceiro dia de exposição ao CO_2. Os valores médios encontrados para a profundidade de carbonatação medida para cada idade, em cada corpo de prova ensaiado, são mostrados na Tabela 6-19.

Tabela 6-19: Profundidades médias de carbonatação nos concretos.

Traço		**Profundidade de carbonatação** (mm)				**Umidade no início dos ensaios** (%)
		Período de exposição ao CO_2				
		1 dia	**3** dias	**7** dias	**14** dias	
Referência	**0**	0,00	0,00	0,00	2,06	4,2
Padrões	**I**	0,00	0,00	3,61	5,74	3,7
	II	0,00	6,13	21,73	44,63	2,9
	III	0,00	11,80	40,84	56,72	3,5
Modificados	**I M**	0,00	0,00	3,19	5,47	4,2
	II M	0,00	5,86	16,80	16,85	3,7
	III M	0,00	11,30	21,17	21,30	4,9

Para um mesmo período de exposição dos concretos ao CO_2, aqueles com maiores teores de ar tiveram uma profundidade de carbonatação maior, comparados àqueles com menores teores de ar (Figura 6-52).

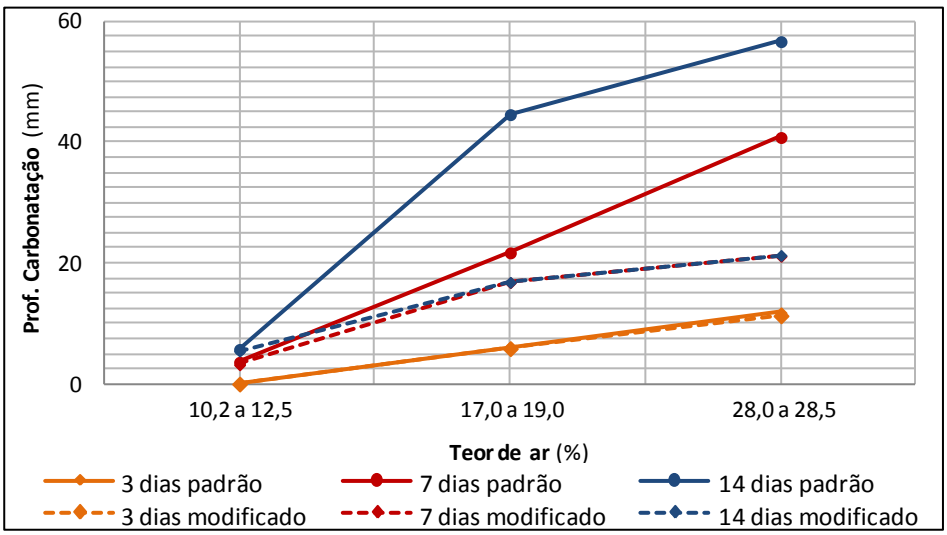

Figura 6-52: Teor de ar x Profundidade de carbonatação dos concretos padrões e modificados.

Os concretos modificados, com menores teores de agregados e maiores consumos de cimento, apresentaram velocidade da frente de carbonatação menor do que os concretos padrões.

Considerando o elevado teor de CO_2 utilizado no ensaio (10%) e as similaridades dos teores de ar e das quantidades e dimensões dos poros entre concretos padrões e modificados, provavelmente, a maior velocidade da frente de carbonatação nos concretos modificados deve-se à redução dos agregados. Essa redução resultou no aumento da pasta cimentícia e maior espalhamento e espaçamento dos poros, reduzindo a possibilidade de conexão entre eles e, consequentemente, a permeabilidade ao CO_2.

Portanto, a redução dos agregados nos concretos, independentemente do teor de ar, contribui na durabilidade do concreto com relação à penetração do CO_2. Entretanto, em concentrações de CO_2 normais na atmosfera, em torno de 0,04% (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2016), provavelmente, a maior reserva alcalina, resultante do maior consumo de cimento nos concretos modificados, provocaria maior formação de hidróxido de cálcio, que consumiria parte do CO_2 nas reações e provocaria diminuição da velocidade da frente de carbonatação.

A Figura 6-53 mostra a evolução da frente de carbonatação dos concretos para os períodos de exposição ao CO_2.

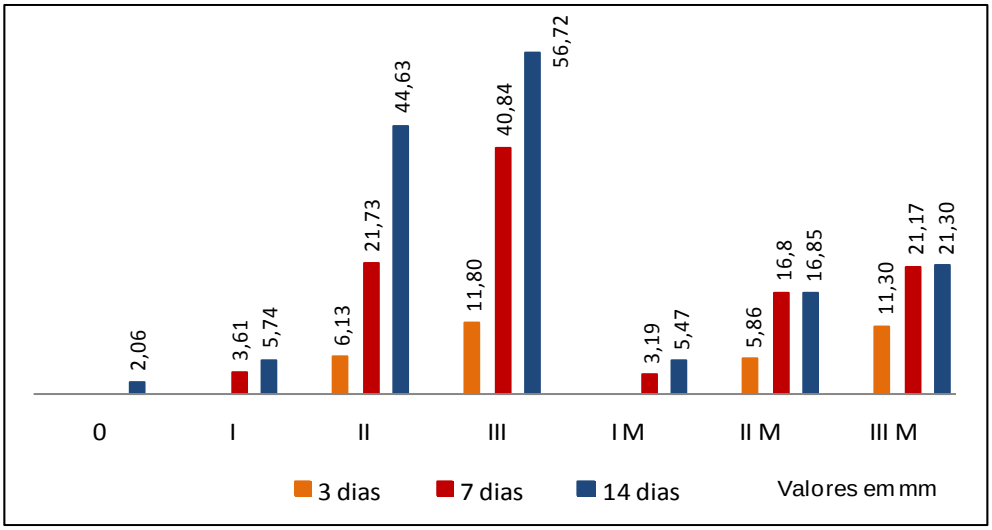

Figura 6-53: Evolução da frente de carbonatação nos concretos.

6.2.3.6 Condutividade térmica

Os valores médios da condutividade térmica dos concretos são mostrados na Tabela 6-20. A condutividade térmica dos concretos com ar incorporado foi menor que a do concreto referência e menor nos concretos com maiores teores de ar (Figura 6-54).

Tabela 6-20: Resultados de condutividade térmica dos concretos.

Traço		**Massa específica** (kg/m^3)	**Condutividade térmica** (W/m.K) T = 30°C
Referência	**0**	2335,59	1,054
Padrões	**I**	2161,12	0,911
	II	1785,58	0,789
	III	1590,85	0,683
Modificados	**I M**	2107,16	0,791
	II M	1612,23	0,651
	III M	1387,59	0,585

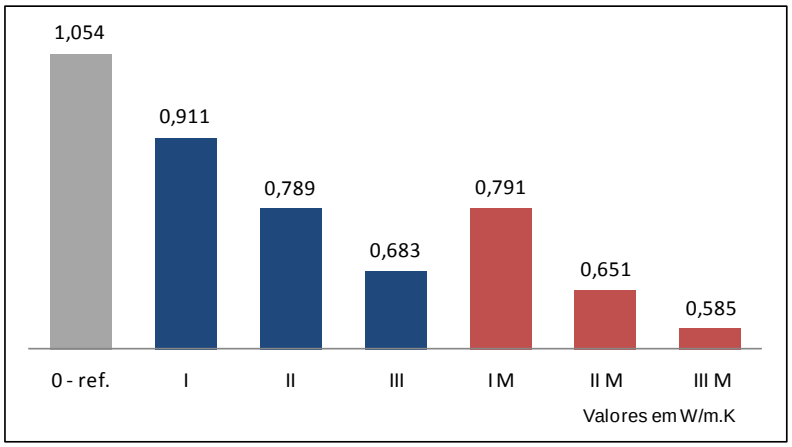

Figura 6-54: Valores de condutividade térmica dos concretos.

A Figura 6-55 mostra as correlações negativas existentes entre o teor de ar e a condutividade térmica dos concretos com ar incorporado, traços padrões e modificados.

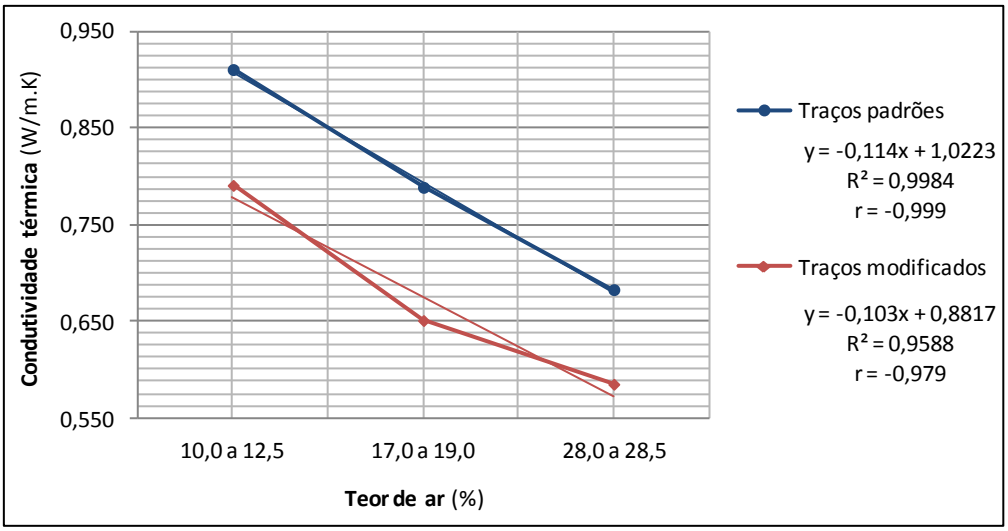

Figura 6-55: Teor de ar x Condutividade térmica dos concretos padrões e modificados.

Nos concretos analisados foi observada correlação positiva entre massa específica e condutividade térmica (Figura 6-56), também relatada por Gül e Demirboga (2003) e Sacht, Rossignolo e Santos (2010). Os concretos modificados, com menores teores de agregados e massas específicas, apresentaram condutividade térmica menor que os concretos padrões. Essa menor condutividade térmica é resultado da menor quantidade de agregados, o que reduz a transferência e absorção de calor (SACHT et al., 2010).

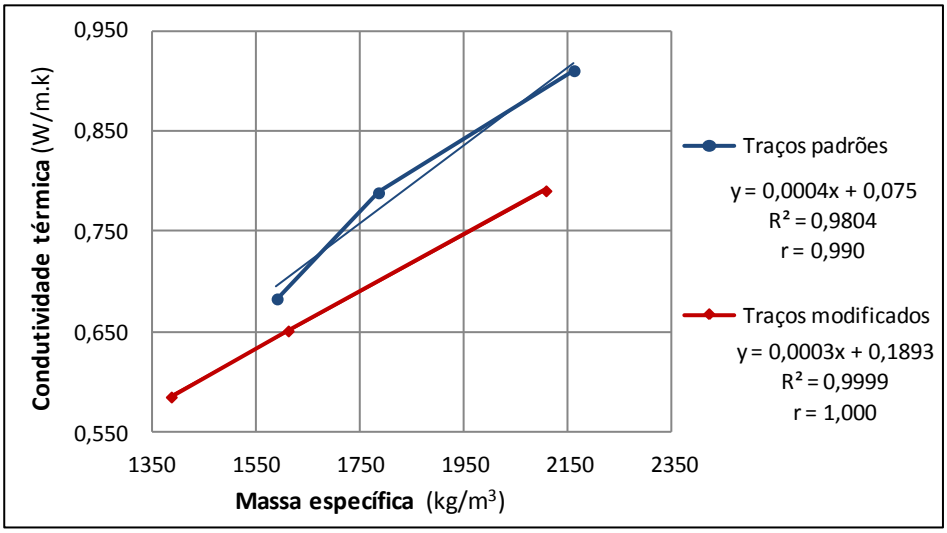

Figura 6-56: Massa específica x Condutividade térmica dos concretos padrões e modificados.

6.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A Tabela 6-21 apresenta os principais resultados obtidos nos ensaios realizados nas duas etapas experimentais desta pesquisa.

Tabela 6-21: Síntese dos principais resultados.

Etapas experimentais			Ensaios / Procedimentos – Resultados
1	Avaliação da eficiência na incorporação de ar dos aditivos (pastas de cimento)		**Determinação da massa específica no estado fresco:** ✓ O aditivo à base de resinas sintéticas proporcionou maior redução da massa específica.
			Determinação da massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios no estado endurecido: ✓ O aditivo à base de resinas sintéticas proporcionou maior redução da massa específica nas condições da amostra seca e após saturação; ✓ Os valores da absorção de água por imersão apresentaram pequenas variações entre os aditivos analisados.
			Análise microestrutural - Microscopia óptica: ✓ O aditivo à base de resinas sintéticas proporcionou maior incorporação de ar (quantidade de bolhas) às misturas em relação aos demais aditivos analisados.
2	Avaliação das características físicas e mecânicas dos concretos Traços padrões e modificados	Concreto no estado fresco	**Abatimento do tronco de cone:** ✓ Os concretos com ar incorporado apresentaram abatimentos maiores em relação ao concreto referência; ✓ Os concretos modificados, com menores teores de agregados, apresentaram abatimentos menores em relação aos concretos padrões; ✓ Os abatimentos dos concretos com ar incorporado apresentaram correlação positiva com os teores de ar.
			Massa específica: ✓ Os concretos modificados, com menores teores de agregados, apresentaram massas específicas menores em relação aos concretos padrões; ✓ As massas específicas dos concretos com ar incorporado apresentaram forte correlação negativa com os teores de ar.
			Teor de ar pelo método pressométrico: ✓ Os teores de ar dos concretos com ar incorporado foram maiores do que o do concreto referência e muito próximos entre os concretos padrões e modificados para os mesmos teores de aditivo; ✓ Os teores de ar dos concretos apresentaram correlação positiva com os teores de aditivo.

2	Avaliação das características físicas e mecânicas dos concretos Traços padrões e modificados	Concreto no estado endurecido	**Massa específica e absorção de água por imersão:** ✓ As massas específicas dos concretos com ar incorporado apresentaram forte correlação negativa com os teores de ar; ✓ Os concretos modificados, independentemente dos teores de ar, apresentaram massas específicas menores que os concretos padrões; ✓ O aumento dos valores de absorção dos concretos com ar incorporado em relação ao concreto referência foi muito sensível, indicando que o teor de ar não promoveu aumento proporcional na absorção de água, na condição de ensaio das amostras após imersão; ✓ Os concretos modificados, com menores teores de agregados, apresentaram absorção maior em relação aos concretos padrões; ✓ Os concretos ensaiados após fervura apresentaram valores de absorção de água maiores que aqueles ensaiados após somente imersão.
			Resistência à compressão e módulo de elasticidade: ✓ Os concretos com ar incorporado apresentaram resistência à compressão e módulo de elasticidade inferiores ao concreto referência; ✓ Os concretos com maiores teores de ar apresentaram menores resistências à compressão e módulo de elasticidade; ✓ Os valores da resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos com ar incorporado, apresentaram grande variabilidade em relação à média dos resultados;
			Velocidade de propagação de onda ultra-sônica: ✓ A velocidade de propagação da onda ultrassônica diminuiu à medida que se aumentou o teor de ar dos concretos; ✓ Os concretos modificados, com menores teores de agregados, apresentaram velocidades de propagação da onda ultrassônica maiores em relção aos concretos padrões.
			Condutividade térmica: ✓ Os concretos com ar incorporado apresentaram menor condutividade térmica em relação ao concreto referência; ✓ Os concretos com maiores teores de ar apresentaram menor condutividade térmica; ✓ Os concretos modificados, com menores teores de agregados, apresentaram menor condutividade térmica em relação aos concretos padrões.

2	Análise microestrutural dos concretos	**Microtomografia computadorizada – MicroCT:** ✓ Os concretos com menores teores de ar (I e IM) apresentaram maiores quantidades de poros em relação aos demais teores; ✓ Todos os concretos apresentaram maior concentração de poros com diâmetros equivalentes entre 50 e 400 µm; ✓ Os concretos com maiores teores de ar (III e IIIM) apresentaram grande incidência de poros com diâmetros equivalentes superiores a 400 µm; ✓ Foi observada coalescência de poros em todos os concretos com ar incorporado; ✓ Foram observadas grandes concentrações de poros esféricos, sendo a maioria com diâmetros até 200 µm, em todos os concretos com ar incorporado.
	Avaliação da durabilidade dos concretos	**Carbonatação acelerada:** ✓ Para um mesmo período de exposição ao CO_2, os concretos com maiores teores de ar apresentaram profundidades de carbonatação maiores em relação aos concretos com menores teores de ar; ✓ Os concretos modificados, com menores teores de agregados, apresentaram velocidades da frente de carbonatação menores em relação aos concretos padrões.

7 CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos nesta pesquisa foi possível concluir:

- O aditivo à base de resinas sintéticas foi o que promoveu maior eficiência na incorporação de ar em pastas de cimento Portland;
- A condutividade térmica foi inversamente proporcional ao teor de ar incorporado no concreto. E, quanto menor o teor de agregados, menor a condutividade térmica;
- O aumento do teor de ar no concreto elevou a absorção de água por imersão, a qual foi mais acentuada nos ensaios realizados após fervura dos corpos de prova;
- A velocidade de propagação da onda ultrassônica (VPU) foi inversamente proporcional ao teor de ar incorporado no concreto. E, quanto menor a quantidade de agregados, menor a VPU;
- Os concretos com maiores teores de agregados apresentaram maior velocidade da frente de carbonatação, para mesmos teores de ar incorporado;
- Concretos com maiores teores de ar incorporado apresentaram variabilidade nos resultados de ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade, independente da idade dos corpos de prova;
- A microtomografia computadorizada de raios-X, MicroCT, permitiu a análise microestrutural tridimensional do concreto e possibilitou o preciso dimensionamento e quantificação de todos poros, bem como a distribuição e relação existentes entre os mesmos na estrutura dos concreto analisados;
- O aumento do teor de ar no concreto promoveu aumento no diâmetro equivalente dos poros e redução da incidência de poros esféricos.
- A incorporação de ar por meio de aditivo em concreto promove importantes alterações em sua microestrutura e propriedades termo-físico-mecânicas. Portanto, mais estudos são necessários para o melhor conhecimento dessas alterações e suas repercussões no desempenho do concreto.

SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

- Avaliação do efeito da fervura nos concretos em ensaios de absorção de água por imersão;
- Avaliação das alterações de dimensões dos poros no concreto em função dos teores de ar incorporado;
- Influência do processo de produção do concreto (parâmetros da produção: energia, velocidade e tempo de mistura) na eficiência da incorporação de ar;
- Investigar a ocorrência de conectividade e/ou coalescência dos poros em concretos com ar incorporado;
- Avaliação da utilização conjunta de outros aditivos (superplastificantes) e aditivos incorporadores de ar para diminuir a coalescência dos poros incorporados em concretos.

8 REFERÊNCIAS[1]

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____ **NBR NM 43**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal – Rio de Janeiro, 2003.

_____ **NBR NM 45**: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____ **NBR NM 47**: Concreto: - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2003.

_____ **NBR NM 52**: Agregado miúdo: Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____ **NBR NM 53**: Agregado graúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____ **NBR NM 67**: Concreto: Determinação da consistência pelo espalhamento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____ **NBR NM 68**: Concreto: Determinação da consistência pelo espalhamento da mesa de Graff. Rio de Janeiro, 1998.

_____ **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____ **EB 1763**: Aditivos para concreto de cimento Portland - Especificação – Rio de Janeiro, 1992.

_____ **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____ **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

_____ **NBR 5739**: Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____ **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento – Rio de Janeiro, 2014.

_____ **NBR 8522**: Concreto: Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão deformação. Rio de Janeiro, 2008.

_____ **NBR 8802**: Concreto endurecido: Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

_____ **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais: Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

[1] De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 6023:2002.

_____ **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos: Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____ **NBR 9833**: Concreto fresco: Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

_____ **NBR 10786**: Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de permeabilidade à água – Método de ensaio – Rio de Janeiro, 1989.

_____ **NBR 11686**: Concreto Fresco – Determinação do Teor de Ar pelo Método Pressométrico – Rio de Janeiro, 1990.

_____ **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland: Preparo, controle e recebimento: Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____ **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 201.2R-01**: Guide to Durable Concrete. Farmington Hills, p. 41, 2001.

_____ **ACI 116.R-90**: Cement and Concrete Terminology. Farmington Hills, p. 58, 1990.

_____ **ACI 211.3-75**: Standard Practice for Selecting Proportions for No-slump Concrete. Farmington Hills, p. 19, 1987.

AGNESINI, M. V. C. **Concretos com ar incorporado. Efeitos produzidos pela incorporação de ar sobre as propriedades dos concretos dosados com os agregados usualmente empregados na região de São Carlos**. São Carlos: EESC-USP, 1988. 161 p.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução de Geraldo Gomes Serra. São Paulo: Pini, 2000. 662 p.

ANDRADE, T. Tópicos sobre durabilidade do concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005, v.1.

ARAUJO, A.; PANOSSIAN, Z.; OLIVEIRA, M. C. B.; NEVES FILHO, D. R.; SIQUEIRA JUNIOR, A. D. Corrosão de armadura de estruturas de concreto leve com ar incorporado. In: INTERCOOR2014 - ABRACO, 2014, Fortaleza. **Anais...**,Fortaleza, 2014.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1530-11**: Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique. Annual Book of Standards. Vol. 14.05, West Conshohocken, PA, 2011.

_____ **ASTM C143-90a**: Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete. Annual Book of Standards. Vol. 04.02, West Conshohocken, PA, 1990.

BAKKER, R. F. M. Initiation Period. In: SCHIESSL, P. (Ed.). **Corrosion of steel in concrete.** New York: RILEM, Chapman and Hall, 1988, p. 22-25.

BARFIELD, M.; GHAFOORI, N. Air-entrained self-consolidating concrete: A study of admixture sources. **Construction and Building Materials**, v. 26, p. 490-496, 2012.

BERNARDES, E. E., MAGALHÃES, A. G., VASCONCELOS, W. L., NUNES, E. H. M. Caracterização da estrutura de poros de concretos pelo uso de microtomografia de raios X. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2012, 2012, Maceió. **Anais...**, Maceió, 2012.

BERRIMAN, J.; PURNELL, P.; HUTCHINS, D. A.; NEILD, A. Humidity and aggregate content correction factors for air-coupled ultrasonic evaluation of concrete. **Ultrassonics**, v. 43, p. 211-217, 2005.

BORDELON, A. C.; ROESLER, J. R. Spacial distribution of synthetic fibers in concrete with X-ray computed tomography. **Cement & Concrete Composites**, v. 53, p. 35-43, 2014.

BOSSA, N.; CHAURAND, P.; VICENTE, J.; BORSCHNECK, D.; LEVARD, C.; CHARIOL, O. A.;ROSE, J. Micro-and-nano-X-ray computed-tomography: a step forward in the characterization of the pore-network of a leached cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 138-147, 2015.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 1881: Part 102 : 1983**: Testing Concrete: Method for determination of slump. London, p. 10, 1983.

_____. **BS 1881: Part 103 : 1983**: Testing Concrete: Method for determination of compacting factor. London, p. 8, 1983.

_____. **BS 1881: Part 104 : 1983**: Testing Concrete: Method for determination of Vebe time. London, p. 7, 1983.

_____. **BS 1881: Part 105 : 1984**: Testing Concrete: Method for determination of flow. London, p. 10, 1984.

BUCHER, H. R. E. A carbonatação do concreto na corrosão da armadura. In: 31ª REIBRAC – Reunião Anual do IBRACON, 1989, São Paulo. **Anais...**,São Paulo, 1989, p. 481-496.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª Edição. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002. 589 p.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. ed. Rio de Janeiro: PINI, 1998. 522 p.

CARMO, M. A. **Estudo da deterioração e marquises de concreto armado nas cidades de Uberlãndia e Bambuí**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2009.

CASTRO, P.; SANJUÁN, M. A.; GENESCÁ, J. Carbonation of concretes in the Mexican Gulf. **Building and Environment**, v. 35, p. 145-149, 2000.

CEB – FIP – COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON ET FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAINTE. **Lightweight aggregate concrete: Manual of design and tecnology.** The Construction Press, 1977. 169 p.

CEN – COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **CEN-prEN 205-25**: Béton: Performances, production et comformité. Paris, p. 67, 1999.

CHOI, P.; YEON, J. H.; YUN, K-K. Air-void structure, strength, and permeability of wet-mix shotcrete before and after shotcreting operation: The influences of silica fume and air-entraining agent. **Cement & Concrete Composites**, v. 70, p. 69-77, 2016.

CHUNG, H. W.; LAW, K. S. Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique. **Concrete International**, v. 5, n. 10, p. 42-49, 1983.

CHUNG, S-Y; ELRAHMAN, M. A.; STEPHAN, D.; KAMM, P. H. Investigation of characteristics and responses of insulating cement paste specimens with Aer solids using X-ray micro-computed tomography. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 204-215, 2016.

CHUNG, S-Y; HAN, T-S; KIM, S-Y; LEE, T-H. Investigation of the permeability of porous concrete reconstructed using probabilistic description methods. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 760-770, 2014.

CHUNG, S-Y; HAN, T-S; YUN, T. S.; YOUM, K. S. Evaluation of the anisotropy of the void distribution and the stiffness of lightweight aggregates using CT imaging. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 998-1008, 2013.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação se sulfato mediante utilização do UPV**. 2004. 246 f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.

DEMIRBOGA, R; GÜL, R. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 723-727, 2003.

FAUSTO, A. P.; MOSER, D. E. Concreto com ar incorporado: Efeitos na resistência mecânica. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2011, 2011, Florianópolis. **Anais...**, Florianópolis, 2011.

FERREIRA, G. **Estudo sobre fatores influentes nos resultados de ensaios não destrutivos em concreto endurecido**. 2011. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2011.

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005, v.2.

FIGUEIREDO, R. C.; LIMA, S. M. Influência do teor de ar incorporado em concretos com elevado consumo de agregados. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2010, 2010, Fortaleza. **Anais...**, Fortaleza, 2010.

GALLUCCI, E.; SCRIVENER, K.; GROSO, A.; STAMPANOMI, M.; MARGARITONDO, G. 3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography (µCT). **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 360-368, 2007.

GHAHARI, S. A.; RAMEZANIANPOUR, A. M.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; ESMAELLI, M. An accelerated test method of simultaneous carbonation and chloride ion ingress: durability of silica fume concrete in severe environments. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2016, 12 p., 2016.

GIACOMIN, R. C. **Estudo das propriedades do concreto com argila expandida**. 2005. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005.

GIRIDHAR, V.; PRATHAP KUMAR, N.; PRAVEEN KUMAR, P. S. Strength Characteristics of Air Entrained Concrete. **The International Journal Of Engineering And Science (IJES)**, v.2, n. 9, p.07-14, 2013.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1ª Edição. ed. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.

INTERCEMENT BRASIL (2014). **Cauê CPV ARI Estrutura (Ficha técnica de produto).** Obtido via *e-mail* em abril de 2014.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e principios de ciência e engenharia de materiais**. 1ª Edição. ed. São Paulo: IBRACON, 2007, V.1. 792 p.

KHEDR, S. A.; ABOU-ZEID, M. N.; ABADIR, J. M. Response of air-entrained concrete to severe chemical aggression. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 18, p. 11-17, 2006.

KILIÇ, A.; ATIS, C. D.; YASAR, E.; ÖZCAN, F. High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1595-1599, 2003.

KORAT, L.; DUCMAN, V.; LEGAT, A.; MIRTIC, B. Characterisation of the pore-forming process in lightweight aggregate based on silica sludge by means of X-ray micro-tomography (micro-ct) and mercury intrusion porosimetry (mip). **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 6997-7005, 2013.

KREFT, O.; HAUSMANN, J.; HUBÁLKOVA, J.; ANEZIRIS, C. G.; STRAUBE, B.; SCHOCH, T. Pore size distribution effects on the thermal conductivity of light weight autoclaved aerated concrete. **Cement Wapno Beton**, v. 2011/7, p. 49-52, 2011.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª Edição. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás/Procel, 2014. 366 p.

LAZNIEWSKA-PIEKARCZYK, B. The type of air-entraining and viscosity modifying admixtures and porosity and frost durability of high performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 659-671, 2013.

LIU, S.; LEI, Y.; NAN, D.; YANG, H. Affecting factors on the air content of concrete. In: Fourth Geo-China International Conference, 2016, Shandong, China. **Anais eletrônicos...**, Shandong, 2016. Disponível em: <hhttp://ascelibrary.org.org/doi/abs/10.1061/9780784480090.015>. Acesso em: 24 ago. 2016.

LO, T. Y.; CUI, H. Z.; NADEEM, A.; LI, Z. G. The effects of air content on permeability of lightweight concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1874-1878, 2006.

LU, H.; PETERSON, K.; CHERNOLOZ, O. Measurement of entrained air-void parameters in Portland cement concrete using micro X-ray computed tomography. **International Journal of Pavement Engineering**, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2016.1172705>. Acesso em: 21 set. 2016.

MARTIN, J. F. M. Aditivos para concreto. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005, v.2, p.

MARTINS, M. L. C.; AZEVEDO, A. A.; GONÇALVES, R. B.; TORRES, A. S. Estudo da viabilidade e potencialidade do concreto leve com argila expandida em processos construtivos. In: 45º Congresso Brasileiro do concreto, 2003, Vitória. **Anais...**, Vitória, 2003.

MEHTA, P. K.; GERWICK Jr., B. C. Cracking-corrosion interaction in concrete exposed to marine environment. **Concrete International**, v. 4, n. 10, p. 45-51, 1982.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª Edição. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J.; BORBA JÚNIOR, J. C. Carbonatação natural de concretos: resultados de cerca de quatro anos de monitoramento. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construido – ENTAC2006, 2006, Florianópolis. **Anais...**, Florianópolis, 2006.

MITRE, M. P.; BARBOSA, P. E.; HELENE, P. Influência do traço na carbonatação de concretos, argamassas e pastas. **Concreto & Construções**, IBRACON, v. 10, p. 25-37, 2002.

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

NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. Structure and properties of aerated concrete: a review. **Cement & Concrete Composites**, v. 22, p. 321-329, 2000.

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismo de transporte de fluidos no concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005, v.2.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 5a Edição. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2ª Edição. Bookman, 2013. 472 p.

NEWMAN, J.; CHOO, B. S. **Advanced Concrete Technology**. 1ª Edição. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. 704 p.

NORWEGIAN COUNCIL FOR BUILDING STANDARTIZATION. **NS 3473 E 1992**: Concrete structures design rules. Oslo, p. 78, 1992.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Coalisão de organizações para discutir mudanças climáticas. Disponível em: <WWW.observatoriodoclima.eco.br>. Acesso em: 28 set. 2016.

OHDAIRA, E.; MASUZAWA, N. Water content its effect on ultrasound propagation in concrete – the possibility of NDE. **Ultrassonics**, v. 38, p. 546-552, 2000.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construido**, v. 7, n. 4, p. 07-20, 2007.

PESSÔA, J. R. C.; BREDER, L. B.; CARVALHO, G.; RODRIGUES, G. J. O.; LIMA, I., ASSIS, J. T. Microtomografia com Raio X e Processamento de Imagem na Obtenção da Porosidade do Concreto. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2011, 2011, Florianópolis. **Anais...**, Florianópolis, 2011.

PETRUCCI, E. G. R.; PAULON, V. A. **Concreto de cimento Portland**. 14ª Edição. ed. Porto Alegre: Globo, 2005. 307 p.

PONIKIEWSKI, T.; GOLASZEWSKI, J.; RUDZKI, M.; BUGDOL, M. Determination of steel fibres distribution in self-compacting concrete beams using X-ray computed tomography. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 15, p. 558-568, 2015.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência**. 2011. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2011.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 4ª Edição. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. 212 p.

RILEM – INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES. Terminology and Definitions of Lightweight Concrete. Paris, p. 6, 1975.

ROSEMANN, F. **Resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos pelo critério de isolamento térmico**. 2011. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2011.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos - dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003. 275 f. Tese (Doutorado) - Interunidades: Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. 1ª Edição. ed. São Paulo: PINI, 2009. 150 p.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N. Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida. **Revista Matéria**, v. 15, n. 1, p. 31-39, 2010.

SANTIAGO, E. Q. R. **Utilização de agregados de EVA e RCD para obtenção de concretos leves**. 2008. 185 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana. 2008.

SCHANKOSKI, R. A.; GRAEFF, E. R.; COSTA, F. O.; PRUDÊNCIO, L. R. Comparação entre diferentes métodos de determinação do teor de ar incorporado em argamassas. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2012, 2012, Maceió. **Anais...**, Maceió, 2012.

SCHOBER, G. Porosity in autoclaved aerated concrete (CAA): a review on pore structure, types of porosity, measurement methods and effects of porosity on properties. In: 5th International Conference on Autoclaved Aerated, Bydgoszcz. **Anais...**, Bydgoszcz, 2011, p. 14-17.

SILVA, F. G.; HELENE, P.; BORGES, P. C.; LIBORIO, J. B. L. Sources of variations when comparing concrete carbonation results. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.21, n. 7, p. 333-342, 2009.

SILVA, N. G.; COLLODETI, G.; PICHETTI, D. Z. C. M.; GLEIZE, P. J. P. Efeitos do ar incorporado nas propriedades do estado endurecido em argamassa de cimento e areia. In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2009, 2009, Curitiba. **Anais...**, Curitiba, 2009.

SOBRAL, H. S. **Concretos leves: tipos e comportamento estrutural**. 3ª Edição. ed. São Paulo: ABCP, 1996. 60 p.

SUN, X.; DAI, Q.; Ng, K. Computacional investigation of pore permeability and connectivity from transmission X-ray microscope images of a cement paste specimen. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 240-251, 2014.

THAI, K. C.; QUEIROZ, R. S. G.; PINTO BARBOSA, M.; PRINCE-AGBODJAN, W. A técnica de emissão ultra-sonora para avaliação das propriedades mecânicas do concreto. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2011, 2011, Florianópolis. **Anais...**, Florianópolis, 2011.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável**. 1ª Edição. ed. São Paulo: PINI, 2008. 142 p.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011, v.1.

VIEIRA, F.; FARIA, L. A.; CASTRO, A. Avaliação das propriedades do concreto endurecido e aspectos reológicos em função da variação do ar incorporado. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2011, 2011, Florianópolis. **Anais...**, Florianópolis, 2011.

WOODS, H. Durability of Concrete. **ACI Monograph**, n. 4, p. 19-20, 1968.

WU, H.; LIU, Z.; SUN, B.; YIN, J. Experimental investigation on freeze-thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC). **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 63-71, 2016.

YE GUANG; VAN BREUGEL, K.; FRAAIJ, A. L. A. Experimental study on ultrasonic pulse velocity evaluation of the microstructure of cementitious material at early age. **Heron**, v. 46, n. 3, p. 161-167, 2001.

ZHANG, M.; JIVKOV, A. P. Micromechanical modeling of deformation and fracture of hydrating cement paste using X-ray computed tomography characterization. **Composites Part B**, v. 88, p. 64-72, 2016.